REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie
Département du **G**énie **E**lectrique

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : électrotechnique
Spécialité : Energies Renouvelables en électrotechnique

Thème

Commande d'un Onduleur à Trois Niveaux connecté au Réseau Electrique avec une Source Photovoltaïque

Présenté par :

KERKOUB Mohamed El Amine
FAREH Missoum

Proposé et Dirigé par :

Dr. MORSLI Abdelkader
Mr. BENFATAH Ahmed

Promotion : 2020-2021

R e m e r c i e m e n t s

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

A la suite Nous tenons à remercier vivement Dr MORSLI Abdelkader notre promoteur et Mr BENFATEH Ahmed notre Co-promoteur, qui ont fournis des efforts énormes, par leurs informations, leurs conseils et leurs encouragements.

Nous tenons également à remercier messieurs les membres de jury pour l'honneur qu'ils nos ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance,

Et tous les professeurs de département de Génie électrique A tous ce qui furent à un moment ou à toute instante partie prenante de ce travail.

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

D é d i c a c e s

Nous dédions ce modeste travail à :

- ❖ Nos chers parents. En témoignage d'affection et de reconnaissance pour leurs sacrifices, leurs encouragements et leurs soutiens.
- ❖ Nos chers frères et sœurs.
- ❖ Toutes nos familles.
- ❖ Tous nos amis.
- ❖ La promotion Electrotechnique 2021.
- ❖ Tous ceux qui ont contribué a notre réussite.

Mohamed et Missoum

الملخص

تستخدم محولات الطاقة في العديد من المجالات وتلعب دورا هاما في مجال الكهروضوئية. هذا العمل هو دراسة عن المحولات المستخدمة في معظم الأنظمة الكهروضوئية (PV) وهي متصلة بشبكة الطاقة الكهربائية .ولقد أجرينا دراسة عامة للمولد الكهروضوئي وعمله عند أقصى قدر من الطاقة باستخدام المطبر تتحكم فيه خوارزمية (MPPT) نقطة الاستطاعة القصوى لتوليد الكهربائي من نوع تشويش وملاحظة (P&O) , والهدف هو تحسين كفاءة الطاقة للأنظمة الكهروضوئية .لقد ربطنا هذا النظام بشبكة التوتر المنخفض بواسطة مموج يتحكم به عرض نبض التعديل

الكلمات الدالة: مولد كهر وضوئي ,المطبر، خوارزمية نقطة الاستطاعة القصوى لتوليد الكهربائي، المموج ، معدل النبض

Résumé

Les convertisseurs électriques sont utilisés dans plusieurs domaines et jouent un rôle primordial dans les applications photovoltaïques. Ce travail constitue une étude sur les convertisseurs utilisé dans la plupart des systèmes photovoltaïques (PV) qu'ils sont raccordés au réseau électrique. Nous avons effectué une étude générale du générateur photovoltaïque et de son fonctionnement à sa puissance maximale en utilisant un hacheur boost commandé par un algorithme MPPT de type P&O, le but étant d'améliorer le rendement en puissance du système PV. nous avons raccorder se system avec un réseau par un onduleur à trois niveaux par la commande MLI.

Mots clé : Photovoltaïques, Hacheur, MPPT, Onduleur, MLI, Réseau électrique

Abstract

The power converters are used in many areas and play an important role in photovoltaic applications. This work is a study of the converters used in most of the photovoltaic (PV) systems that are connected to the grid. We conducted a comprehensive study of the photovoltaic generator and its operation at maximum power using a boost chopper controlled by an MPPT algorithm, type P&O, the goal is to improve the power efficiency of the PV system. We connect to network system with a three-level inverter controlled by PWM.

Key words : Photovoltaic, Chopper, MPPT, Inverter, MLI, Electrical network

Liste des figures

Chapitre I : Production d'énergie photovoltaïque

Figure (I.1): Objectifs du programme algérien des Energies Renouvelables.....4

Figure (I.2) : Composante du rayonnement global sur un plan horizontal.....6

Figure (I.3) : spectre solaire hors atmosphère……...7

Figure (I.4) : Excitation des électrons de valence par les photons et la jonction (P-N).....8

Figure (I.5) : Constitution d'une cellule photovoltaïque……...9

Figure (I.6) : Evolution de la caractéristique I= f(V) et P= f(V).....9

Figure I.7 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque……10

Figure (I.8) : Différents types des cellules.....12

Figure (I.9) : Panneau photovoltaïque……13

Figure (I.10) : Boite de dérivation……...13

Figure (I.11) : Caractéristique courant tension de Ns cellule en série……14

Figure (I.12) : Caractéristique courant tension de (Np) cellule en parallèle……15

Figure (I.13) : Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour……16

Figure (I.14) : Un module photovoltaïque avec une cellule *"Hot spot"* …….....16

Figure (I.15) : Association série-parallèle, avec des diodes By-pass - Anti-retour.....17

Figure (I.16) : Système photovoltaïque autonome.....18

Figure (I.17) : Système hybride (photovoltaïque - éolienne)……...19

Figure (I.18): Installation de production électrique raccordée au réseau…….. ..20

Chapitre II: Les convertisseurs statiques

Figure (II.1): schéma électrique d'un hacheur boost…….....25

Figure (II.1.a) : Schéma équivalent d'un convertisseur Boost……....25

Figure (II.1.b): Schéma équivalent d'un convertisseur Boost……..26

Figure (II.2) : Schéma équivalent d'un convertisseur Buck……27

Figure (II.2.a) : Schéma équivalent d'un convertisseur Buck (K fermé et D1 bloquée)……28

Figure (II.2.b) : Schéma équivalent d'un convertisseur Buck (K ouvert et D1 fermée)…….28

Figure (II.3) : Schéma électrique d'un convertisseur Buck-Boost……..29

Figure (II.3.a) : Schéma équivalent d'un convertisseur Buck-Boost (K fermé et D1 bloquée).....30

Figure (II.3.b) : Schéma équivalent d'un convertisseur Buck-Boost (K ouvert et D1 passante)……31

Figure (II.4) : La caractéristique I-V, P-V et la trajectoire de PPM……32

Figure (II.5) : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque……...33

Figure (II.6) : Caractéristiques de fonctionnement de l'Algorithme P&O…….34

Figure (II.7) : Organigramme de l'algorithme MPPT de la perturbation & observation……35

Figure (II.8) : Schéma d'un onduleur à deux niveaux…….36

Figure (II.9) : Schéma fonctionnel d'un onduleur monophasé en pont H……...37

Figure (II.10) : Schéma de Principe d'un Onduleur Triphasé En Pont……...38

Figure (II.11) : La structure d'un onduleur de tension triphasé à trois niveaux à structure NPC.....38

Chapitre III: Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque

Figure (III.1) : Modèle de cellule photovoltaïque idéal……..43

Figure (III.2): Modèle de la cellule photovoltaïque réel…….44

Figure (III.3): Schéma du Module PV poly ELYSUN sous Matlab/ Simulink…….....45

Figure (III.4) : Caractéristique $(I_{PV} = f(V_{PV}))$ du générateur PV……45

Figure (III.5) : Caractéristique $(P_{PV} = f(V_{PV}))$ du générateur PV……46

Figure III.6 Caractéristique $(I_{PV} = f(V_{PV}))$ d'un générateur photovoltaïque……..47

Figure III.7. Caractéristique $(P_{PV} = f(V_{PV}))$ d'un générateur photovoltaïque……..47

Figure III.8. Caractéristique $(I_{PV} = f(V_{PV}))$ du générateur photovoltaïque……48

Figure III.9. Caractéristique $(P_{PV} = f(V_{PV}))$ du générateur photovoltaïque……...49

Figure (III.10) : Convertisseur Boost (sous Matlab/Simulink) alimentant une charge R ….49

Figure(III.11) : Graphe de la tension à l'entrée du Convertisseur Boost……..50

Figure (III.12) : Graphe de courant à l'entrée du Convertisseur Boost……...50

Figure (III.13) : Graphe de la tension de sortie du Convertisseur Boost…….....50

Figure (III.14) : Schéma de l'algorithme P & O sous Matlab/Simulink…….51

Figure (III.15) : Circuit global sous Matlab/Simulink……52

Figure (III.16) : Les tensions (V_a , V_b , V_c) et les courants (I_a , I_b , I_c)de l'onduleur.. ……..53

Figure (III.17) : la tension sortie de l'onduleur V_{ond}……..53

Figure (III.18) : résultat global de système PV……...54

Liste des tableaux

Tableau (III.1) : Caractéristiques physiques et électriques du module photovoltaïque poly ELYSUN dans les condition standards ……42

Liste des symboles et abréviations

A. *Liste des symboles*

H : la constante de Planck.

c : la vitesse de la lumière.

λ : longueur d'onde.

P_C : La puissance de crête.

V_{C0} : Tension à vide.

I_{CC} : Courant de court circuit.

P_m : Point de fonctionnement optimum.

U_m : Tension maximum.

I_m : Courant maximum.

FF : facteur de forme.

I_{ph} : Courant aux bornes du module photovoltaïque (A).

R_S : Résistance série.

R_P : Résistance parallèle.

I_d : Courant de diode.

I_P : Le courant dérivé par la résistance parallèle.

I : Le courant fourni par la cellule.

V : Tension nominale.

N_S : Nombre de cellules en série.

N_P : Nombre de cellules en parallèle.

V_{c0Ns} : La somme des tensions en circuit ouvert de Ns cellules en série.

I_{ccNs} : Courant de court-circuit de Ns cellules en série.

I_{ccNp} : La somme des courants de cout circuit de (NP) cellule en parallèle.

V_{c0Np} : Tension du circuit ouvert de(NP) cellules en parallèle.

D : diode

V_S : Tension de sortie de l'hacheur boost.

V_E : Tension d'entrée de l'hacheur boost.

L : L'inductance.

C : Condensateur.

R : La charge

D : Rapport cyclique.

V_d : La tension aux bornes de diode.

V_t : Potentielle thermique

I_0 : Le courant de saturation de la diode.

K : Constante de Boltzmann (1,381 .10-23 joule/Kelvin).

q : Charge d'électron =1,602 .10-19 C

n : Le facteur de qualité de diode.

T : La température de cellule en kelvin.

I_{sc} : Le courant de court-circuit de référence.

G : L'irradiation solaire en W/m^2.

B. *Liste des abréviations*

PV : Photovoltaïque.

GPV : Générateur Photovoltaïque.

FF : Facteur de forme.

GTO : Gate Turn-Off Thyristor.

MPPT *:* Maximum Power Point Tracking.

PPM : Le point de puissance maximale.

P&O : Perturbation et Observation.

DC : Courant Continu (Direct Current).

AC : Courant Alternatif (Alternative Current)

DC /DC : Hacheur.

DC/AC : Onduleur.

MLI : Modulation Largeur D'impulsion.

PWM : (Pulse Width Modulation).

IGBT : Insulated Gate Bipolar Transistor.

Table des matières

Introduction générale :……1

Chapitre I : Production d'énergie photovoltaïque

I.1. Introduction :……...3

I.2.Définition d'énergie renouvelable:……3

I.2.1. l'énergie renouvelable en Algérie :……..3

I.3. L'énergie solaire :…… .4

I.3.1. Rayonnement solaire :……...5

I.3.2. Spectre du rayonnement :……..6

I.4. L'énergie solaire photovoltaïque :……7

I.4.1.Historique :…….....7

I.4.2. L'effet photovoltaïque :…….....8

I.4.3. Cellule photovoltaïque :……8

I.4.3.1. Caractéristiques électrique d'une cellule PV :……....9

I.4.3.2. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque :……...10

I.5. Les différentes technologies des cellules PV :……...11

I.5.1.Les Cellules à bas de Silicium monocristallines :……....11

I.5.2. Les Cellules à bas de Silicium poly cristallines :……11

I.5.3. Les Cellules à bas de Silicium amorphe :……11

I.5.4.Les Cellules à bas organiques et plastiques :……12

I.6. Panneau solaire (champ solaire) :……...12

I.6.1. Regroupement des cellules en série :……...14

I.6.2. Regroupement des cellules en parallèle :……15

I.6.3. Regroupement des cellules (séries et parallèle) :……15

I.7. Protection classiques d'un générateur photovoltaïque :……16

I.7.1. Les diodes parallèles (Diode by-pass.) :……..16

I.7.2. Les diodes séries (Diode anti-retour) :…….17

I.8. Les systèmes photovoltaïques :……..17

I.8.1.Les Systèmes autonomes :……....17

I.8.2. Les Systèmes hybrides :…….....18

I.8.3.Les Systèmes PV raccordée au réseau :……....19

I.9.Classification des Centrales photovoltaïques connectés au réseau :……...20

I.9.1. Centrales de petite taille (P=1 à 10 KW) :……...20

I.9.2. Centrales de taille moyenne (P=10 à 100 KW) :…….20

I.9.3. Centrales de grande taille (P > 500 KW) :……...20

I.10. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque :……....21

I.10.1. Les avantage :……21

I.10. 2. Les inconvénients :……...21

I.11. Conclusion :…….....22

Chapitre II: Les convertisseurs statiques

II.1 Introduction :……..23

II.2.Les convertisseurs électriques :……..23

II.3. Convertisseur DC-DC :…….24

II.3.1.Définition :……..24

II.3.2.Types des hacheurs :……...24

II.3.3. Hacheur survolteur (Boost) :……..24

II.3.3.1.L’étude et principe de fonctionnement :……...25

II.3.3.2.Avantage de convertisseur boost :……26

II.3.4. Hacheur dévolteur (Buck) :……27

II.3.4.1. L’étude et principe de fonctionnement :……..27

II.3.5.Hacheur dévolteur-survolteur (Buck-Boost) :……29

II.3.5.1. L’étude et principe de fonctionnement :……..29

II.4. La commande (MPPT) :……...31

II.4.1.Définition :……..31

II.4.2.Le Principe de fonctionnement de MPPT d'un générateur PV :……31

II.4.3. Les différentes techniques de MPPT :……33

II.4.4.La Commande P&O :……..34

II.4.4.1. Définition :……..34

II.4.4.2.Le fonctionnement de l'algorithme P&O :……... …...34

II.5. Convertisseurs DC/AC :……36

II.5.1. Définition :…….36

II.5.2. Les types de l'onduleur :……37

II.5.2.1.Onduleur monophasé :……..37

II.5.2.1.Onduleur triphasé :…….....37

II.5.3.Modèle de l'onduleur a trois niveaux :……38

II.5.4.La Commande de l'onduleur :…….39

II.5.4.1.principe de génération de la PWM :…….39

II.6.Conclusion :……. ..40

Chapitre III : Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque

III.1. Introduction :……41

III.2. L'outil Matlab :……41

III.3. Le Système Photovoltaïque proposée :……42

III.3.1. Caractéristique du module photovoltaïque :…….42

III.4. Le générateur photovoltaïque (GPV) :…….43

III.4 .1. Modélisation :……..43

III.4 .2. Simulation du générateur (GPV) à éclairement et température constante :……45

III.4 .3. Simulation du générateur (GPV) à éclairement et température variable :……...46

III.4.3.1. L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $(I_{PV} = f(V_{PV}))$:……47

III.4.3.2. L'influence de l'éclairement sur la caractéristique ($P_{PV} = f(V_{PV})$) :……47

III.4.3.3. L'influence de la température sur la caractéristique ($I_{PV} = f(V_{PV})$) :……..48

III.4.3.4. L'influence de la température sur la caractéristique ($P_{PV} = f(V_{PV})$) :……...48

III.5. Simulation du system PV avec hacheur commandé en MPPT :……..49

III.5.1. Hacheur(le convertisseur boost) :……...49

III.6. Simulation global d un système photovoltaïque :……52

III.6.1.Résultats de simulation :……53

III.7. conclusion :……..55

Conclusion générale :……56

BIBLIOGRAPHIE

ANNXE

INTRODUCTION GENERALE

La civilisation moderne avec toutes ses manifestations est basée sur la consommation d'énergie dont une grande partie est de source fossile. Cette consommation qui atteint des scores élevés et effrayants réduit les réserves de ce type d'énergie pour les générations future ce qui conduit à l'intensification des efforts et des appels pour rechercher de nouvelles sources d'énergies inépuisables. D'ou l'alternative de la solution des énergies renouvelables qui a pris naissance depuis les années soixante du vingtième siècle.[1]

La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. En plus la consommation excessive de stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générationsfutures.

La technologie photovoltaïque (PV) est une solution attrayante comme remplacement ou complément des sources conventionnelles d'approvisionnement en électricité en raison de nombreux avantages.

A travers l'effet photovoltaïque, l'énergie fournit est très variable et est toujours en courant continu: il faut souvent la stocker et parfois la transformer. L'association des centrales PV connectées au réseau électrique se fait à l'aide d'un convertisseur. Dans le cadre de notre travail, nous traitons l'une des structures les plus recommandées dite « onduleur de tension» qui sera utilisé pour injecter l'énergie électrique issue d'une source PV vers le réseau de distribution[2].

Dans la plupart des systèmes de production d'énergie photovoltaïque, on trouve une technique ou un algorithme particulier nommé « Maximum Power Point Tracking » (MPPT) qui se traduit par, poursuite du point de puissance maximale. Cette technique, comme son nom l'indique, traque le MPP dans le temps et permet de tirer le maximum de puissance que le panneau est apte à fournir. Le MPPT vise à améliorer et à optimiser l'exploitation des systèmes photovoltaïques.[3]

Le mémoire est subdivisé en 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. Les avantages et inconvénients.

- Dans le deuxième chapitre, on étudie quelques types convertisseurs statiques (*DC-DC*) et (*DC-AC*) et utilisés les méthodes de la commande *MPPT* et la commande MLI de l'onduleur.

- Dans le troisième chapitre, on étudie une Modélisation et simulation par MATLABSIMULINK de chaque élément du système *PV* réalisé, convertisseur boost et commande *MPPT* « perturbation et observation » et l'onduleur à trois niveaux et aussi la fonction référence pour la commande de l'onduleur.

Nous terminerons ce travail par une conclusion générale

I.1. Introduction :

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir, en effet les besoins énergétiques des pays industrialisés ne cessent d'augmenter, par ailleurs les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement.

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancées sur le plan technologiques et industriel, en effet le silicium et l'un des éléments les plus abondants sur terre sous forme de silice non toxique.

En effet le mot " photovoltaïque " vient du grec " photo " qui signifie lumière et de "voltaïque " qui tire son origine du nom d'un physicien italien Alessandro Volta (1754 – 1827) qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité , alors le photovoltaïque signifie littérairement la « lumière électricité » [4].

I.2.Définition d'énergie renouvelable

On considère qu'une énergie est renouvelable, toute source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable (d'où son nom) c'est-à-dire, sa vitesse de formation doit être plus grande que sa vitesse d'utilisation.

Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués principalement par le Soleil (l'énergie solaire mais aussi hydraulique, éolienne et biomasse….), la Lune (énergie marémotrice, certains courants : énergie hydrolienne...) et la Terre (géothermique profonde...), à l'échelle de la durée de vie de humanité .Ce n'est pas le cas pour les combustible les fossiles et nucléaires. [2]

I.2.1.Les énergies renouvelables en Algérie :

L'augmentation du coût des énergies classiques d'une part, et la limitation de leurs ressources d'autre part, font que l'énergie renouvelable devient de plus en plus une solution prometteuses avec des avantages comme l'abondance, l'absence de toute pollution et la disponibilité en plus ou moins grandes quantités en tout point du globe terrestre. Actuellement, on assiste à un regain d'intérêt pour les installations utilisant l'énergie solaire, surtout pour les applications sur des sites isolés. [5]

Dans ce propos l'Algérie l'un des pays de fort potentiel des énergies renouvelables, avec une capacité nationale d'électricité qui dépasse les 56.74 TWh avec 0.45 TWh crête seulement pour les énergies renouvelables (en 2012)[6],spécifiquement l'énergie solaire photovoltaïque, car l'Algérie dispose d'un des gisements solaire les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara), et l'énergie reçue annuellement sur une surface horizontale de 1m² soit près de 3 KWh/m² au nord et dépasse 5,6 KWh/ m² au Grand Sud (TAMENRASSET) [6].

L'Algérie s'engage donc avec une grande volonté sur la voie des énergies renouvelables afin d'apporter des solutions sérieuses et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile [7].

Ainsi, un programme très ambitieux est envisagé pour développer les énergies renouvelables durant la période 2015-2030, il consiste à installer une capacité totale de 22000 MW, et le solaire photovoltaïque sera la principale source de production d'énergie propre car il représenterait 62% de la capacité totale projetée à 2030 [7].

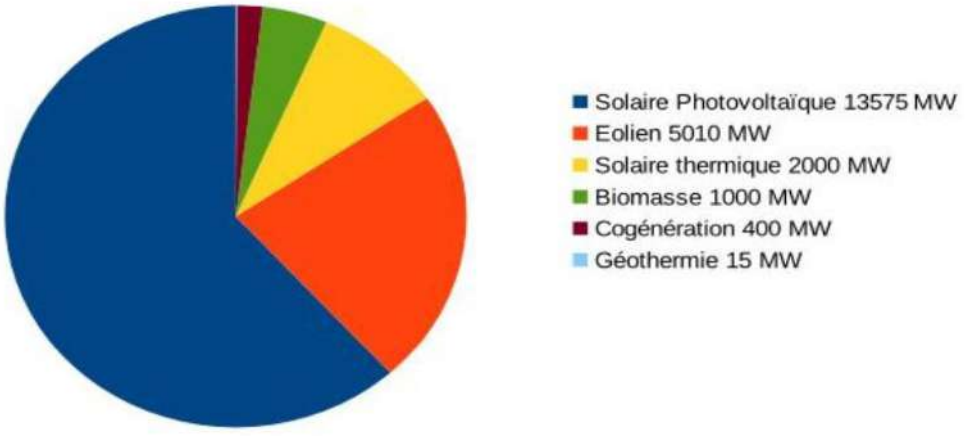


Figure (I.1): Objectifs du programme algérien des Energies Renouvelables [7]

I.3.L'énergie solaire

La distance de la terre au soleil est environ 150 million de kilomètres et la vitesse de La lumière est d'un peu plus de 300000 km/h [8], les rayons du soleil mettent donc environ 8minutesà nous parvenir. La constante solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au soleil. Sa valeur est communément priseéga le à 1360W/m2. Au niveau du sol, la densité d'énergie solaire est

réduit à 1000 W/ m2 à cause de l'absorption dans l'atmosphère

Albert Einstein à découvert en travaillant sur l'effet photoélectrique que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie est portée par des particules, les photons. L'énergie d'un photon étant donnée par la relation:

$$E = h.c/\lambda \qquad (I.1)$$

h : la constante de p lanck,

C : la vitesse de la lumière.

$$E = 1{,}26/\lambda \qquad (I.2)$$

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10 microns (µm) . L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi :

-9% dans la bande des ultraviolets (<0,4µm).

-47% dans la bande visible (0,4 à 0,8 µm).

-44% dans la bande des infrarouges (>0,8µm).

I.3.1.Rayonnement solaire:

Le rayonnement solaire est la matière première de l'énergie solaire. c'est une propagation d'une onde de longueur qui varie entre 0.2et 4.10-6m .sans la nécessite d'un support physique pour se déplacer, il arrive au sol après la perte d'une grande partie de son intensité, à cause d'une partie de l'ultraviolet, qui s'absorbent

♦ **Le rayonnement direct** est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs.Il peut être mesuré par un pyrhéliomètre.

♦ **Le rayonnement diffus** est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité,aérosols). la diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. dans le ciel, ce sont à la fois les molécules d'air, les gouttelettes d'eau (nuages) et les poussières qui produisent cet(éclatement) des rayons du soleil. Cela dépend donc avant tout des conditions météorologiques.

♦ **Le rayonnement solaire réfléchi** ou l'albédo du sol est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. cet albédo peut être important

lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).

♦ **Le rayonnement global :**est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyranomètre ou un solarimètre sans écran.

Les stations météorologiques généralement mesurer le rayonnement global horizontal par un Pyranomètre placé horizontalement à l'endroit requis. [9] .

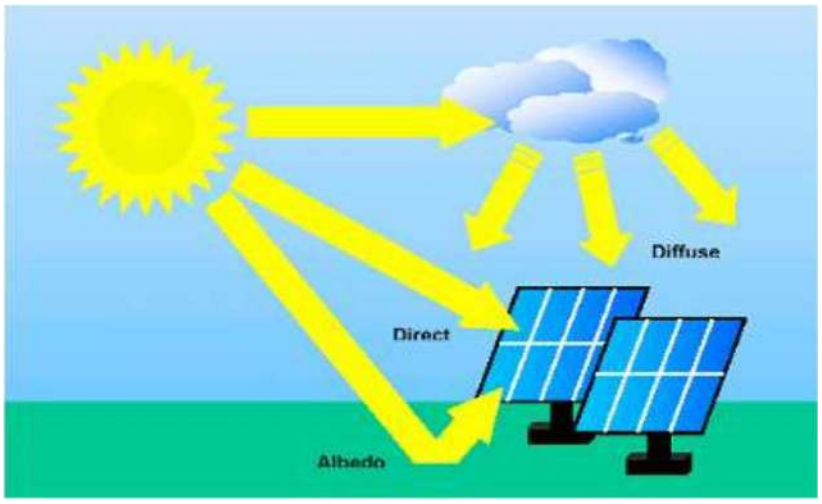


Figure (I.2) : Composante du rayonnement global sur un plan horizontal

I.3.2.Spectre du rayonnement:

Le rayonnement électromagnétique est composé de «grains» de lumière appelés photons.L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde :

Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à 5800° K. Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom de AM0. Sa distribution en énergie est répartie en [10]:

Ultraviolet U_V 0.20<1<0.38mm 6.4% Visible 0.38<1<0.78mm 48.0%

Infrarouge I_R 0.78<1<10mm 45.6%

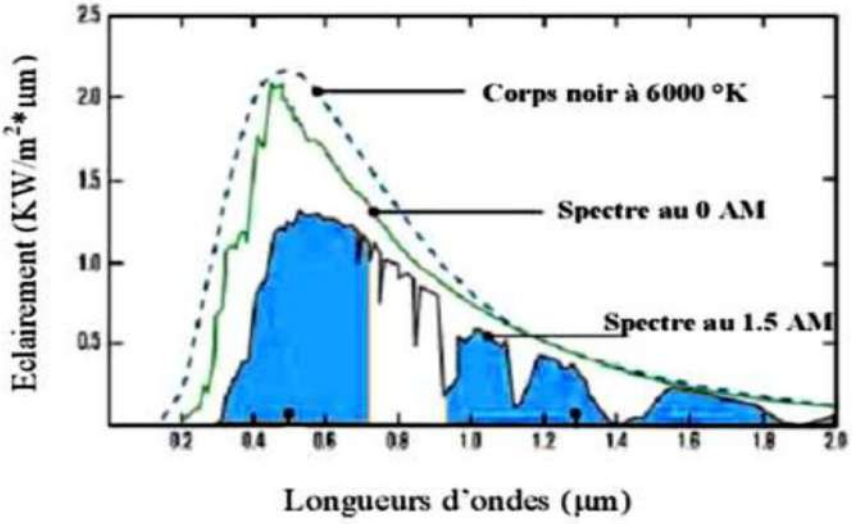


Figure (I.3) : spectre solaire hors atmosphère

I.4.L'énergie solaire photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables et la plus utilisée. Elle est transmise à la terre à travers l'espace sous forme de photons et de rayonnement électromagnétique. Elle consiste à convertir directement le rayonnement solaire en électricité. Ont utilisant des convertisseurs photovoltaïques ou cellules photovoltaïques qui représentent l'élément de base dans la conversion photovoltaïque.[11]

I.4.1.Historique :

C'est le savant français E. Becquerel qui fit la première observation d'un photo-courant,dès 1839, avec une électrode en platine et l'autre en cuivre oxydé, plongées dans une solution conductrice acide. Et en 1877 les propriétés semi-conductrices furent mises en évidence, par WG Adams et RE Day, sur le sélénium.

Mais il a fallu attendre le vingtième siècle pour avoir des résultats importants, grâce à l'interprétation théorique de l'effet photo-électrique par Einstein en 1905, mais les véritables applications pratiques n'ont été réalisées que vers le milieu du siècle en 1941, par la mise au point de la première jonction **p-n** dans le silicium, puis l'obtention d'une cellule à bon rendement (construite par les chercheurs de la Bell Téléphone Laboratoires en 1955) ainsi que les fameux transistors.[6]

I.4.2.L'effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque se manifeste quand un photon est absorbé dans un matériau composé de semi-conducteurs dopés p (positif) et n (négatif), dénommé comme jonction p-n (ou n-p). Sous l'effet de ce dopage, un champ électrique est présent dans le matériau de manière permanente (comme un aimant possède un champ magnétique permanent). Quand un photon incident (grain de lumière) interagit avec les électrons du matériau, il cède son énergie (***h*ν)**à l'électron qui se retrouve libéré de sa bande de valence et subit donc le champ électrique intrinsèque. Sous l'effet de ce champ, l'électron migre vers la face supérieure laissant place à un trou qui migre en direction inverse. Des électrodes placées sur les faces supérieure et inférieure permettent de récolter les électrons et de leur faire réaliser un travail électrique pour rejoindre le trou de la face antérieure, ainsi se crée un courant électrique. [12]

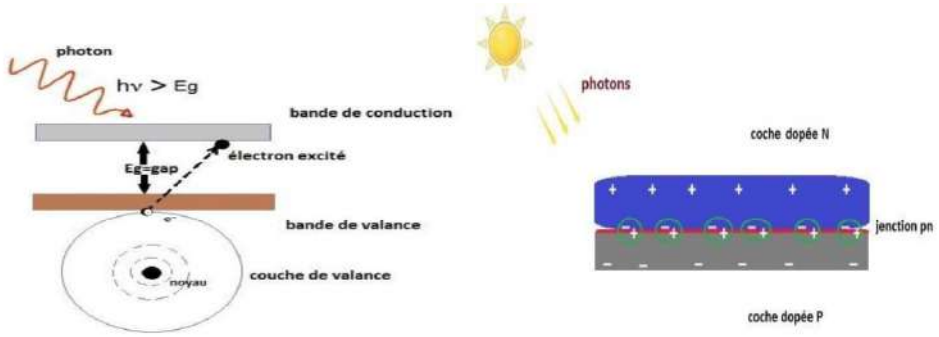


Figure (I.4) : Excitation des électrons de valence par les photons et la jonction (P-N) [13].

I.4.3.Cellule photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque est l'élément de base qui permet la conversion directe de l'énergie solaire (rayon lumineux), à une énergie électrique. Ce mode de conversion repose sur un principe très connu qui est l'effet photovoltaïque.

Et pour passer de l'effet photovoltaïque à l'application pratique, il est nécessaire de trouver des matériaux semi-conducteur qui permettent d'optimiser les deux phases essentielles de ce principe, soit l'absorption de la lumière incidente et la collection des électrons en surface.

Les cellules PV sont fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs qui Sont capables de conduire l'électricité ou de la transporter. Plus de 90 % des cellules solaires fabriquées à l'heure actuelle sont au silicium cristallin, un semi-conducteur. Une des faces de la cellule est dopée **n** (par exemple du phosphore). L'autre est dopée **p** (par exemple du bore). Des électrodes métalliques sont placées sur les 2 faces pour permettre de récolter les électrons et de réaliser un circuit électrique. La face supérieure de la cellule est traitée de manière à optimiser la quantité de lumière entrant dans la cellule au moyen de traitement de surface, par l'application d'une couche anti réflexion, et d'autre couche en verre pour l'étanchéité et la protection de la cellule. En fin les faces supérieure et inférieure sont équipées d'électrodes pour récolter les électrons. [12]

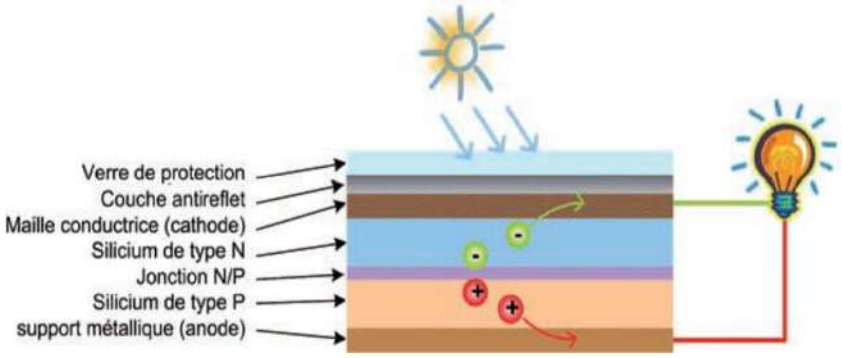


Figure (I.5) : Constitution d'une cellule photovoltaïque [14].

I.4.3.1.Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque :1

Les propriétés électriques de la cellule sont synthétisées dans un graphe qu'on appelle Caractéristique courant-tension.

La figure suivante montre les caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque :

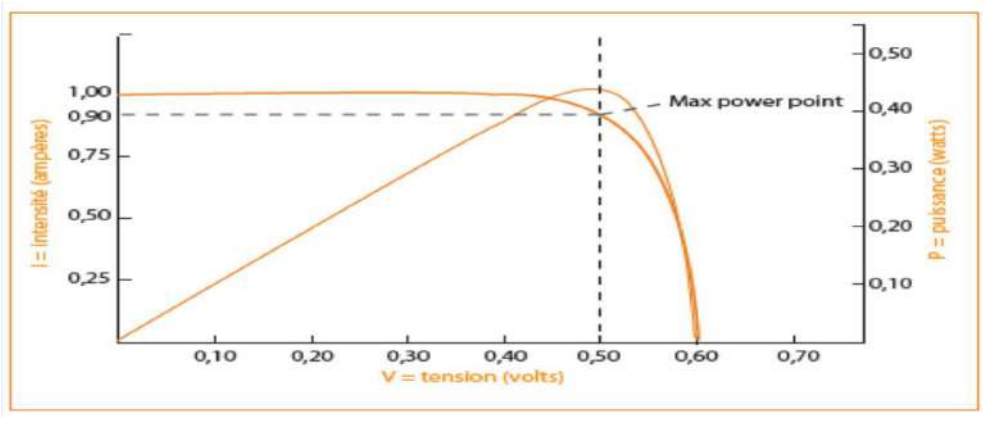


Figure (I.6) : Evolution de la caractéristique I= f(V) et P= f(V) [14] .

La puissance de crête, Pc : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m²).

La caractéristique I/V : Courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.

Tension à vide, Vc0 : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement " plein soleil ".

Courant de court-circuit, Icc : Courant débité par un module en court-circuit pour Un éclairement " plein soleil ".

Point de fonctionnement optimum, (Um, Im) : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil, Pm = Um x Im.

Rendement : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.

Facteur de forme (FF) : Rapport entre la puissance optimale Pm et la puissance maximale que peut avoir la cellule : = Vco x Icc. [15]

I.4.3.2. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

L'analogie entre le fonctionnement de la cellule photovoltaïque sous éclairement et celui d'un générateur de courant produisant un courant Iph auquel se soustrait le courant de la polarisation de la diode en polarisation directe, n'es qu'une représentation simplifiée du fonctionnement de la cellule.[16]

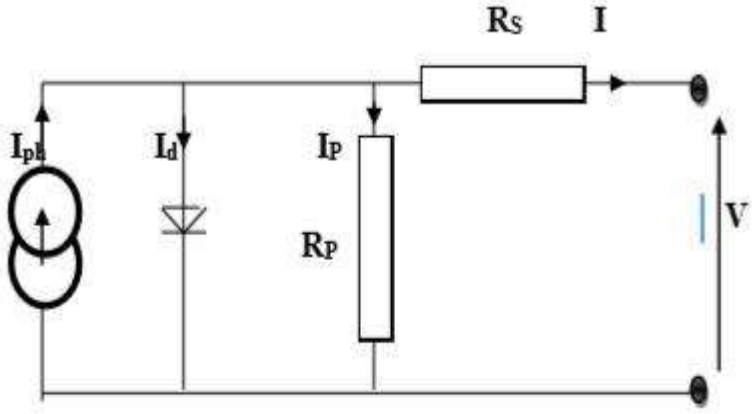


Figure I.7 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Les différents paramètres de ce modèle sont :

- **Le générateur de courant** : il délivre le courant Iph correspondant au courant photogénéré.
- **La résistance série Rs:** elle prend en compte la résistivité propre aux contacts entre les différentes régions constitutives de la cellule. Ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule.
- **La résistance Rp:** également connue sous le nom de court-circuit, elle peut être due à un court-circuit sur les bords de la cellule. On l'appelle aussi résistance de fuite.
- **La diode** : modélise la diffusion des porteurs dans la base de l'émetteur.

I.5.Les technologies des cellules photovoltaïques :

Il existe différents types cellules photovoltaïques, répartie à base de leurs technologies de fabrication, généralement les technologies les plus répondus sont à base de silicium, notamment d'autre matériaux sont aussi utilisés, comme les matières organiques.
On cite si dessous les types de cellules photovoltaïques les plus répondus :

I.5.1. Les cellules à base de silicium monocristallin :

Les cellules sont fabriquées avec du silicium parfaitement cristallisé découpé dans des barres. C'est le matériau le plus répandu, et de plus il a l'avantage d'avoir un très bon rendement, entre 12 % et 16 %.L'inconvénient en est le prix, du fait d'un procédé de fabrication long et énergivore. Il est utilisé en extérieur pour les fortes et moyennes puissances (habitations, relais, télécommunications…). [14]

I.5.2. Les cellules à base de silicium poly cristallin :

Les cellules de silicium poly cristallin sont découpées dans des barres de silicium reconstitué ; les atomes ne sont pas tous cristallisés. Le rendement est moins bon, entre 11 % et14 %. L'avantage de ces cellules par rapport à celles en silicium monocristallin réside dans leur prix, puis que leur fabrication, produisant peu de déchets, nécessite de 2 à 3 fois moins d'énergie et est plus rapide. Elles ont les mêmes applications que les cellules en silicium monocristallin. [14]

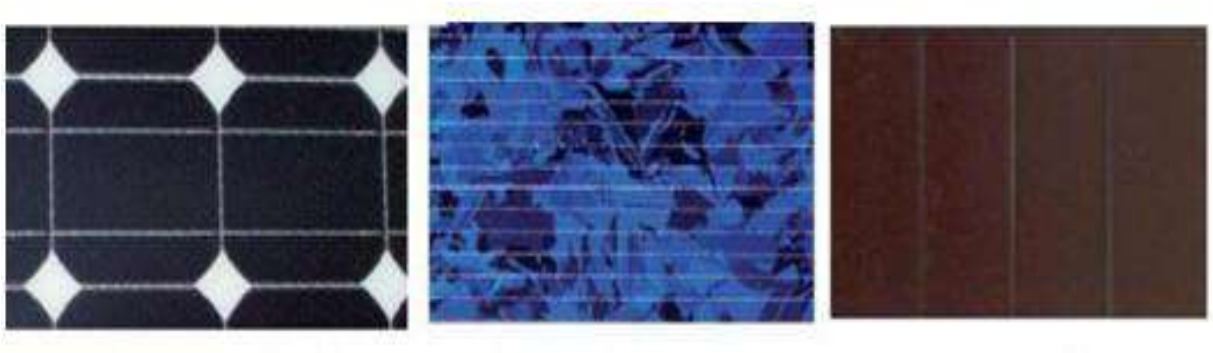
I.5.3. Les cellules à base de silicium amorphe :

Ce silicium est nettement moins puissant que les deux précédents, car les atomes sont disposés de manière désordonnée du fait que les cellules sont fabriquées par projection de

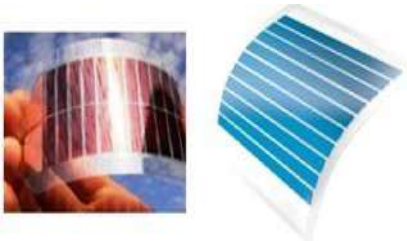
silicium sur un autre matériau, comme du verre ou du plastique. Ce silicium en couche très mince répond néanmoins à de nombreux besoins liés à l'éclairage (extérieur ou intérieur). Son rendement est de 5 % à 7 %. Il est utilisé pour l'électronique, dans les calculettes par exemple. [14]

I.5.4. les cellules base organiques et plastiques:

ils sont composées d'une bicouche de molécules évaporées sous vides, attient 0 .95% de rendement de conversion, ces cellules comprennent deux voie des cellules « humide » et la voie des cellules polymère organique dite aussi cellules « plastiques ».Le progrès de ces technologies sont très rapide, des records de rendement sont très fréquemment battus (actuellement près de 6%).Elles ouvrent également la voie aux applications légères, nomades et souples.[17]



Cellule monocristalline | Cellule poly cristalline | Cellule amorphe



Cellule à base organique et plastique

Figure (I.8) : Différents types des cellules

I.6.Panneau solaire

Le panneau solaire ou (champ solaire) (figure (I.9)) se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de

supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique.[18]



Figure (**I.9) :** Panneau photovoltaïque. [19]

Pour chaque panneau on peut avoir autant de sorties que de modules, ce que fait qu'on aura besoin de boite de dérivation qui regroupe le tous, Alors cette boite de dérivation (figure (I.10)) fixée sur une structure du montage a comme rôle d'effectuer les connections entre les modules pour obtenir une puissance optimale en sortie. [18]



Figure (I.10) : Boite de dérivation.[20]

La boite de dérivation est composée également d'un circuit imprimé sur lequel se trouvent :[20]

- Des diodes schotcky séries, placée sur un radiateur, sur chaque entrée, qui empêchent aux batteries de se décharger dans les panneaux.
- Des fusibles de protections qui empêcheront aux batteries de se décharger dans les modules en cas de destruction des diodes antiparallèles.
- Des diodes lumineuses, en parallèle sur chaque fusible de protection.Ces

diodes permettant de contrôler individuellement chaque branche de modules. Par exemple une boite à 4 entrées de 24 Volts sera constituée de deux branches de deux modules, il y aura donc deux diodes qui permettront de constater le fonctionnement de chaque branche.

- Une protection parafoudre (Transil ou VDR) en sortie de la boîte. Le câblage de ces boites permet d'avoir une sortie en 12,24 ou 48 volts selon les modules, elles sont équipées de deux à douze entrées, selon les tensions de sortie.

La quantité d'électricité dans l'ensemble des composants des panneaux PV dépend : [18]

- des besoins en électricité.
- la taille du panneau.
- L'ensoleillement du lieu d'utilisation.
- La saison d'utilisation.

I.6.1.Regroupement des cellules en série

Une association de (Ns) cellule en série figure (I.11) permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenues par addition des tensions élémentaires de chaque cellule. L'équation résume les caractéristique électriques d'une association série de (Ns) cellules. [16]

$$V_{c0Ns} = N_S \times V_{c0} \qquad (I.1)$$

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

V_{c0Ns} : la somme des tensions en circuit ouvert de Ns cellules en série.

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

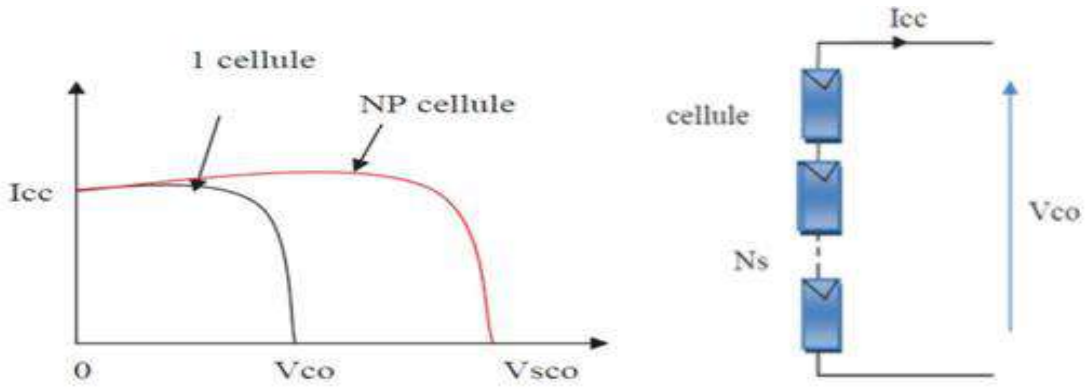


Figure (I.11) : Caractéristique courant tension de Ns cellule en série.

I.6.2.Regroupement des cellules en parallèle

Une association parallèle de (NP) cellule figure (I.12) est possible et permet d'accroitre le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants.

$$I_{ccNp} = N_p \times I_{sc} \qquad (I.3)$$

$$V_{c0} = V_{c0Np} \qquad (I.4)$$

Avec : $\mathbf{I_{ccNp}}$ **:** la somme des courants de cout circuit de (N) cellule en parallèle

V_{c0Np} : tension du circuit ouvert de (Np) cellules en parallèle.

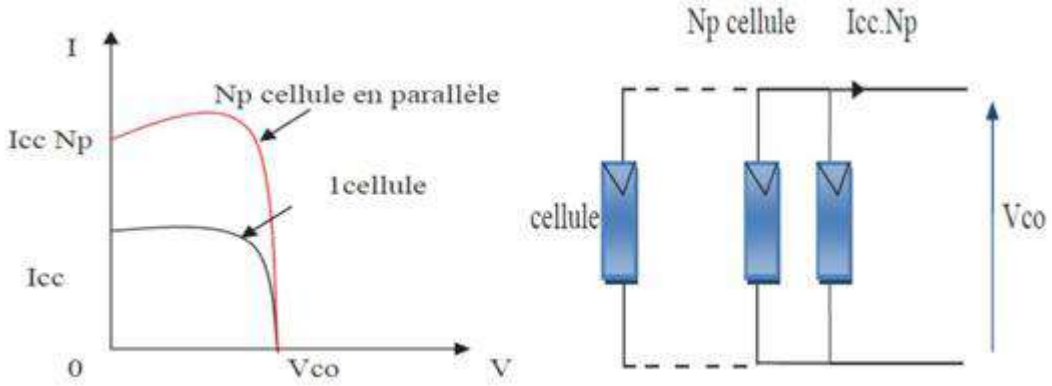


Figure (I.12) : Caractéristique courant tension de (Np) cellule en parallèle.

I.6.2.Regroupement des cellules (série et parallèle)

On utilise généralement ce type d'association pour en tirer une tension importante Puisque l'association en série des photopiles délivre une tension égale à la somme des Tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule. La caractéristique d'un groupement de deux modules solaires est représenté ci-dessous, ce qui peut être généralisé Sur une gamme de Ns modules solaires en série. Ce genre de groupement augmente le courant. Afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série.

I.7.Protection classique d'un générateur photovoltaïque

Les générateurs photovoltaïques sont destinés à produire de l'énergie électrique durant plusieurs années, alors nous devons assurer la protection électrique de l'installation afin d'augmenter sa durée de vie en évitant différentes pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leur fonctionnement en cas d'ombrage.

Pour cela, deux types de protections sont classiquement utilisées dans les installations actuelles. [21]

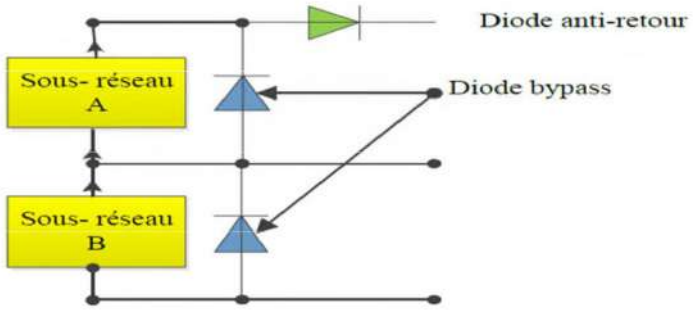


Figure (I.13) : Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour. [21]

I.7.1. Les diodes parallèles (By-pass)

La protection par diodes parallèles (ou by-pass) a pour but de protéger une série de cellules dans le cas d'un déséquilibre lié à la défectuosité d'une ou plusieurs des cellules de cette série ou d'un ombrage sur certaines cellules; Une telle cellule est appelée ***"Hot spot"*** **[22]**.

La Figure (***I.14***) montre un cas d'ombrage au niveau de la deuxième rangée, le courant passe par la diode by-pass pour cause d'ombrage.

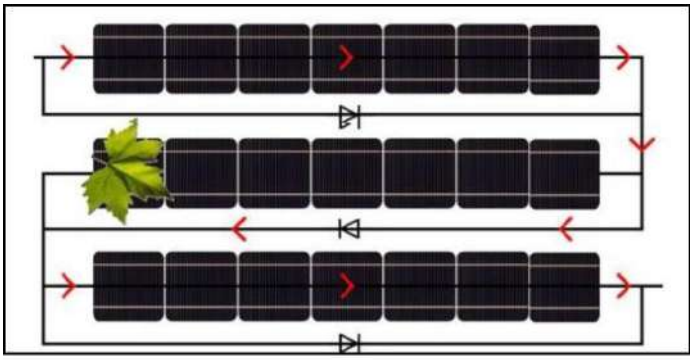


Figure (I.14) : Un module photovoltaïque avec une cellule *"Hot spot"* **[22]**.

I.7.2. Les diodes Séries (Anti-retour)

La diode en série placée entre le module et la batterie empêche pendant l'obscurité le retour de courant vers le module. Elle est dans ce cas appelée diode anti-retour comme le montre la figure (***I.15***) **[22]**.

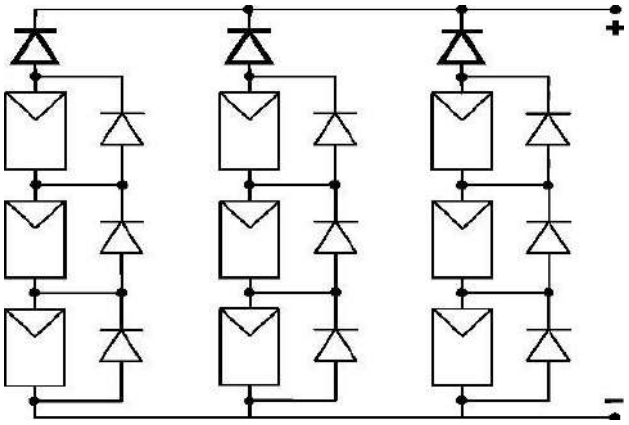


Figure (I.15) : Association série-parallèle, avec des diodes By-pass - Anti-retour.

I.8.Les systèmes photovoltaïque

Pour une production personnelle ou à plus grande échelle, dans un secteur raccordé au réseau électrique ou en site isolé, l'électricité photovoltaïque peut être une option intéressante. On distingue trois grands types d'applications susceptibles d'être alimentées par l'énergie solaire photovoltaïque.

I.8.1.Les systèmes autonomes

Les systèmes autonomes sont complètement indépendants d'autres sources d'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons, les chalets ou les camps dans les régions éloignées, lorsque l'accès à un endroit est difficile ou coûteux, ou lorsque les besoins en entretien doivent être réduits au minimum.

Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries d'accumulateurs pour stocker l'énergie donc c'est pour disposer d'électricité au cours de périodes sans lumière (la nuit notamment) **[23], [24]**.

La figure (***I.16***) montre un exemple d'un système de production d'énergie électrique autonome.



Figure (I.16) : Système photovoltaïque autonome **[24]**.

- Les modules (panneaux) photovoltaïques produisent un courant électrique continu.
- Le régulateur optimise la charge et la décharge de la batterie suivant sa capacité et assure sa protection
- L'onduleur transforme le courant continu en alternatif pour alimenter les récepteur ***AC***.
- Les batteries sont chargées de jour pour pouvoir alimenter la nuit ou les jours de mauvais temps.
- Des récepteurs ***DC*** spécifiques sont utilisables. Ces appareils sont particulièrement économes.

I.8.2.Les systèmes hybrides

Les systèmes hybrides reçoivent une partie de leur énergie d'une ou de plusieurs sources supplémentaires. En pratique, les modules de systèmes photovoltaïque sont souvent alliés à une éolienne ou à une génératrice à combustible. De tels systèmes ont habituellement des accumulateurs de stockage d'énergie. Afin de garantir un approvisionnement constant en électricit

Ils conviennent mieux lorsque la demande d'énergie est élevée (pendant l'hiver ou tout au long de l'année), lorsque l'énergie doit être fournie sur demande ou si votre budget est limité.

Un système hybride peut être relié au réseau, fonctionner en autonomie ou être soutenu par le réseau **[23]**. La figure (***I.17***) représente un exemple d'un système hybride PV + éolienne.



Figure (I.17) : Système hybride (photovoltaïque - éolienne).

I.8.3.Les systèmes PV raccordés au réseau

Il s'agit du système photovoltaïque le plus populaire pour les maisons et entreprises situées en zones développées. La connexion au réseau local d'électricité permet d'injecter et de revendre l'électricité produite. En cas d'ensoleillement insuffisant, l'électricité est importée du réseau. Un onduleur est utilisé pour transformer le courant continu produit par le système photovoltaïque en courant alternatif afin d'alimenter les équipements électriques standards.

Les systèmes raccordés au réseau permettent de réduire la consommation d'électricité provenant du service public. Le propriétaire d'une installation de production raccordée au réseau a le choix entre deux options :

- Soit vendre la totalité de sa production (option dite : « Vente de la totalité »). Cette option oblige à créer un point de raccordement au réseau indépendant du point de raccordement destiné à la consommation.

- Soit consommer sa production localement en fonction de son besoin et ne vendre que l'excédent (option dite « Vente de l'excédent »), le réseau vient faire l'appoint quand la production est insuffisante par rapport à la consommation **[23], [24]**.

La figure (***I.18***) montre un exemple d'une installation de production d'électricité raccordée au réseau pour la revente d'énergie

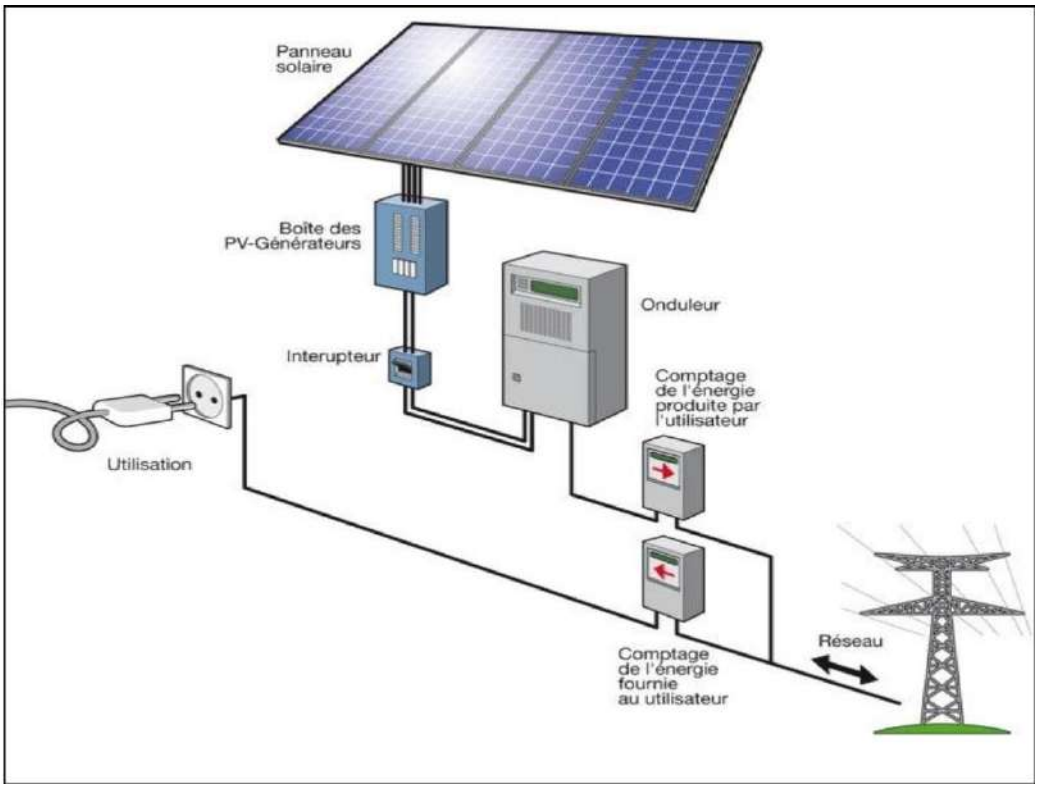


Figure (I.18): Installation de production électrique raccordée au réseau **[23]**.

I.9 Classification des Centrales photovoltaïques connectés au réseau:

Un premier classement en fonction de leur taille peut être fait de manière suivante:[25]

I.9.1. Centrales de petite taille (Pw = 1à10 KW)

Pour les applications sur les toits des maisons et des institutions publiques telles que les écoles, parkings ... elles se connectent au réseau à basse tension.

I.9.2. Centrales de taille moyenne (Pw = 10 à 100 KW)

Ce type de système peut être installés et intégrés dans un bâtiment sur un toit ou la façade. Il peut être connecté à la basse ou à la moyenne tension du réseau de distribution électrique selon sa taille.

I.9.3. Centrales de grande taille (Pw ≥ 500 KW)

Ce sont des systèmes centralisés et sont la propriété de compagnies d'électricité. On peut également classés ces systèmes selon qu'ils soient munis de batteries de stockage on no.

I.10.Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

I.10.1.Avantages [26]

- L'énergie photovoltaïque peut être installée partout, même en ville.
- L'énergie photovoltaïque est renouvelable et gratuit
- Sur les sites isolés, l'énergie photovoltaïque offre une solution pratique pour obtenir de l'électricité à moindre coût.
- La revente du surplus de production permet d'amortir les investissements voire de générer des revenus.
- Le contrat d'achat est conclu pour une durée de 25 ans.
- Les systèmes photovoltaïques sont fiables : aucune pièce employée n'est en mouvement.Les matériaux utilisés (silicium, verre, aluminium), résistent aux conditions météorologiques extrêmes.
- L'énergie photovoltaïque est totalement modulable et peut donc répondre à un large éventail de besoins. La taille des installations peut aussi être augmentée par la suite pour suivre les besoins de son propriétaire.
- Le coût de fonctionnement des panneaux photovoltaïques est très faible car leur entretien est très réduit, et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.

I.10.2.Inconvénients [26]

- Le coût d'investissement des panneaux photovoltaïques est élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique par des batteries est nécessaire, le coût du système photovoltaïque augmente.
- Les panneaux contiennent des produits toxiques et la filière de recyclage n'est pas encore existante.
- Le rendement électrique diminue avec le temps (20% de moins au bout de 20 ans).

I.11. Conclusion

Le monde de la conversion photovoltaïque connaît depuis quelques années une évolution profonde associé à l'intérêt croissant pour l'énergie photovoltaïque.

Ce chapitre s'est consacré à présenter les différents composants d'un système photovoltaïque.On a étudié le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule PV et ses paramètres. En suite on fait un rappel sur les systèmes PV et leurs performances .

Dans le chapitre prochain, on présentera les différents convertisseurs *DC-DC* (Boost, Buck et Buck- Boost) et leurs principes de fonctionnement, la commande *MPPT* pour chercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque maximale puis les convertisseurs *DC-AC* (onduleur) et leurs commandes pour leur raccordement au réseau.

1.1 Introduction

Depuis la fin du XIXe siècle, ils ont inventé en électrotechnique, des machines utilisant les propriétés du magnétisme, et plus particulièrement du ferromagnétisme pour réaliser les diverses conversions possibles des formes d'énergie électriques.

Avec le développement de l'automatique, de l'électronique et de l'informatique, on peut remplacer les « machines » par des **convertisseurs statiques** utilisant des composants électroniques en commutation. Les avantages de ces convertisseurs sont nombreux :

- ✓ contrôle et même régulation électronique possible du transfert de puissance.
- ✓ système moins lourd et moins encombrant.
- ✓ excellent rendement.
- ✓ facilité de mise en œuvre grâce à l'automatisation.
- ✓ protections de plus en plus efficaces.
- ✓ coût relatif en baisse, grâce aux progrès dans la fabrication et le montage des composants [27].

Dans ce chapitre, nous allons rappeler les différents types des convertisseurs d'électronique de puissance les plus utilisés dans les systèmes photovoltaïque à savoir : les convertisseurs ***DC/DC*** (hacheur), les convertisseurs continue/alternatif ***DC/AC***, (onduleur). aussi, la commande MPPT en donnant la méthode de perturbation et observation, la commande MLI.

II.2 Les convertisseurs électriques :

Les convertisseurs sont des appareils servent à transformer la tension électrique pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant en une tension continue différente ou une tension alternative.

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

La tension fournie par les panneaux photovoltaïques est une tension de type continu pour l'adapter à nous besoin il y a deux sortes de convertisseur (les hacheurs *DC-DC*, les onduleurs *DC-AC*). [28]

II.3 Les convertisseurs DC/DC :

II.3.1 Définition :

Le convertisseur *DC/DC* permet de relier le champ *PV* à un bus continu , auquel les diverses machines énergétiques du système sont reliées : la charge (l'utilisateur final), les autres sources d'énergie (pile à combustible, batteries, autres sources renouvelables) ou les périphériques. Il permet en outre de lisser les fluctuations de la tension des composants au niveau du bus commun. Un hacheur peut être réalisé à l'aide d'interrupteur électronique commandable à l'ouverture et à la fermeture tels que les thyristors *GTO* ou les transistors bipolaires ou à effet de champ à grille isolée fonctionnant en régime de commutation. Le principe d'un hacheur consiste à établir puis interrompre périodiquement la liaison source- charge à l'aide de l'interrupteur électronique. Celui-ci doit pouvoir être fermé ou ouvert à volonté afin d'avoir une tension de sortie continue réglable [29].

II.3.2 Types des hacheurs :

Les convertisseurs *DC-DC* (ou hacheurs) sont utilisés dans les systèmes d'énergie solaire pour adapter la source continue à amplitude variable (panneau *PV*) à la charge qui demande en général une tension DC constante. Les trois configurations de base sont :

- Convertisseur survolteur hacheur survolteur (ou parallèle).
- Convertisseur dévolteur (ou série).
- Convertisseur dévolteur- survolteur hacheur série - parallèle. [29]

II.3.3 Hacheur survolteur (boost) :

Le convertisseur boost est connu par le nom d'élévateur de tension peut être représenté Par le circuit de la *figure (II.1*). 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 K1 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). [30]

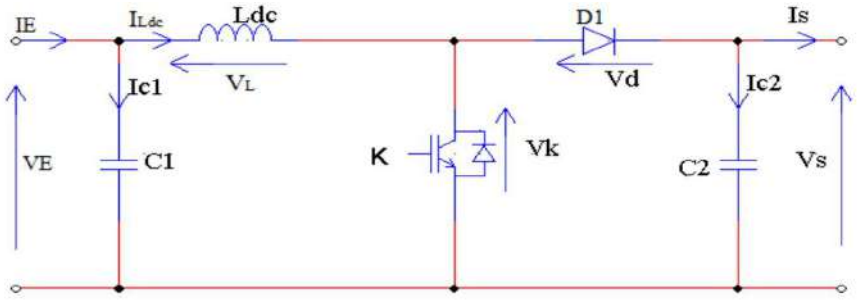


Figure (II.1): schéma électrique d'un hacheur boost

II.3.3.1 L'étude et principe de fonctionnement

Ce convertisseur Boost fonctionne comme suit : lorsque l'interrupteur K est fermé,l'inductance se charge et le courant i (t), provenant du module solaire, augmente progressivement et ce durant t ϵ [0, DTs]. Quand K s'ouvre, la rupture du courant provoque une surtension d'où l'utilité de la diode qui protège K en empêchant le retour du courant. Le condensateur sert à lisser la tension de sortie. L'inductance L libère une énergie qui s'ajoute à celle de la source pour alimenter la charge via la diode D1 durant t ϵ [DTs, Ts]. Ou on peut écrire la relation entre la tension de sortie et celle d'entrée en fonction de ce rapport cyclique.[31]

$$V_S = \frac{V_E}{(1-D)} \qquad (\text{II.1})$$

On constate que la tension de sortie du convertisseur ne dépend que de la tension d'entrée et du rapport cyclique D. Celui-ci étant toujours compris entre 0 et 1, le convertisseur est toujours élévateur de tension. Durant l'état passant, l'interrupteur K est fermé pour t ϵ [0, DT]. La tension aux bornes de la diode D est égale à $V_D = V_K - V_S$. Comme l'interrupteur K est fermé, on a $V_K = 0$, ce qui implique $V_K = -V_S$. La diode est donc bloquée puisque $V_S > 0$. Dans ces conditions, on obtient alors le schéma équivalent de la *figure (II.1.a)* : [31]

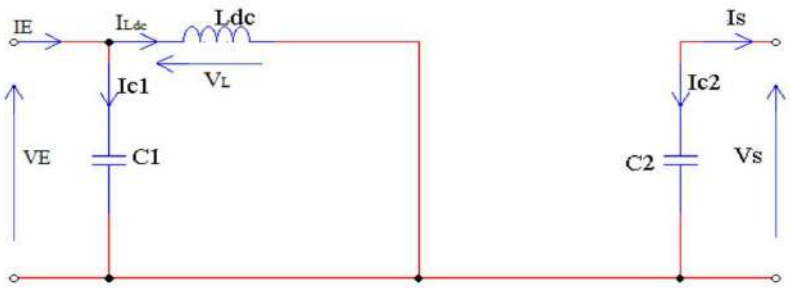


Figure (II.1.a) : Schéma équivalent d'un convertisseur Boost

La tension aux bornes de l'inductance et les relations des courants dans les condensateurs sont alors [32] :

$$V_L(t) = Ld_c\frac{dIL_{dc}}{dt} = V_E(t) \qquad (II.2)$$

$$I_{C1}(t) = C_1\frac{dV_E(t)}{dt} = I_E(t) - I_L(t) \qquad (II.3)$$

$$I_{C2}(t) = C_2\frac{dV_S(t)}{dt} = -I_S(t) \qquad (II.4)$$

Durant l'état bloqué, l'interrupteur K est ouvert pour t ϵ [DT, T]. La diode D1 devient conductrice et on obtient alors le schéma équivalent de la *figure (II.1.b)* :

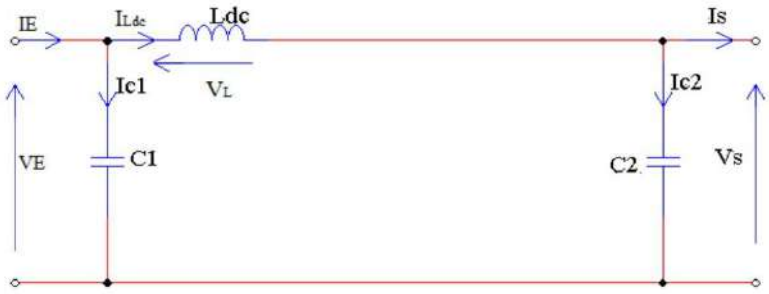


Figure (II.1.b): Schéma équivalent d'un convertisseur Boost

La tension aux bornes de l'inductance et les relations des courants dans les condensateurs sont alors [32] :

$$V_L(t) = L_{dc}d_c\frac{dIL_{dc}}{dt} = V_E(t) - V_S(t) \qquad (II.5)$$

$$I_{C1}(t) = C_1\frac{dV_E(t)}{dt} = I_E(t) - I_L(t) \qquad (II.6)$$

$$I_{C2}(t) = C_2\frac{dV_S(t)}{dt} = I_L(t) - I_S(t) \qquad (II.7)$$

II.3.3.2 Avantage de convertisseur boost :

Malgré le rendement élevé du convertisseur buck dans les systèmes avec des sources de puissance conventionnelles, le convertisseur boost peut être plus approprié aux systèmes photovoltaïques photovoltaïques avec le suiveur du point de puissance maximale (*MPPT*) puisque le convertisseur fonctionne au mode de courant continu

extrayant autant de puissance que possible à partir cellules solaires. Par conséquent le rendement énergétique du convertisseur boost peut être plus grand que le convertisseur buck. Le convertisseur boost est généralement employé pour obtenir une tension plus élevée de sortie, tandis que le convertisseur buck est employé pour abaisser la tension de sortie [30].

II.3.4 Hacheur dévolteur (Buck) :

Le convertisseur buck est connu par le nom abaisseur de tension peut être représenté Par le circuit de la figure (II.2). Un convertisseur Buck, ou hacheur série, est un appareil qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur. C'est un convertisseur direct *DC-DC*. 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.2)* 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) [28].

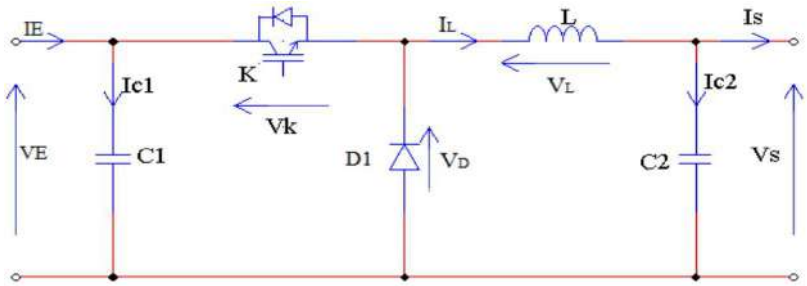


Figure (II.2) : Schéma équivalent d'un convertisseur Buck

II.3.4.1 L'étude et principe de fonctionnement :

L'interrupteur K1 est fermé pendant la fraction *T* de la période de découpage *T*. La source d'entrée fournit l'énergie à la charge *R* au travers de l'inductance Lors du blocage du transistor, la diode K2 assure la continuité du courant dans l'inductance. L'énergie emmagasinée dans cette inductance est alors déchargée dans le condensateur et la résistance de charge. En régime permanent, la Valeur moyenne de la tension aux bornes de l'inductance est nulle. La tension de sortie est donnée par la relation suivante :

$$V_s = D \times V_E \qquad (\text{II.8})$$

On constate que la tension de sortie du convertisseur ne dépend que de la tension d'entrée et du rapport cyclique D. Celui-ci étant toujours compris entre 0 et 1, le convertisseur est

toujours abaisseur de tension. Cette étude se base sur la représentation des circuits équivalents des deux phases décrites dans le principe de fonctionnement et de tirer par la suite les relations mathématiques reliant la tension de sortie et celle d'entrée. La *figure (II.2.a)* montre le schéma du circuit équivalent d'un convertisseur dévolteur avec l'interrupteur K fermé pendant t ϵ [0, DT]. [30] [31]

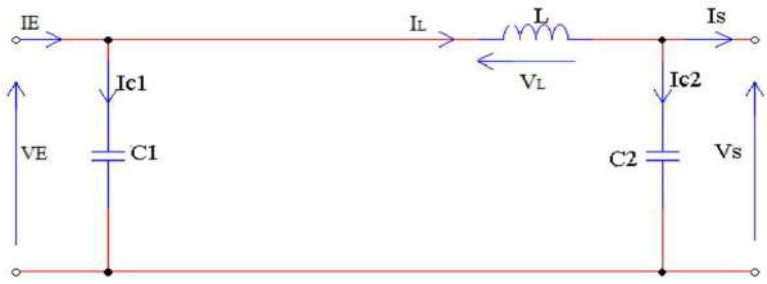


Figure (II.2.a) : Schéma équivalent d'un convertisseur Buck (K fermé et D1 bloquée)

La tension aux bornes de l'inductance et les courants dans les condensateurs sont les suivants, en appliquant la loi de Kirchhoff sur le circuit de la *figure (II.1.a)* :

$$V_L(t) = L\frac{dI_L(t)}{dt} = V_E(t) - V_S(t) \qquad (\text{II.9})$$

$$I_{C1}(t) = C_1\frac{dV_E(t)}{dt} = I_E(t) - I_L(t) \qquad (\text{II.10})$$

$$I_{C2}(t) = C_2\frac{dV_S(t)}{dt} = I_L(t) - I_S(t) \qquad (\text{II.11})$$

La *figure (II.2.b)* montre le schéma du circuit équivalent d'un convertisseur dévolteur avec l'interrupteur K ouvert pendant t ϵ [DT, T], [30] [31].

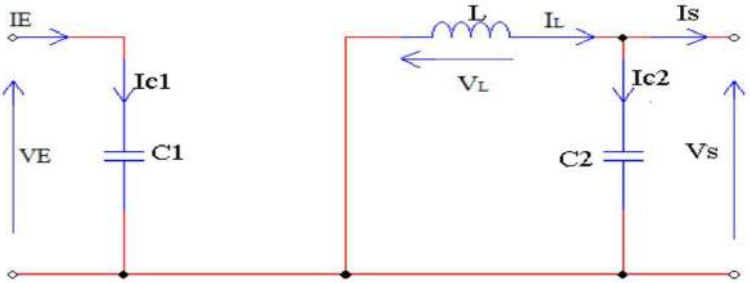


Figure (II.2.b) : Schéma équivalent d'un convertisseur Buck (K ouvert et D1 fermée)

La tension aux bornes de l'inductance et les courants dans les condensateurs sont les suivants, en en appliquant la loi de Kirchhoff sur le circuit de la *figure (II.2.b)* :

$$V_L(t) = L\frac{dI_L(t)}{dt} = -V_S(t) \qquad (II.12)$$

$$I_{C1}(t) = C_1\frac{dV_E(t)}{dt} = I_E(t) \qquad (II.13)$$

$$I_{C2}(t) = L\frac{dI_L(t)}{dt} = I_L(t) - I_E(t) \qquad (II.14)$$

II.3.5 Hacheur dévolteur-survolteur (buck-boost) :

Le convertisseur Buck-Boost, appelé aussi dévolteur-survolteur, représenté sur la *figure (II.3)*l'hacheur Buck-boost est un convertisseur indirect *DC-DC* à stockage inductif. La source d'entrée est de type tension continue (filtrage capacitif en parallèle avec une source de tension) et la charge de sortie continue de type source de tension (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) [28].

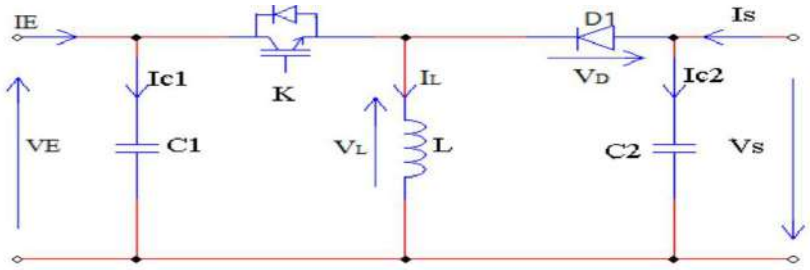


Figure (II.3) : Schéma électrique d'un convertisseur Buck-Boost

II.3.5.1 L'étude et principe de fonctionnement :

Cette structure de convertisseur permet d'obtenir des tensions négatives à partir de tension positive. Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée DT, le courant augmente linéairement. La tension est égale à V_e. À l'ouverture de K, la diode prend le relais et la tension V_L est égale à V_s. Par définition la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle. Il en résulte que,[28] [33]

$$\frac{V_S}{V_E} = \frac{1}{(1-D)} \qquad (II.15)$$

Quand le rapport D>0.5 cyclique l'hacheur Buck-boost fonction comme un hacheur boost et si D<0.5 le rapport cyclique l'hacheur Buck-boost fonction comme un hacheur Buck. La commande de fermeture et ouverture de l'interrupteur K est réalisée par un signal de fréquence de découpage *f*. Pendant le temps de 0 à DT (*D* est le rapport cyclique), l'interrupteur K est fermé, l'inductance *L* emmagasine de l'énergie et le condensateur *C*2 restitue son énergie au récepteur. La diode *D*1 est bloquée. La *figure (II.3.a)* a montré le schéma du circuit équivalent d'un convertisseur Buck-Boost avec l'interrupteur K fermé pendant t ϵ [0, DT]. [28] [33]

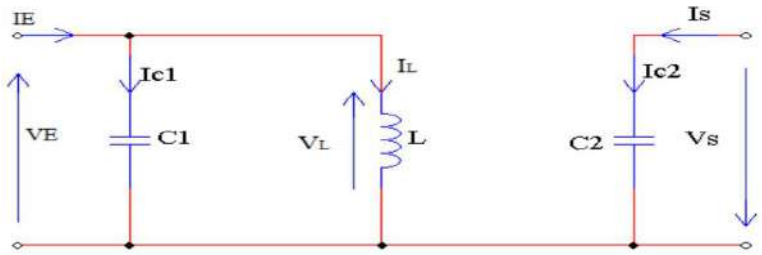


Figure (II.3.a) : Schéma équivalent d'un convertisseur Buck-Boost (K fermé et D1 bloquée)

La tension aux bornes de l'inductance et les courants dans les condensateurs sont les suivants, en appliquant la loi de Kirchhoff sur le circuit de la *figure (II.3.a)* [34] :

$$V_L(t) = L\frac{dI_L(t)}{dt} = V_E(t) \qquad (II.16)$$

$$I_{C1}(t) = C_1\frac{dV_E(t)}{dt} = I_E(t) - I_L(t) \qquad (II.17)$$

$$I_{C2}(t) = C_2\frac{dV_S(t)}{dt} = -I_S(t) \qquad (II.18)$$

Tandis que, pendant la période le temps de DT à T (*D* est le rapport cyclique), l'interrupteur K est ouvert et l'inductance *L* restitue l'énergie emmagasinée, la diode est passante, le courant I_L diminue donc la tension V_L devient négative et par conséquence V_S . La *figure (II.3.b)* montre le schéma du circuit équivalent d'un convertisseur Buck-Boost avec l'interrupteur K ouvert pendant t ϵ [DT, T]. [28] [31]

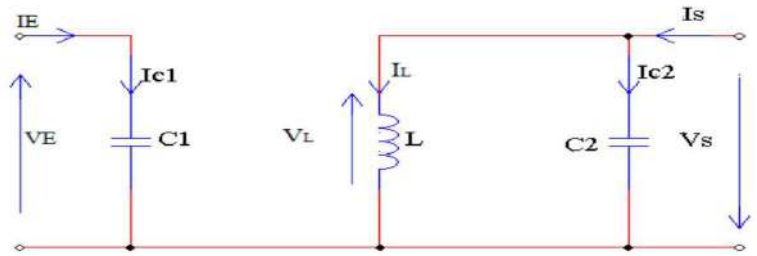


Figure (II.3.b) : Schéma équivalent d'un convertisseur Buck-Boost (K ouvert et D1 passante)

La tension aux bornes de l'inductance et les courants dans les condensateurs sont les suivants, en appliquant la loi de Kirchhoff sur le circuit de la *figure (II.3.b)* :

$$V_L(t) = L\frac{dI_L(t)}{dt} = V_S(t) \qquad (II.19)$$

$$I_{C1}(t) = C_1\frac{dV_E(t)}{dt} = I_E(t) \qquad (II.20)$$

$$I_{C2}(t) = C_2\frac{dV_S(t)}{dt} = I_L(t) - I_S(t) \qquad (II.21)$$

II.4 La commande MPPT :

II.4.1 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, quelque soient les conditions météorologiques(température et irradiation),et quelle que soit la tension de la batterie, la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum [29].

II.4.2 Le principe de fonctionnement de MPPT d'un générateur PV :

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 (une batterie par exemple) et le panneau photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge chaque instant.

La *figure (II.4)* représente la trajectoire du point de puissance maximale produite par le générateur. [30].

Le principe de cette commande est d'effectuer une recherche du point de puissance maximal (*PPM*), en agissant sur le rapport cyclique *D* du convertisseur *DC-DC*, tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur *PV* et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance délivrée par ce générateur *PV*.

La puissance extraite du module est calculée à partir des mesures de courant I_{PV}et de tension V_{PV} du panneau et la multiplication de ces deux grandeurs.

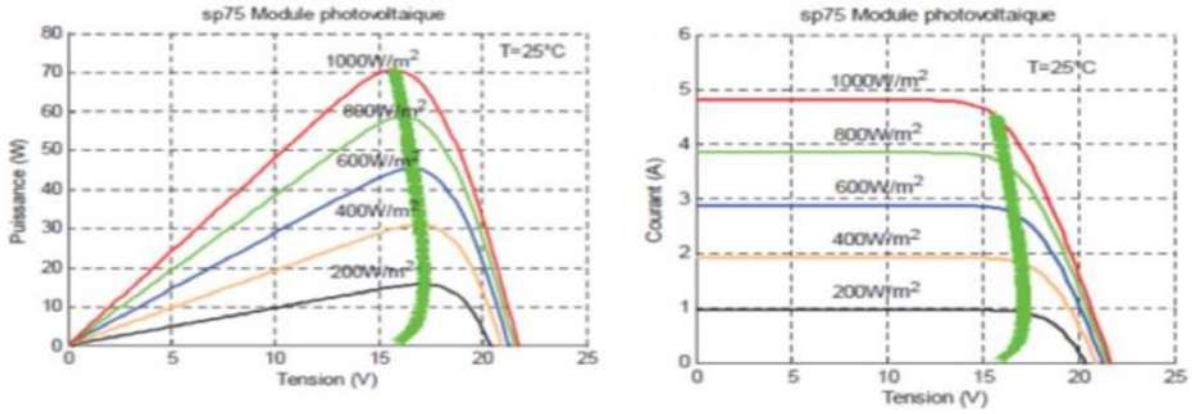


Figure (II.4) : La caractéristique I-V, P-V et la trajectoire de PPM[30].

La *figure (II.5)* présente le schéma de principe d'un module photovoltaïque doté d'un étage d'adaptation *DC-DC* entre le *GPV* et la charge de sortie. Cette structure correspond à un système plus communément appelé système autonome. Il permet le plus souvent d'alimenter une batterie servant de stocke l'énergie pour une charge qui ne supporte pas les fluctuations de tension. Cet étage d'adaptation dispose d'une commande *MPPT* (Maximum Power Point Tracking) qui lui permet de rechercher le *PPM* que peut fournir un panneau solaire photovoltaïque. L'algorithme de recherche *MPPT* peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'implantation choisi et des performances recherchées. Cependant au final, tous les algorithmes performants doivent jouer sur la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associate [30].

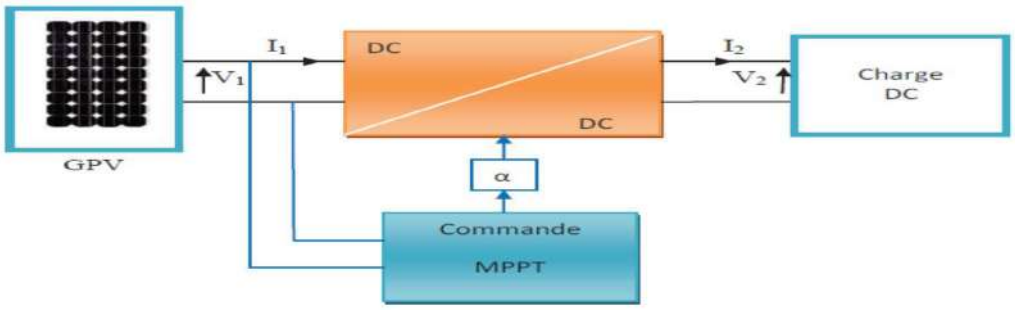


Figure (II.5) : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque [30].

Pour assurer le fonctionnement d'un *GPV* a son point de puissance maximale *(PPM)*, des contrôleurs *MPPT* sont utilisés, ces contrôleurs sont destinés à minimiser l'erreur entre la Puissance de fonctionnement et puissance maximale de référence variable en fonction des conditions climatiques baser sur des méthodes optimales. [30].

II.4.3. Les différentes techniques de MPPT :

Afin d'extraire Le maximum de puissance d'un panneau solaire, on peut raisonner sur plusieurs et différentes méthodes, Certains des concepts sont très robustes et simples, tandis que d'autres approches exigent des dispositifs de logique très sophistiqués tels que des micro- processeurs combinés avec des circuits de puissance, de convertisseurs de commutation… Divers travaux sur des commandes assurant un fonctionnement de type *MPPT* apparaissent régulièrement depuis1968, date de publication de la première loi de commande de ce type adaptée à une source d'énergie renouvelable de type *PV*. En littérature on trouve fréquemment les techniques de maximisation de puissance suivantes [29] :

-Perturbation et observation. (*P&O*).
-La méthode incrémentation de la conductance.
-Méthode de capacité parasite.

Chacune de ces techniques à ces propres avantages et inconvénients du point de vue simplicité, efficacité et robustesse. Dans notre travail, on se limite à la méthode de Perturbation et observation (*P&O*), qui est très simple à implanter, et de bon rendement. [29]

II.4.4. La commande P&O :

II.4.4.1. Définition :

La méthode perturbation et observation « *P&O* », est la plus répandue dans le milieu industriel, car son algorithme est facile à implémenter. Ce processus fonctionne par une perturbation du système en augmentant ou en diminuant la tension de fonctionnement du module et observer son effet sur la puissance de sortie de la rangée. [32].

II.4.4.2 Le fonctionnement de l'algorithme P&O :

L'algorithme « *P&O* » est très utilisé dans la recherche du *MPPT* car il est plus simple et exige moins de paramètres à mesurer. Son fonctionnement est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution (incrémentation ou décrémentation) du courant/tension ou en agissant directement sur le convertisseur (*DC-DC*), et l'observation de l'impact de cette perturbation sur la puissance de sortie du module photovoltaïque, *figure (II.6)* [33].

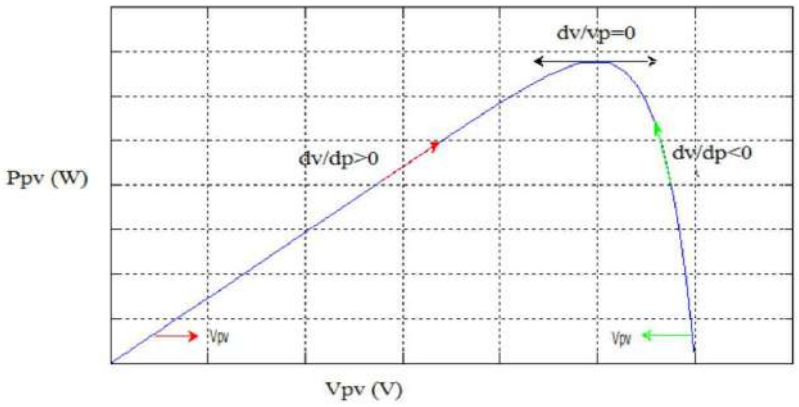


Figure (II.6) : Caractéristiques de fonctionnement de l'Algorithme P&O.[33]

Cette courbe montre que c'est la puissance augmente la perturbation va continuer dans le même sens sinon la perturbation sera inversée : [33]

$d_P > 0$ perturbation dans le même sens.

$d_P < 0$ perturbation dans le sens inverse.

La *figure (II.7*) montre l'organigramme de l'algorithme de la méthode *'P&O'*, tel qu'il doit être implémenté dans le microprocesseur de contrôle. D'après la *figure (II.7),* la tension et le courant *V* et *I*, sont mesurés pour calculer la puissance de sortie courante P (k) de la rangée. Cette valeur P (k) est comparée à la valeur P (k-1) de la dernière mesure. Si la puissance de sortie a augmenté, la perturbation continuera dans la même direction.

Si la puissance a diminué depuis la dernière mesure, la perturbation de la tension de sortie sera renversée en direction opposée du dernier cycle. Avec cet algorithme, la tension de fonctionnement V est perturbée à chaque cycle du *MPPT*. Dès que le *MPP* sera atteint, V oscillera autour de la tension idéale V_{MP} de fonctionnement.

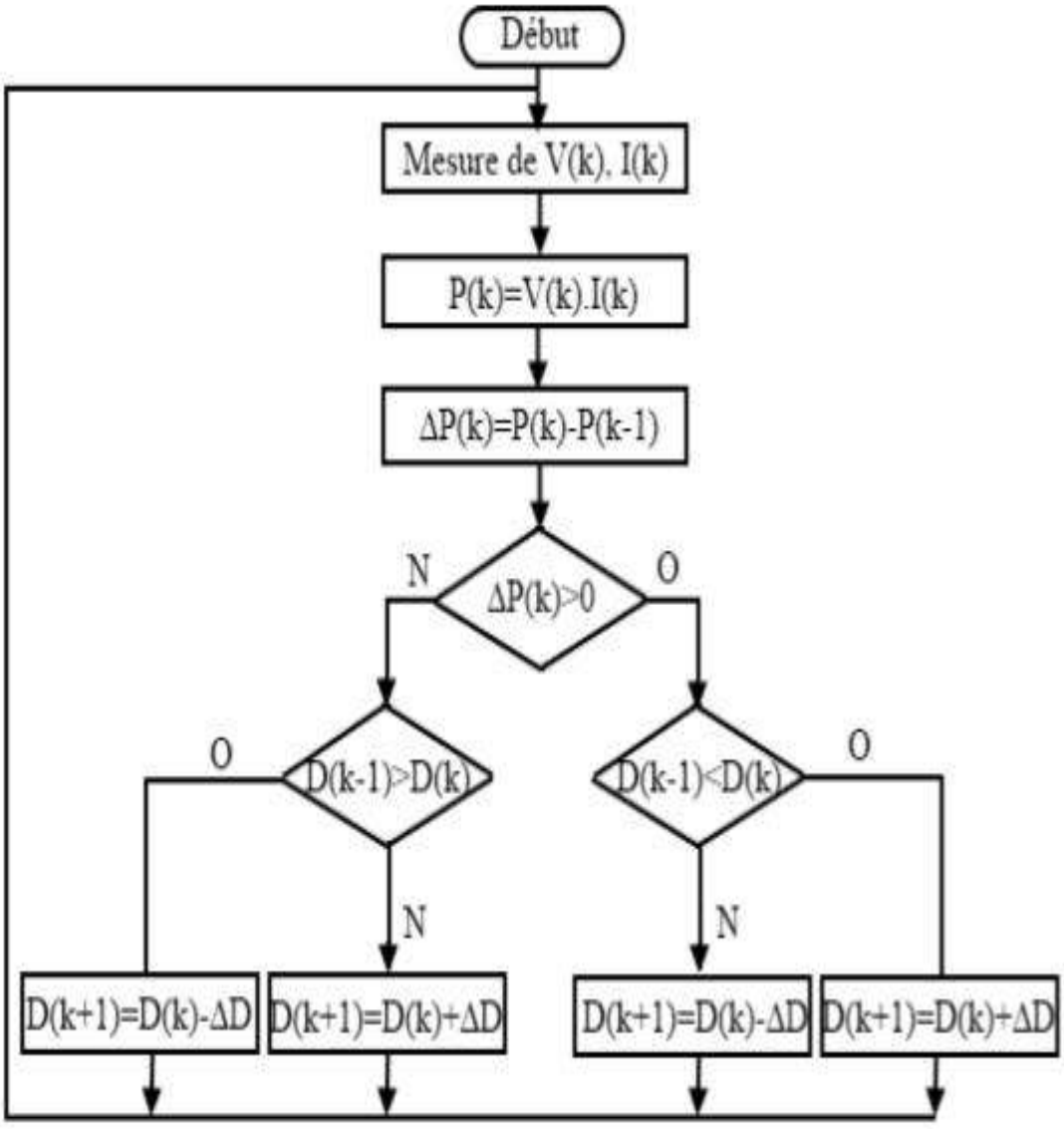


Figure (II.7) : Organigramme de l'algorithme MPPT de la perturbation & observation [32]

II.5. Les convertisseur DC/AC :

II.5.1. Définition :

Un onduleur C'est un dispositif destiné à convertir le courant continu généré par le générateur *PV* en courant alternatif. Il utilise des transistors de puissance ou des thyristors. L'onde de sortie présente, dans le plus simple des cas, une forme carrée qui peut s'adapter à quelques types de charges, des pertes à vide considérables surtout pour des faibles puissances. La plupart des onduleurs sont des structures en pont constituées le plus souvent d'interrupteurs électroniques comme des *IGBT* (Insulated Gate Bipolar Transistor) Le choix de ce type de composant relève, d'une part de sa particularité à pouvoir commuter de très grandes valeurs de courant et tension à des fréquences de découpage de plusieurs dizaines de kHz et d'autre part, parce qu'il permet la suppression de tous les circuits d'aide à la commutation des montages à thyristors. [29].

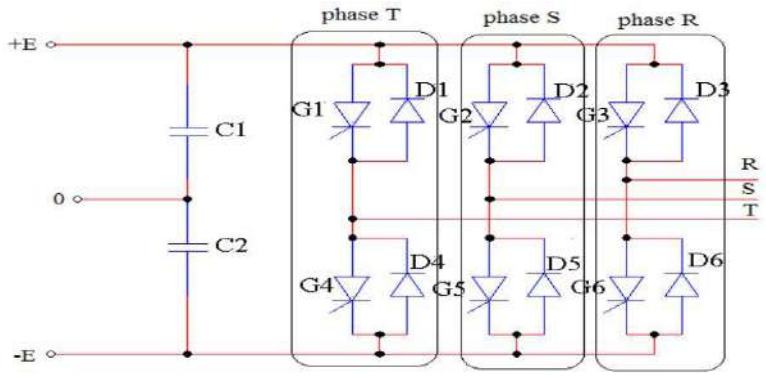


Figure (II.8) : Schéma d'un onduleur à deux niveaux

Grace à un jeu de commutation approprié, réalisé souvent par *MLI*, l'énergie électrique continue est modulée afin d'obtenir un signal alternatif à la fréquence du réseau. Un exemple d'un onduleur à deux niveaux est donné par la *figure (II.9)*. Installation d'un onduleur couple au réseau électrique se fait avec l'accord de l'organisme de distributeur de d'énergie électrique. Pour des raisons de sécurité, un onduleur couplé au réseau doit constamment surveiller ces perturbations et interrompre immédiatement l'injection en cas de défaillance ou de coupure. Ceci est absolument nécessaire pour permettre une intervention sans danger sur le réseau [29].

II.5.2 Les Type de l'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 [34].

* Onduleur Monophasé.
* Onduleur Triphasé.

II.5.2.1 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) *figure (II.10).* [34].

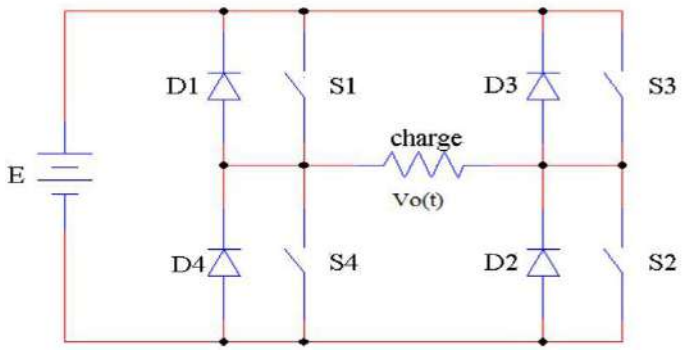


Figure (II.9) : Schéma fonctionnel d'un onduleur monophasé en pont H

II.5.2.2 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. [34].

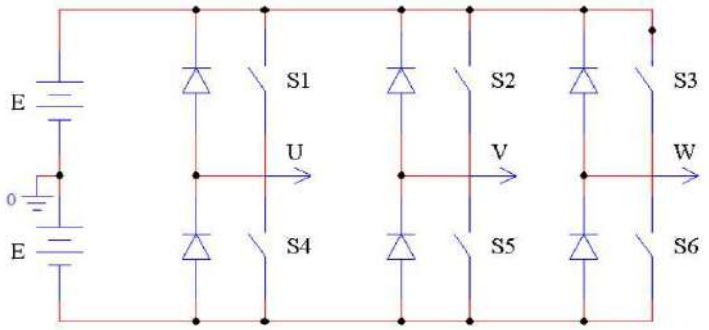


Figure (II.10) : Schéma de Principe d'un Onduleur Triphasé En Pont

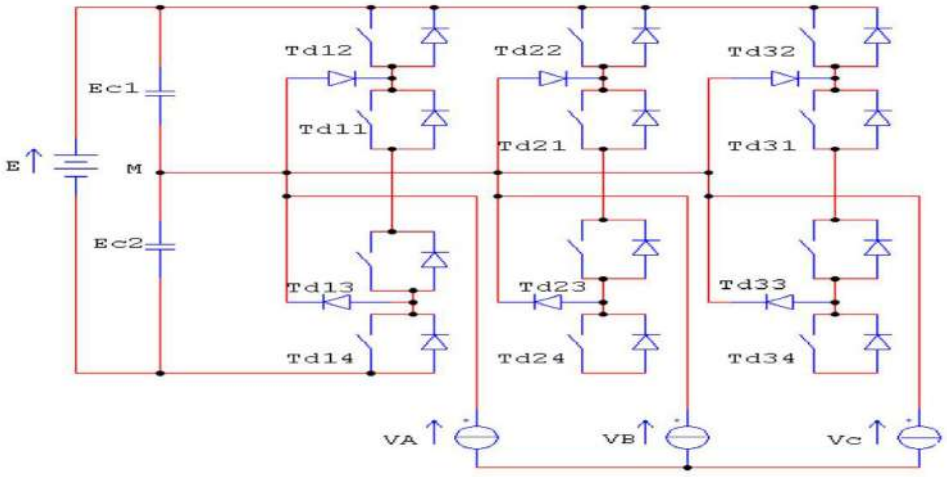
La *figure (II.11)* illustre la topologie d'un onduleur triphasé à six interrupteurs de puissance. Le décalage entre les signaux de commande est de 60°, [35].

II.5.3.Modèle de l'onduleur a trois niveaux :

La figure (II.10) montre la structure d'un onduleur de tension triphasé à trois niveaux à structure NPC. On commence par définir la fonction de connexion F_{ki} de l'interrupteur. Elle vaut 1 si l'interrupteur est fermé et 0 dans le cas contraire. en mode command able, les fonctions de connexion de l'onduleur sont liées par la relation :

$$\begin{cases} F_{K1} = 1 - F_{K4} \\ F_{K2} = 1 - F_{K3} \end{cases}$$

avec K=1,2ou3 représente le numéro de bras.



Figure(II.11) : La structure d'un onduleur de tension triphasé à trois niveaux à structure NPC.

On définit la fonction de connexion F_{km}^{b} du demi-bras comme suit :

$$\begin{cases} F_{K1}^{b} = F_{K1} \times F_{K2} \\ F_{K0}^{b} = F_{K3} \times F_{K4} \end{cases}$$

On désigne par: m1 = le demi-bras du haut et m0 = le demi-bras du bas. Les potentiels des nœuds A, B et C de l'onduleur triphasé à trois niveaux, par rapport au point M

s'expriment comme suit:

$$\begin{cases} V_{AM} = F_{11}^{b} \times U_{c1} - F_{10}^{b} \times U_{c2} \\ V_{BM} = F_{21}^{b} \times U_{c1} - F_{20}^{b} \times U_{c2} \\ V_{CM} = F_{31}^{b} \times U_{c1} - F_{30}^{b} \times U_{c2} \end{cases}$$

II.5.4.La commande de l'onduleur :

Le but de la commande de l'onduleur est de permettre la production d'une tension ou un courant alternatif, à travers les ordres de commande appliqués aux drivers interrupteurs de puissance

II.5.4.1.Principe de génération de la PWM :

L'onduleur délivre plusieurs créneaux positifs et négatifs, ce qui permet de diminuer l'importance du filtre et d'avoir un régulateur de tension plus rapide, en modulant les temps relatifs de conduction et de blocage, il est possible de répartir la tension au cours de la période de façon à ce que pratiquement le temps de conduction d'un interrupteur soit proportionnel à la valeur instantanée du fondamental. C'est ce principe qui est appelé modulation de largeur d'impulsion et qui est noté MLI (PWM en anglais).

II.6. Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre les différents types des convertisseurs *DC/DC* et *DC/AC* reliant les générateurs *PV* avec les charges. Les premiers convertisseurs on a étudier les différents types des hacheurs utilise dans les systèmes photovoltaïques, aussi la commande *MPPT* qui pilot le convertisseur pour fournie le *GPV* la puissance maximale. Pour les seconds convertisseurs, on a donné les différents types des onduleurs utilisés dans les systèmes *PV* et la stratégie de commande pour le raccordement aux réseaux électriques.

La modélisation et simulation du système (générateur photovoltaïque, onduleur) qu'on va présenter dans le chapitre suivant.

III.1 Introduction :

Devant les contraintes environnementales exigées d'une part et l'épuisement des ressources traditionnelles utilisées pour la production de l'électricité d'autre part, la tendance actuelle est orientée vers l'exploitation des énergies renouvelables.

Les installations photovoltaïques peuvent produire et injecter une énergie dans le réseau électrique. Cette injection dans le réseau électrique se traduit par une diminution de la demande sur les centrales traditionnelles de production d'électricité, et donc par une réserve des ressources qui pourront être misent à profil pendant la nuit ou lors de période de faible insolation.

Dans ce chapitre nous avons simulé sous l'environnement MATLAB /SIMULINK tous les parités représentant le système photovoltaïque connecté au réseau électrique tel que le générateur PV, le hacheur boist , l'onduleur à trois niveaux et la charge.

La commande *MPPT* du convertisseur *DC-DC* est utilisée dans le but d'extraire le maximum de puissance des panneaux photovoltaïques et une commande du convertisseur *DC-AC* est développée afin d'injecter que la puissance active dans le réseau électrique.

III.2 L'outil Matlab :

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 [34] :

1. Une vaste gamme de bibliothèques de fonctions spécialisées (Tools boxes) Simulink, un environnement puissant de modélisation basée sur les schémas-blocs et de simulation des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires.
2. Des bibliothèques de blocs Simulions spécialisés (Block sets).
3. D'autres modules dont un Compilateur, un générateur de code C, un accélérateur.
4. 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 [34].

III.3. Système photovoltaïque proposé

Le système photovoltaïque proposé, permet de fournir une puissance vers le réseau électrique à partir des panneaux solaires. Différentes structures de conversion électrique pour l'interfaçage avec le réseau sont possibles. La structure choisie est composée d'un convertisseur Boost associé à un onduleur triphasé à trois niveaux (*IGBT/Diode*). Ce système utilise deux différents types de commande, la première commande pour le convertisseur *DC/DC* qui sert à fournir un maximum de puissance à partir du panneau et la deuxième pour le convertisseur *DC/AC* qui est développée pour déterminer une tension de sortie bien adaptée et en avance sur la tension du réseau et surtout d'avoir un courant déphasé de 180° de cette dernière pour permettre le transfert de la puissance active.

III.3.1. Caractéristique du module photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque choisi pour la modélisation puis la simulation contient 10 panneaux de 54 cellules photovoltaïques raccordées en série, et fourni une puissance maximale de 200W.

Les caractéristiques physiques et électriques du générateur photovoltaïque sont données dans le tableau suivants

Tableau (III.1) : Caractéristiques physiques et électriques du module photovoltaïque poly ELYSUN dans les condition standards

Caractéristiques physiques	G = 1000W/m^2 et T = 25°C
Nombre de cellule en série N_s	54
Nombre de cellules en parallèle N_p	1
Caractéristiques électriques	G = 1000W/m^2et T = 25°C
Puissance maximale [W]	200W
Tension optimal (V_m)	26.4V
Courant optimal (I_m)	7.58A
Tension de circuit ouvert (V_{oc})	32.9V
Courant de court-circuit (I_{cc})	8.21A

III.4. Le générateur photovoltaïque : (GPV)

III.4.1 Modélisation :

- **Cellule photovoltaïque idéal**

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant IPh proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode qui correspond à l'aire de transition p-n de la cellule PV. Après la loi de nœuds **:**[36]

$$I = I_{ph} - I_d \qquad (III.1)$$

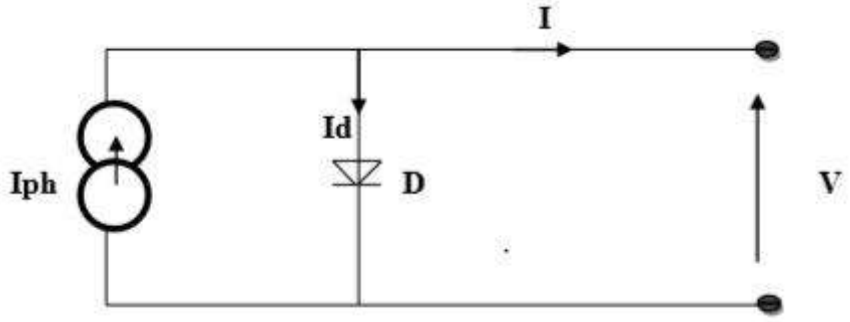


Figure (III.1) : Modèle de cellule photovoltaïque idéal.

Pour un générateur PV idéel, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode : $V = V_d$ (III.2)

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par la relation :

$$I_d = I_0 \left(\exp\left(\frac{V_d}{V_t}\right) - 1\right) \qquad (III.3)$$

Avec : I_0 : Le courant de saturation inverse de la diode.

V_d : La tension à la borne de diode. V_t : KT/q potentielle thermique.

Donc :

La relation (II.1) sera :

$$I = I_{ph} - I_0\left(\exp\left(\frac{V_d}{V_t}\right) - 1\right) \qquad (III.4)$$

- **Cellule photovoltaïque réel**

Le model photovoltaïque précédent ne rendait pas compte de tous les phénomènes présents lors de la conversion d'énergie lumineuse. En effet, dans le cas réel, on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuite, on modélise donc cette perte

de tension par une résistance en série R_S et les courants de fuite par une résistance en parallèl R_P.

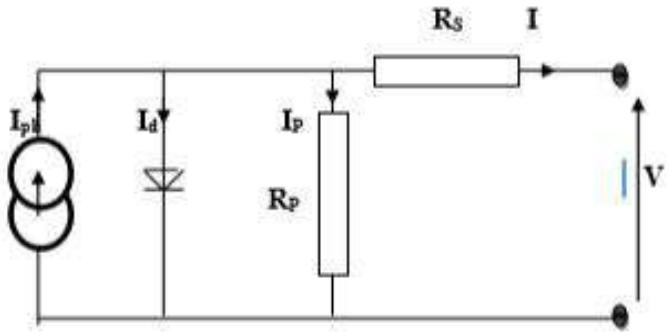


Figure (III.2): Modèle de la cellule photovoltaïque réel.

Donc ona :

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \qquad \text{(III.5)}$$

$$I_p = \left(\frac{V+R_S.I}{R_p}\right) \qquad \text{(III.6)}$$

$$I_d = I_0.\left(\exp\left(\frac{V+R_S.I}{V_t}\right) - 1\right) \qquad \text{(III.7)}$$

Avec :

- I : Le courant fourni par la cellule
- $I_{ph} = I_{sc}\left(\frac{G}{1000}\right)$: Le photo-courant dépendant de l'éclairement (G).
- I_0 : Le courant de saturation de la diode.
- k : constante de Boltzmann (1,381 .10-23 joule/Kelvin).
- q : charge d'électron =1,602 .10-19 C.
- n : Le facteur de qualité de diode.
- T : La température de cellule en kelvin.

Donc (II.5) sera :

$$I = I_{ph} - I_0.\left(\exp\left(\frac{V+R_S.I}{V_t}\right) - 1\right) - \left(\frac{V+R_S.I}{R_p}\right) \qquad \text{(III.8)}$$

III.4.2. Simulation du générateur (GPV) à éclairement et température constante

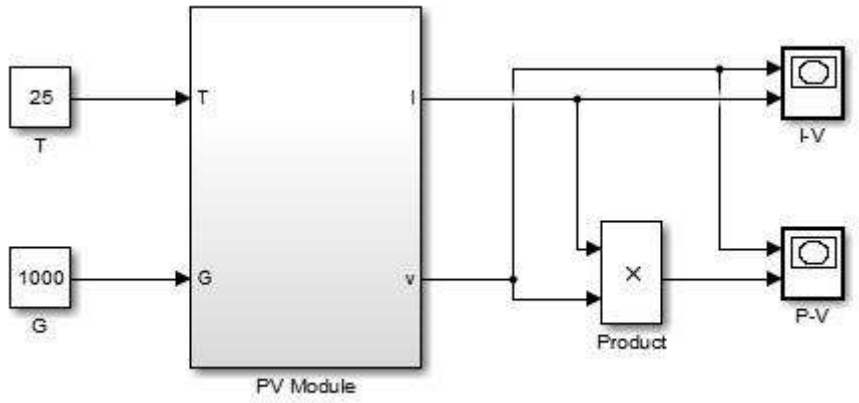


Figure (III.3): Schéma du Module PV poly ELYSUN sous Matlab/ Simulink

La caractéristique $I_{PV} = f(V_{PV})$ après simulation à température et éclairement constants, particulièrement aux conditions standards ($G = 1000W/m^2$ *et* $T = 25°C$), est donnée par la figure(III.4)

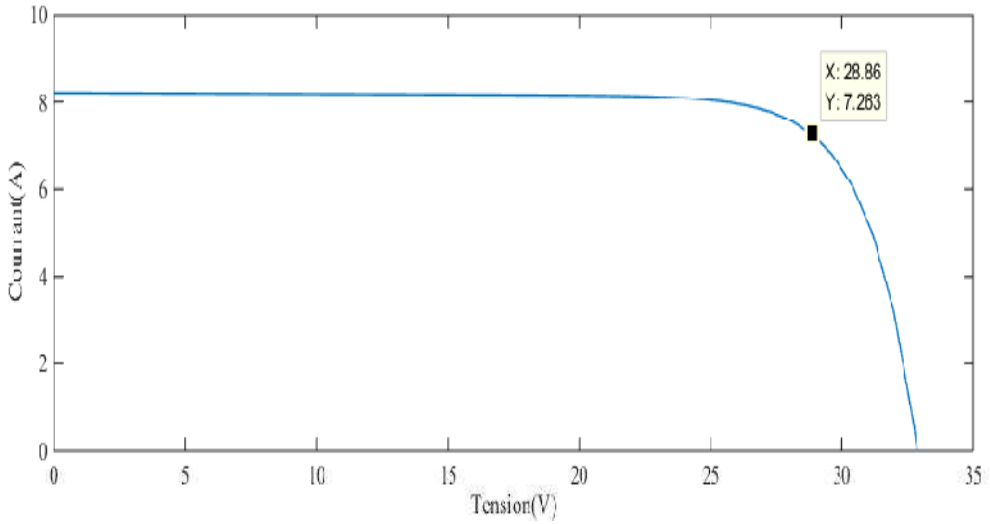


Figure (III.4) : Caractéristique$(I_{PV} = f(V_{PV}))$ du générateur PV

La caractéristique $P_{PV} = f(V_{PV})$ après simulation à température et éclairement constants, particulièrement aux conditions standards ($G = 1000W/m^2$ *et* $T = 25°C$), est donnée par la figure(III.5)

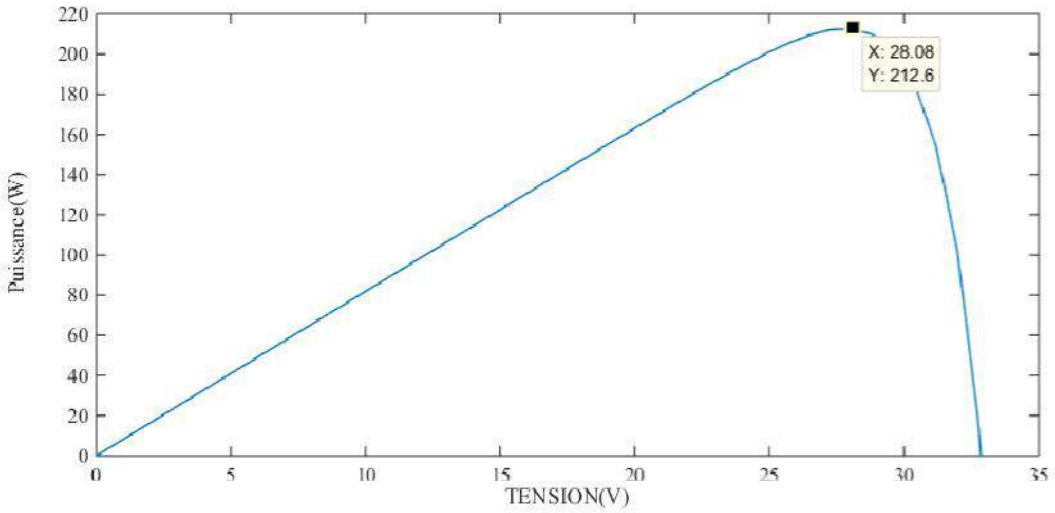


Figure (III.5) : Caractéristique $(P_{PV} = f(V_{PV}))$ du générateur PV.

Notant que la variation de l'éclairement (G) engendre une forte variation du courant de court-circuit "I_{cc}" et une très faible diminution de la tension de circuit ouvert " V_{cO} ", donc une influence proportionnelle sur la puissance "P_{PV}" du générateur photovoltaïque. Aussi, l'augmentation de la température fait baisser fortement la tension de circuit ouvert " V_{cO} " du générateur photovoltaïque contrairement au courant de court-circuit I_{cc} qui subira une influence négligeable sur sa valeur par conséquent la puissance "P_{PV}" extractible diminue.

III.4 .3. Simulation du générateur (GPV) à éclairement et température variable

Afin de constater l'influence des conditions externes, de l'éclairement et de la température (G, Ta) sur les caractéristiques (($I_{PV} = f(V_{PV})$) , ($P_{PV} = f(V_{PV})$) , nous avons adopté la méthode suivante :

- Pour visualiser l'influence de l'éclairement, on fixe la température ambiante ($Ta = 25°C$) et on fait varier l'éclairement dans une gamme suffisante.
- Pour un éclairement constant ($G = 1000W/m^2$), nous ferons varier la température afin de voir l'influence de celle-ci par rapport aux caractéristiques du générateur photovoltaïque.

III.4.3.1. L'influence de l'éclairement sur la caractéristique ($I_{PV} = f(V_{PV})$)

En faisant varier l'éclairement (G) entre 200 et 1000 avec un pas de 200, la caractéristique $(I_{PV} = f(V_{PV}))$ est donnée par la Figure III.6 :

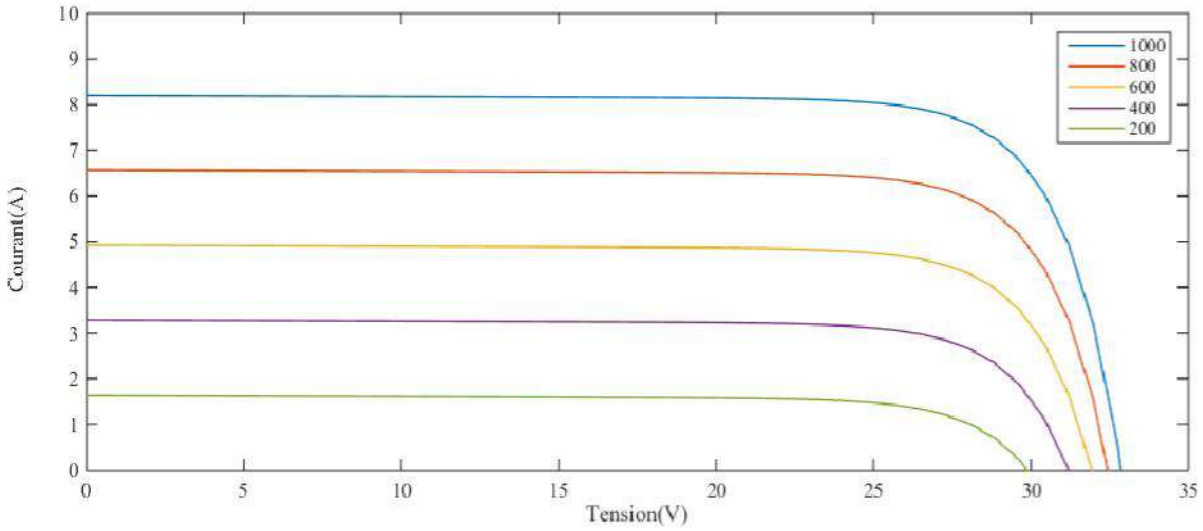


Figure III.6. Caractéristique $(I_{PV} = f(V_{PV}))$ d'un générateur photovoltaïque

D'après la Figure III.6, on remarque une forte diminution du courant de court-circuit par rapport à l'éclairement (G) et une faible diminution de la tension du circuit ouvert.

III.4.3.2. L'influence de l'éclairement sur la caractéristique ($P_{PV} = f(V_{PV})$)

En faisant varier l'éclairement (G) entre 200 et 1000 avec un pas de 200, la caractéristique $(P_{PV} = f(V_{PV}))$ est donnée par la Figure III.7:

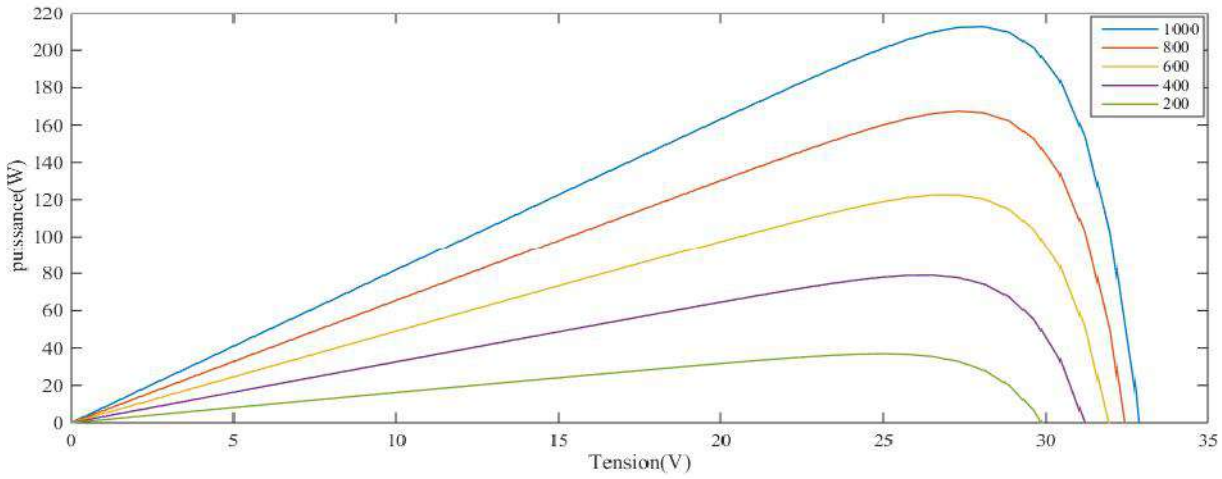


Figure III.7. Caractéristique $(P_{PV} = f(V_{PV}))$ d'un générateur photovoltaïque

On remarque aussi sur la Figure III.7 que, l'éclairement influe proportionnellement sur la puissance et la tension du circuit ouvert d'un générateur photovoltaïque.

III.4.3.3. L'influence de la température sur la caractéristique($I_{PV} = f(V_{PV})$)

En faisant varier la température ambiante (Ta) entre ($0°C$ et $75°C$) avec un pas de $25°C$, l'influence de celle-ci sur la caractéristique($I_{PV} = f(V_{PV})$) est donnée par la Figure III.8, avec un éclairement ($G = 1000W/m^2$). 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 générateur photovoltaïque, contrairement au courant de court-circuit qui reste constant

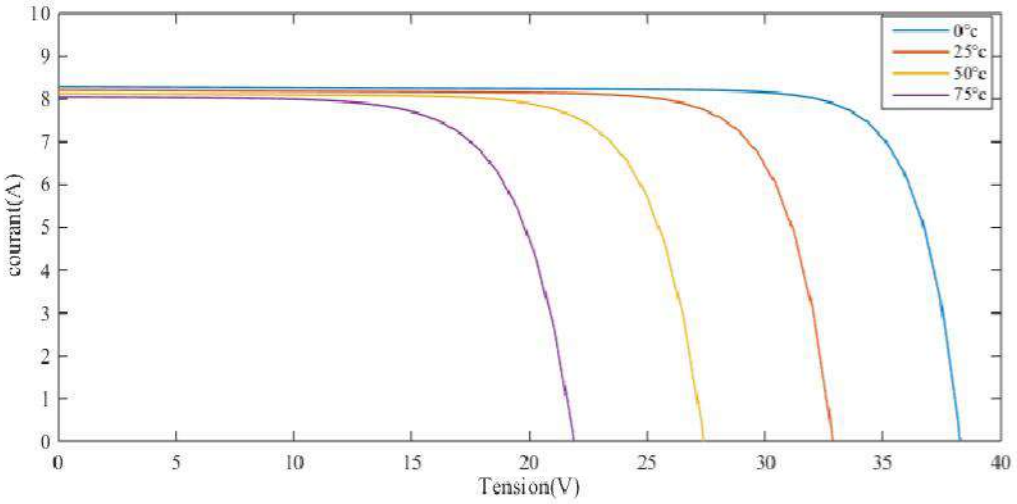


Figure III.8. Caractéristique ($I_{PV} = f(V_{PV})$) du générateur photovoltaïque

III.4.3.4 L'influence de la température sur la caractéristique ($P_{PV} = f(V_{PV})$)

D'après la figure III.9, l'effet de l'augmentation de la température sur la caractéristique ($P_{PV} = f(V_{PV})$) fait diminuer légèrement la puissance et la tension du circuit ouvert du générateur photovoltaïque. La caractéristique ($P_{PV} = f(V_{PV})$) est donnée par la Figure III.9 :

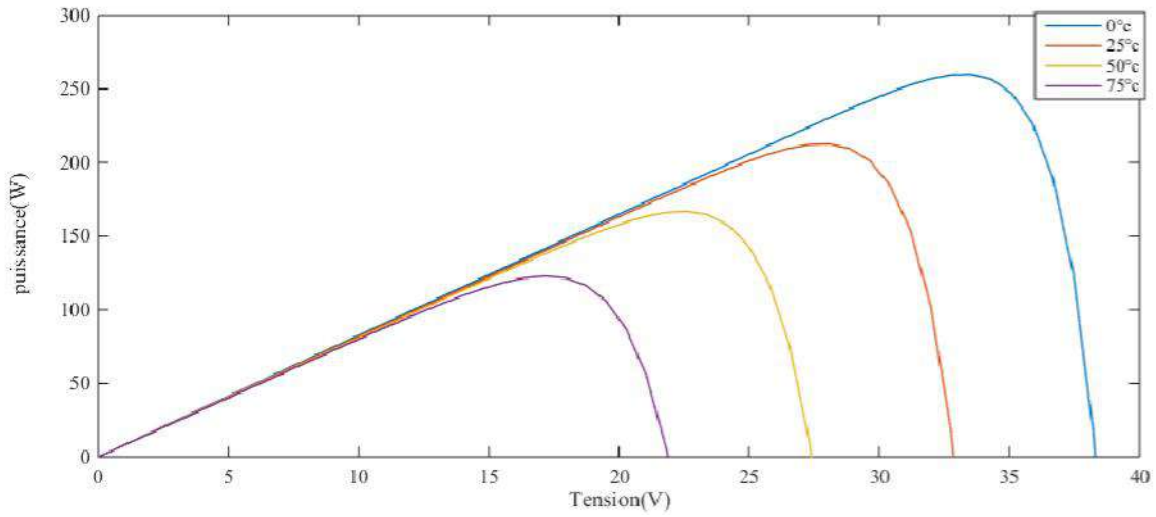


Figure III.9. Caractéristique ($P_{PV} = f(V_{PV})$) du générateur photovoltaïque

III.5. Simulation du system PV avec hacheur commandé en MPPT

III.5.1.Hacheur (Le convertisseur boost) :

Le convertisseur Boost est connu par le nom d'élévateur de tension et nous avons montré dans le chapitre II, suivant les formules mathématiques de ce convertisseur comment la tension de sortie est toujours supérieure à la tension d'entrée. Ainsi, nous avons présenté son circuit électrique équivalent.

Afin d'illustrer les résultats de simulation sous Matlab/Simulink du convertisseur Boost, nous avons connecté une charge résistive à la sortie du convertisseur commandé par une *MPPT "P & O"*. Le schéma est donné par la *figure (III.10).*

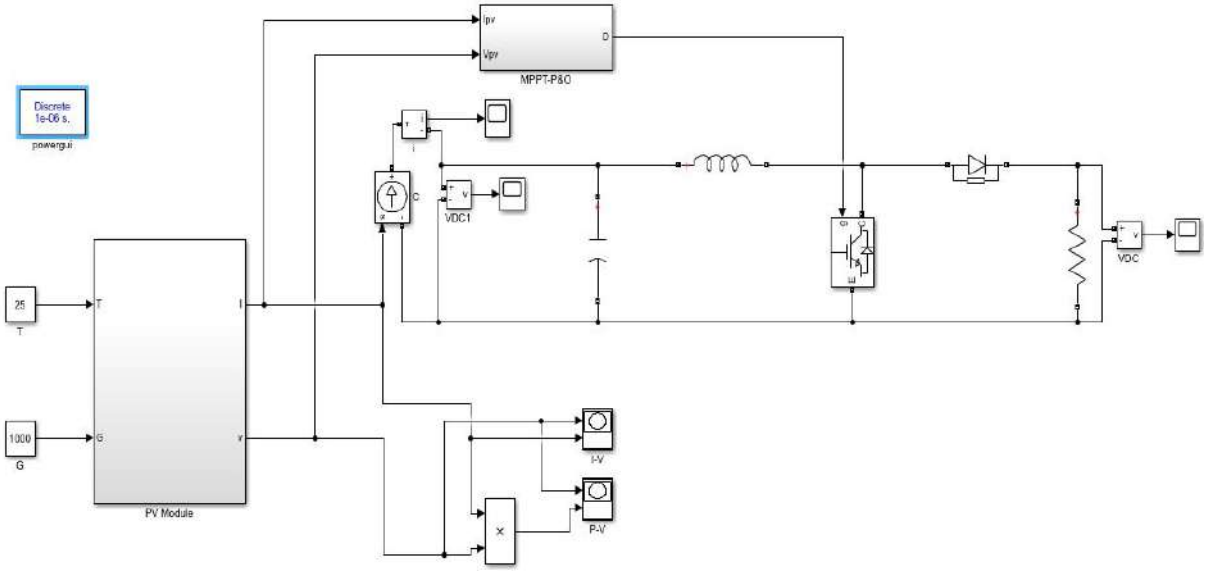


Figure (III.10) : Convertisseur Boost (sous Matlab/Simulink) alimentant une charge R

Le résultat de simulation du convertisseur survolteur de la *figure (III.10)* est illustré dans les *figure (III.11)* et la *figure (III.12)* et la *figure (III.13).*

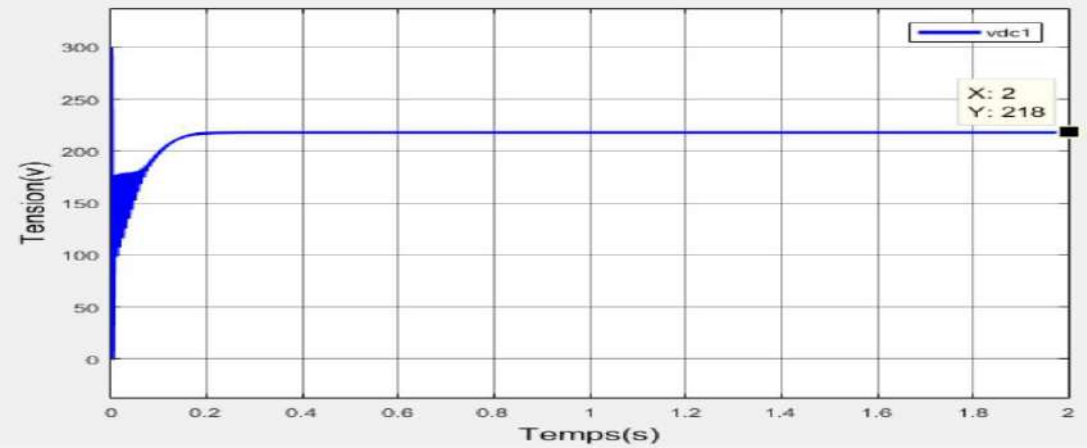


Figure (III.11) : Graphe de la tension à l'entrée du Convertisseur Boost

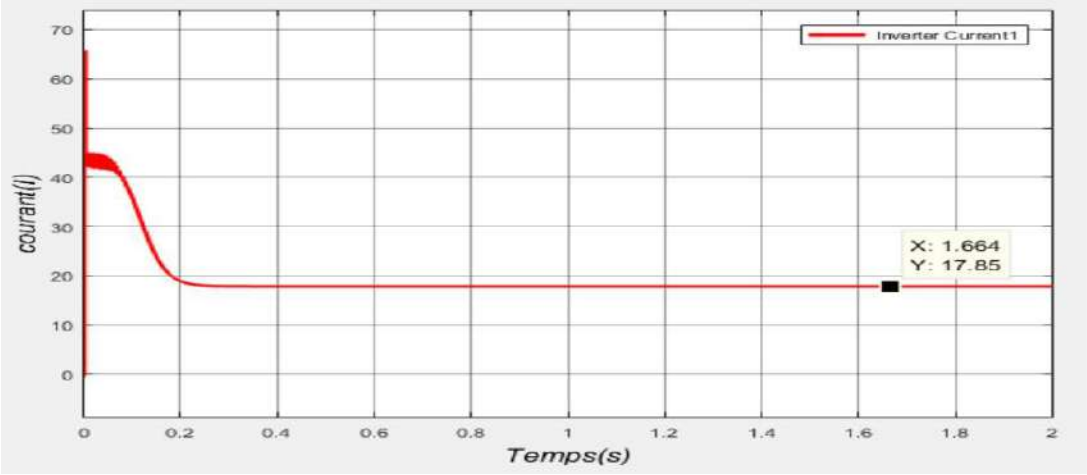


Figure (III.12) : Graphe de courant à l'entrée du Convertisseur Boost

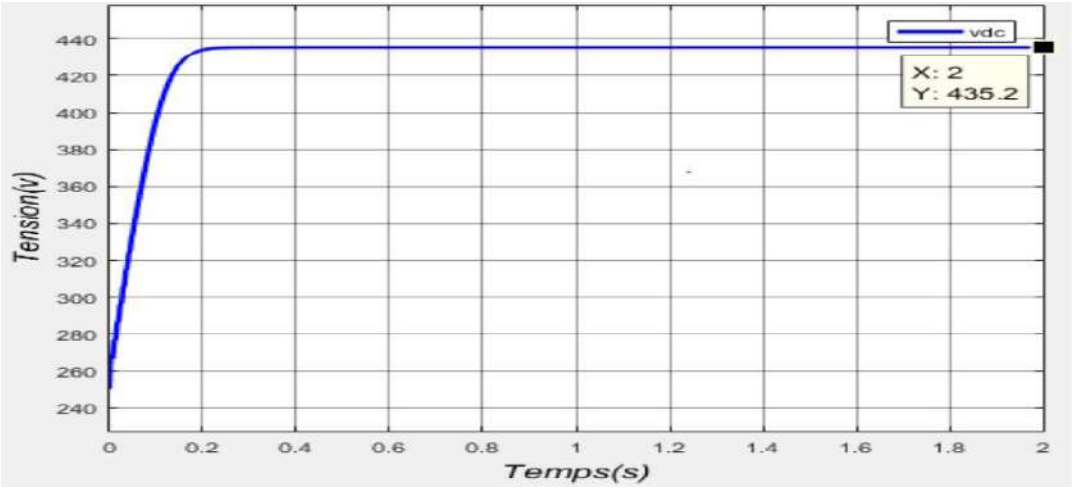


Figure (III.13) : Graphe de la tension de sortie du Convertisseur Boost

Les données qui ont conduit à ce résultat de simulation sont les suivantes :

Tension d'entrée : 220 V

Paramètre du convertisseur : L = 3e-3H, C = 2e-3F

Charge à la sortie : R=50 Ω.

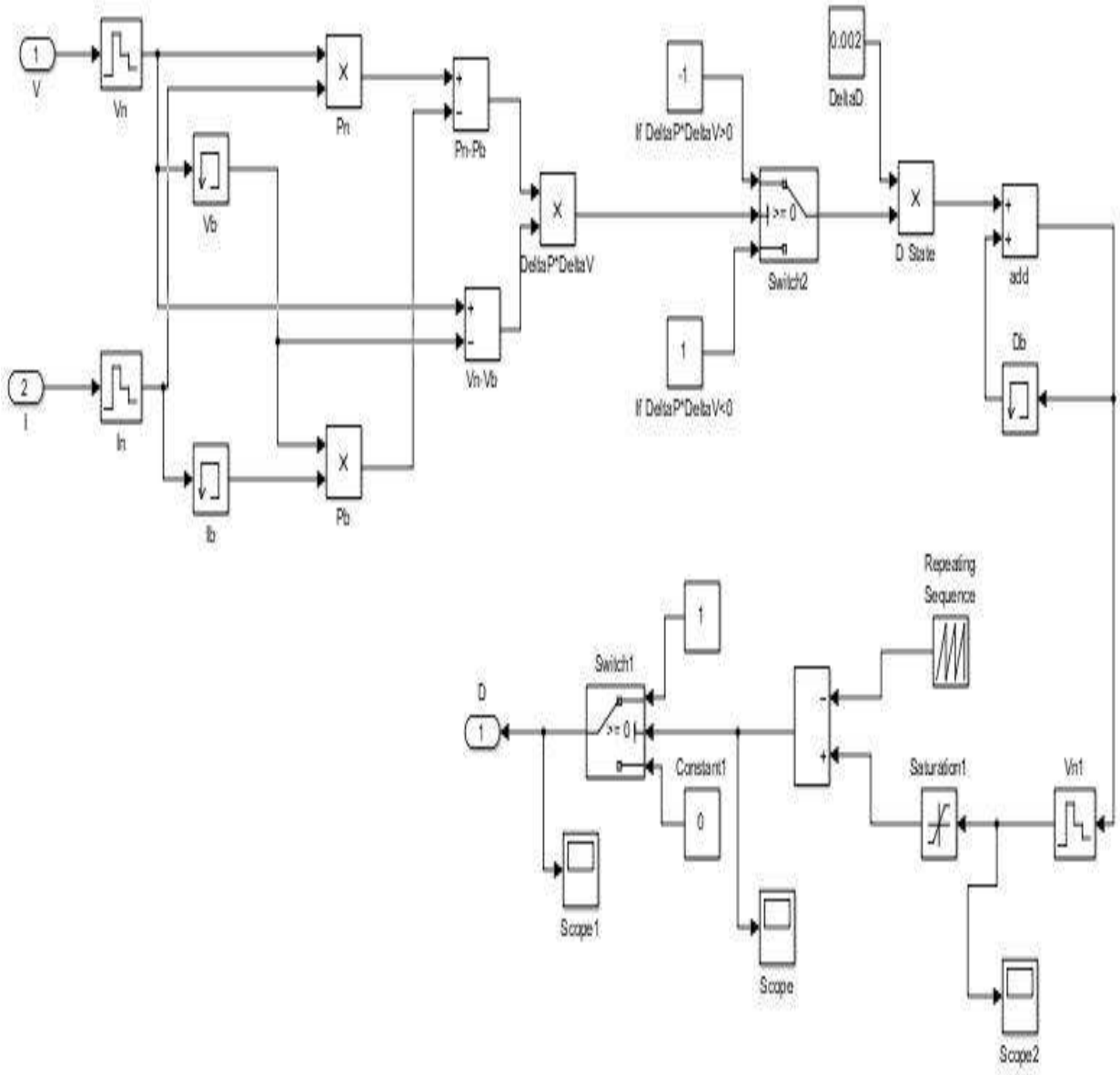


Figure (III.14) : Schéma de l'algorithme P & O sous Matlab/Simulink

III.6. Simulation global d un système photovoltaïque

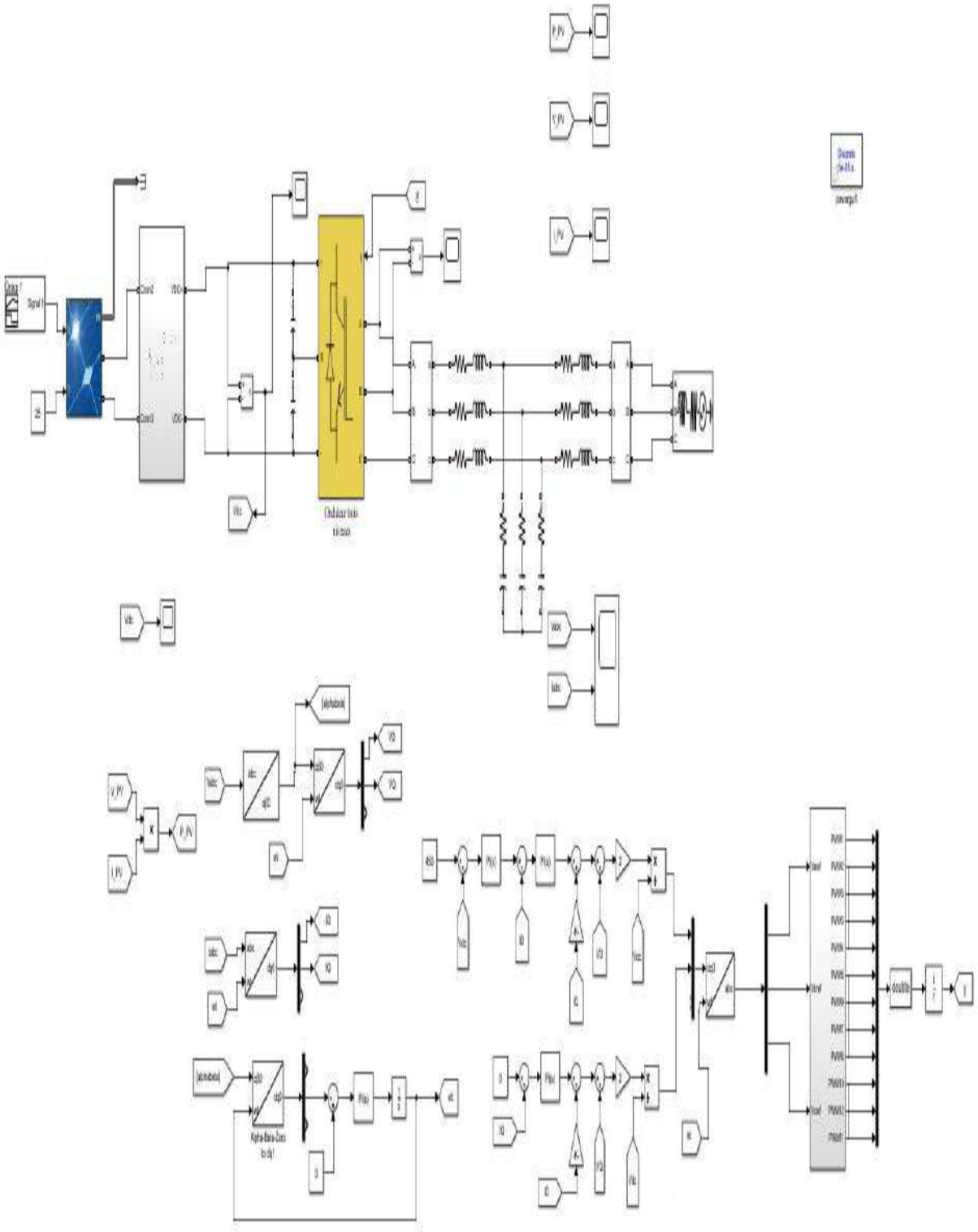


Figure (III.15) : Circuit global sous Matlab/Simulink

III.6.1 Résultats de simulation :

La figure *(III.16)*. Est le résultat global de système PV de la connexion au réseau électrique que nous avons utilisé sous Matlab/Simulink.

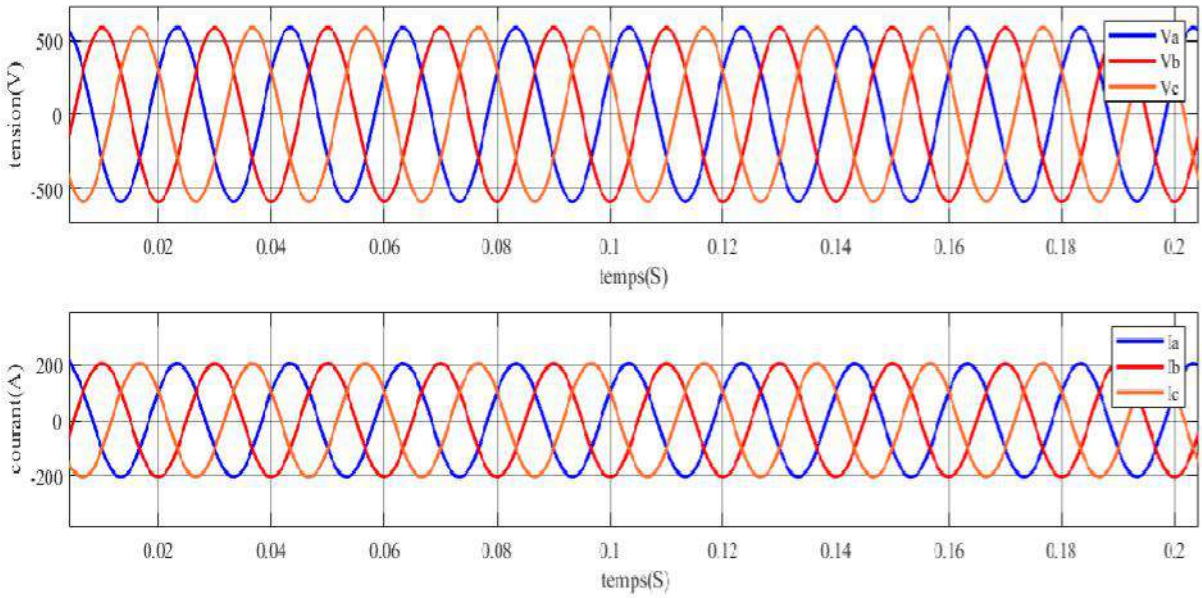


Figure (III.16) : Les tensions (V_a , V_b ,V_c) et les courants (I_a , I_b ,I_c)de l'onduleur.

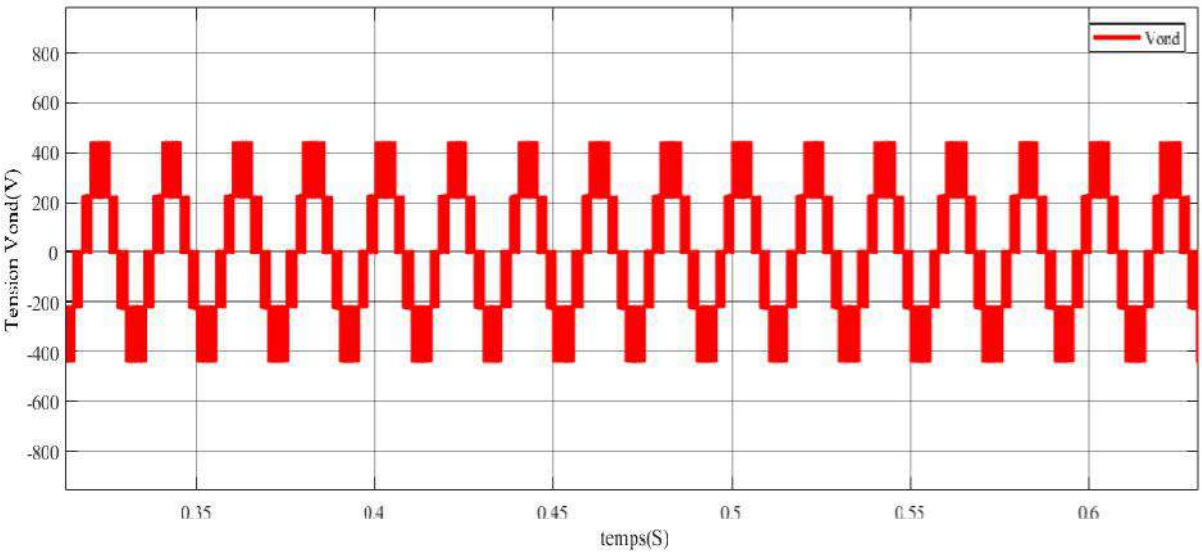
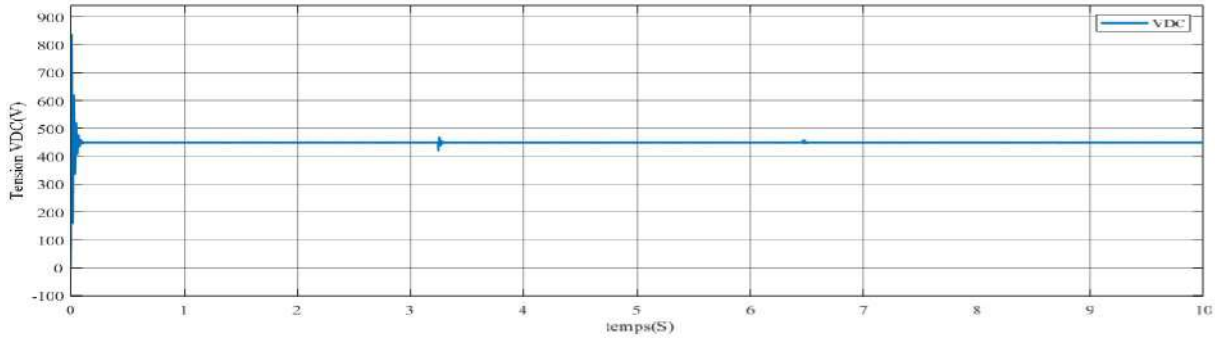
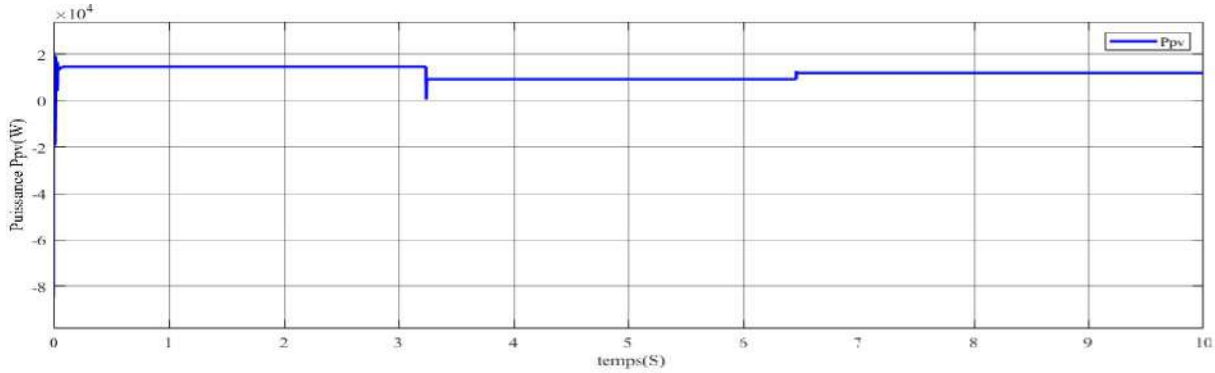


Figure (III.17) : la tension sortie de l'onduleur V_{ond}

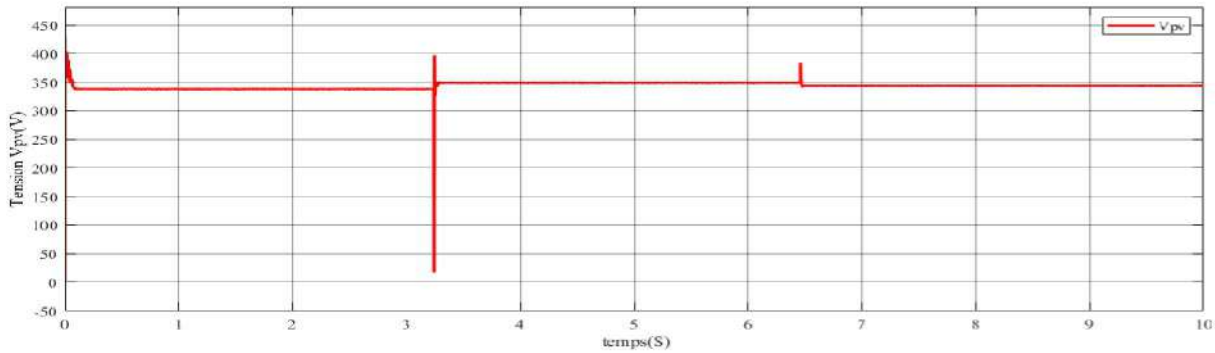
- ✓ Irradiances(w/m^2) :[1000 800 600]
- ✓ Entre(0 et 3s):1000 w/m^2,entre(3et 6s) :600w/m^2 ,entre(6et10s) :800w/m^2



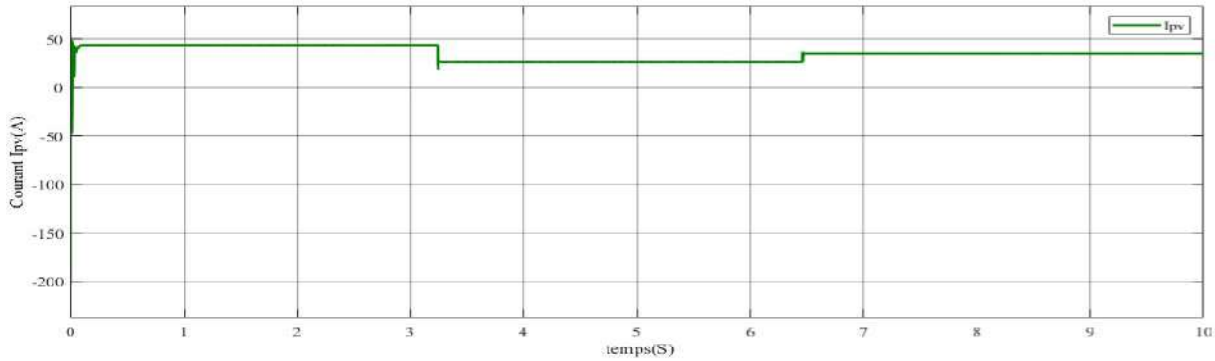
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure (III.18) : résultat global de système PV

III.8. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons simulé toutes les étapes du système Photovoltaïque connecté au réseau électrique, tel que le générateur photovoltaïque, l'hacheur commandé pour la recherche du point de puissance maximale par la méthode *P&O* et l'onduleur commandé par la méthode MLI pour raccordée au réseau électrique.

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 sont conduits 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 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 le fournie par 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 étudié à un convertisseur *DC/DC* de type boost qui fournit une tension continue.Ce convertisseur présente l'avantage d'être un élévateur 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*. et aussi nous avons étudié à un convertisseur DC/AC (Onduleur à trois niveaux) avec la commande MLI

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 tâche de développement d'un modèle de recherche du *MPPT* en Simulink.

D’après les résultats de la simulation obtenus, 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/m2 et T = 25°C.
- Le convertisseur fournit dans les conditions optimales une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur *PV*.

Bibliographie

[1] BENDJELLOULI Zakaria,« Contribution A La Modélisation D'une Cellule Solaire »., Université De Bechar, Mémoire De Magister Soutenue Le 28/06/2009.

[2] TOUIL Nacer Eddine, GHENBAZI Slimane « Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque ».Mémoire de Master Réseaux Électriques, Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued 2015

[3] FERRAI.A, « Dimensionnement des Infrastructures Utilisant Diverses Sources Énergétiques Renouvelables Potentielles pour l'Alimentation Electrique d'un Village» Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2008.

[4] Encarta 2005.

[5] Dr. Sofia Belaid Lalouni, « Cours Energie Solaire Photovoltaïque », Université A.Mira de Bejaia, 2015.

[6] ASAL. (l'Atlas Solaire de l'Algérie par l'Agence Spatiale Algérienne). Energie nouvelle et renouvelable)

[7] Abdelkader Mekemeche, « Modélisation à deux dimensions des propriétés physiques de cellules solaires au silicium à base de substrat de type n, Étude de quelques cas particuliers de cellules innovantes », Thèse de Doctorat, L'Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem, 2017.

[8] J. Royer et T. Djiako et E. Schiler, B. Sadasy. « Le pompage photovoltaïque », université d'Ottawa,1998.

[9] http://www.solarserver.de/gclid=CJWA1ruS-K4CFS4NtAodSzY7xw. (2010).

[10] M. Dahbi « Etude et optimisation d'une installation Hibride PV-Eolienne», Thèse de Doctorat, Université de Bechar, 2007.

[11] Salaheddine Bensalem, « Effets de la température sur les paramètres et caractéristiques des cellules solaire », université Farhat Abbas- Setif, mémoire de magister, 2011.

[12] Othmane Benseddik, Fathi Djaloud, « Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque », mémoire de master, université Kasdi Marbah- Ouargala, 2012.

[13] Sylvain et Brigand, « Installation solaire photovoltaïque », Février 2011.

[14] Ressources pour les STIED , Septembre- Octobre 2 0 11.

[15] MEZIANI Fariza,« Détermination du gisement solaire par traitement d'images MSG». Mémoire de Magister en électronique, Université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. page 15.65

[16] ZOUAK Belacem«Etude de l'évolution des caractéristiques des matériaux thermoélectriques des anciennes et nouvelles générations et applications photovoltaïque-thermoélectricité ». Mémoire de Magister en Electronique, Université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou2012 page.52.

[17] Kamelia Hellali, « Modélisation d'une cellule photovoltaïque : étude comparative », université Tizi-Ouzou, mémoire de magister, 2012.

[18] Mr. MEFLAH AISSA « Modélisation et commande d'une chaine de pompage photovoltaïque » Thème de Magister, université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen 2012.

[19] BENSACI Wafa « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT » Thème de Master, Université Kasdi Merbah–Ouargla 2012.

[20] MECHALIKH M. Nadjib, HAMADA Charaf Eddine « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau » Thème de Magister, Université KASDI MERBAH – OUARGLA 2013.

[21] F.SALAMA «Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique». Mémoire de Magister, Université de Sétif, 2011.

[22] Le photovoltaïque / Mansour Assani-Dahounenon / disponible sur www.peracod.sn / Dakar, Avril 2011.

[23] Introduction aux systèmes photovoltaïques - Habiter - Autrement / disponible sur www.habiter-autrement.org / énergies renouvelables / Introduction - aux-systèmes - photovoltaïques / 11 avril 2008.

[24] S. LALOUNI, « Etude, commande et simulation d'une chaine hybride (photovoltaïque-éolien) de production d'énergie électrique», thèse de doctorat, Université A. Mira-Bejaïa, octobre 2009.

[25] ABBASSEN LYESS « Etude de la connexion au réseau électrique d'une centra photovoltaïque » Thème de Magister, UNIVERSITE de MOULOUD MAMMERI _ TIZI OUZOU, 2011.

[26] www.energies-renouvelables.consoneo.com, maison écologique, les avantages et les inconvénients des panneaux solaires photovoltaïque, 724.

[27] Michel Pinard « Convertisseurs et électronique de puissance : commande, description et mise en œuvre» Edition Dunod, Paris, 2007.

[28] Mchalikh hamada-master académique-thème « modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau ». Le 25/06/2013.

[29] Aboub Hania –master en électrotechnique –thème « commande d'un onduleur 9 niveaux destiné aux fortes puissances photovoltaïque » université el oued 28/06/2014.

[30] Ben Sadik Othmane, djaloud Fathi -master –thème « étude et optimisation d'un système photovoltaïque » université Ouargla Le 27/06/ 2012.

[31] K.DERBAL et H.DJELTI- Master Académique –thème « Les panneaux photovoltaïques ».

[32] N Aouchiche M S Ait Cheikh A. Malek-Revue des énergies renouvable-théme « Poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque par les méthodes de l'incrémentation de conductance et la perturbation & observation » Le 30/09/2013.

[33] belkhier Yousef et ait mahdi M. Amine –mémoire master-thème « modélisation st simulation d'un système photovoltaïque » université Bejaïa 2016/2017

[34] Hanano Fatiha- Rouabah Aicha- master académique-thème « modélisation et simulation d'un système photovoltaïque » Le 09/06/2014.

[35] B. Gaiddon (HESPUL), T. TranQuoc (IDEA) TMC Le(IDEA) Seddik Bacha(G2Elab) Duvauchelle (EDF), thème « Typologie des onduleurs pour systèmes photovoltaïque » Décembre 2010

[36] DJALOUD Fathi, BENSEDDIK Othmane « Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque ». Mémoire de Master en Automatique, Université de Kasdi merbah – Ouargla 2012

Annex

A1 : Générateur photovoltaïque

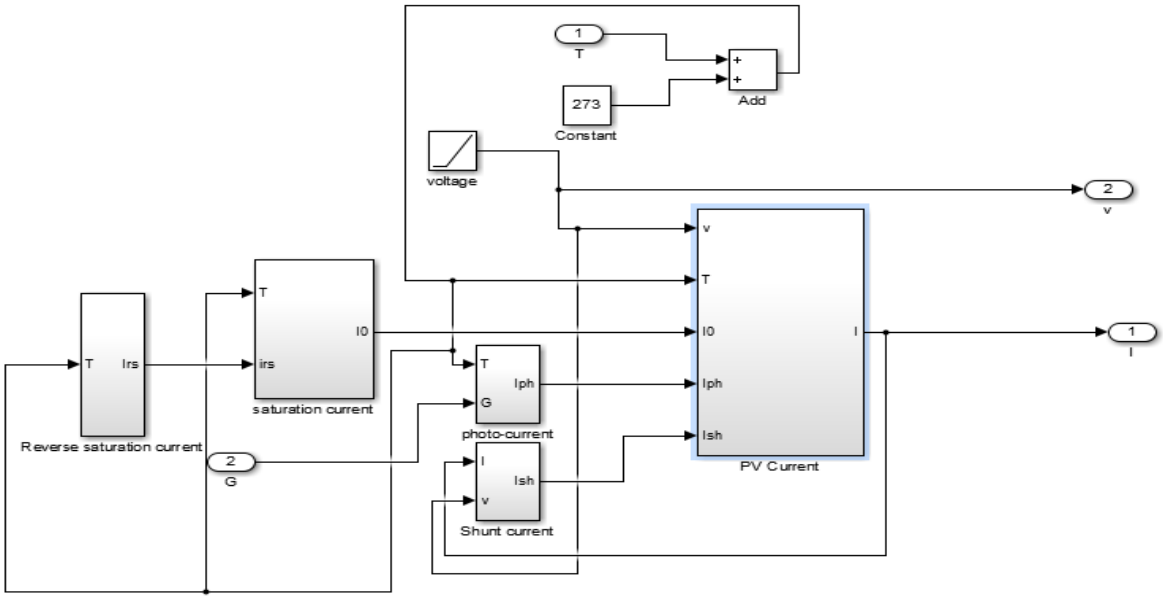


Figure A.1 : Block diagramme du Générateur PV.

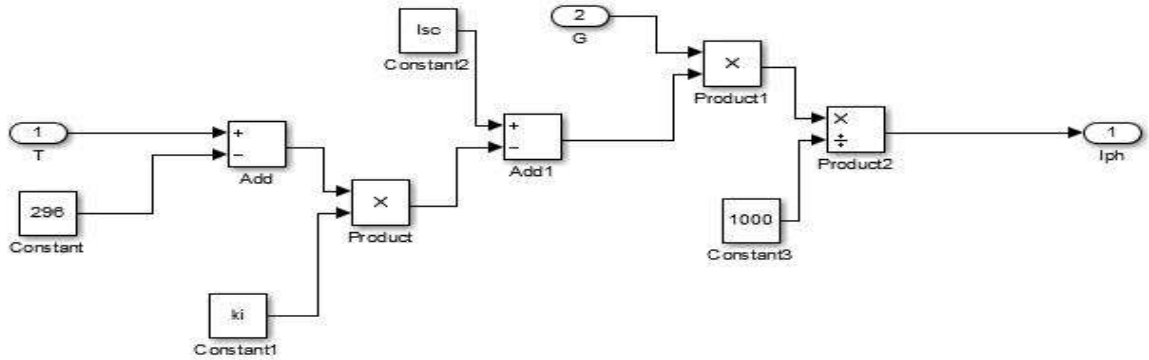


Figure A.2 : Block diagramme de l'équation du photocourant Iph.

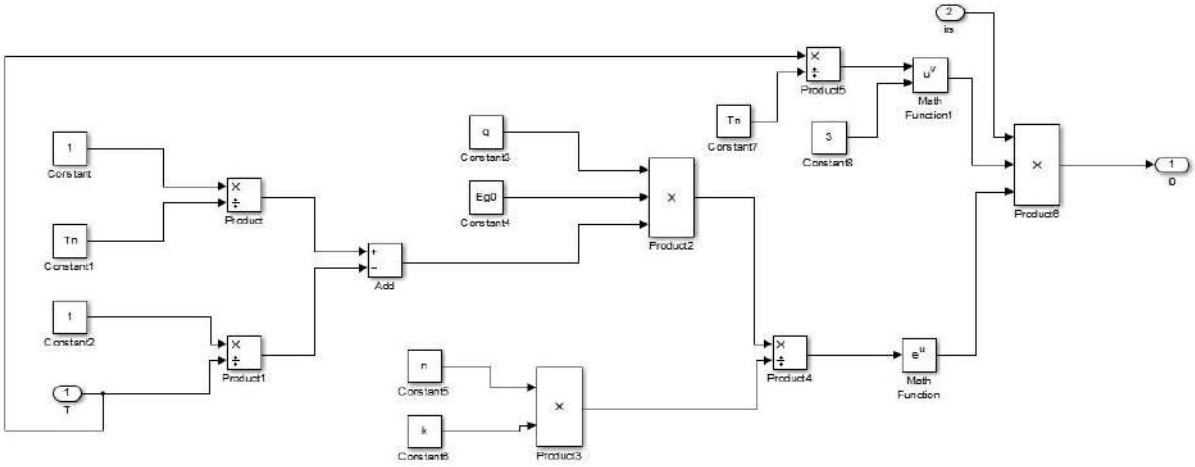


Figure A.3 : Block diagramme de l'équation du courant I0.

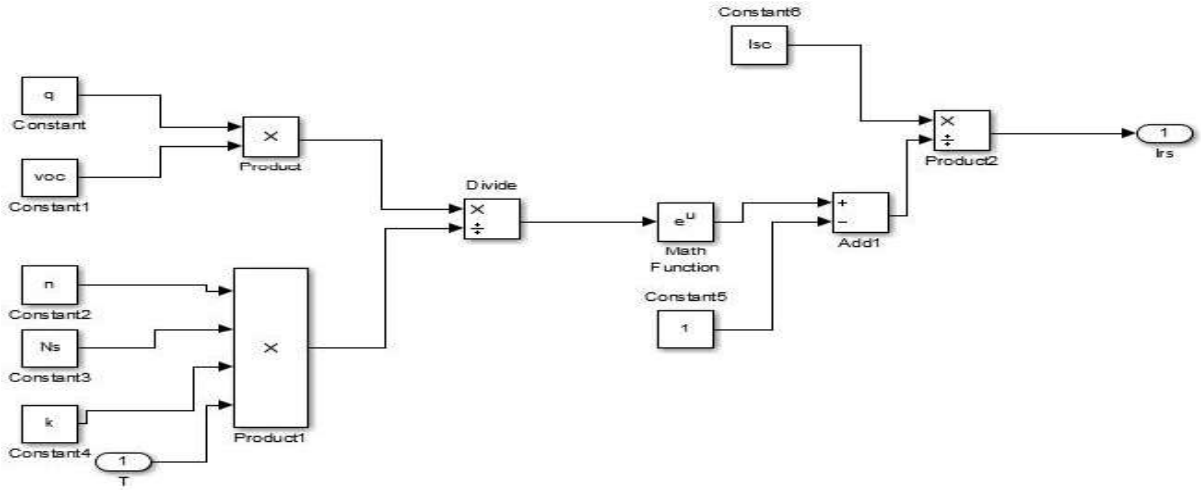


Figure A.4 : Block diagramme de l'équation du courant Id.

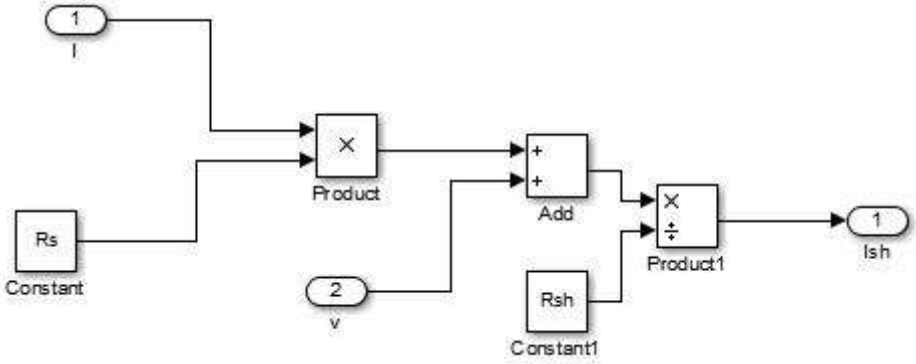


Figure A.5 : Block diagramme de l'équation du courant Ip.

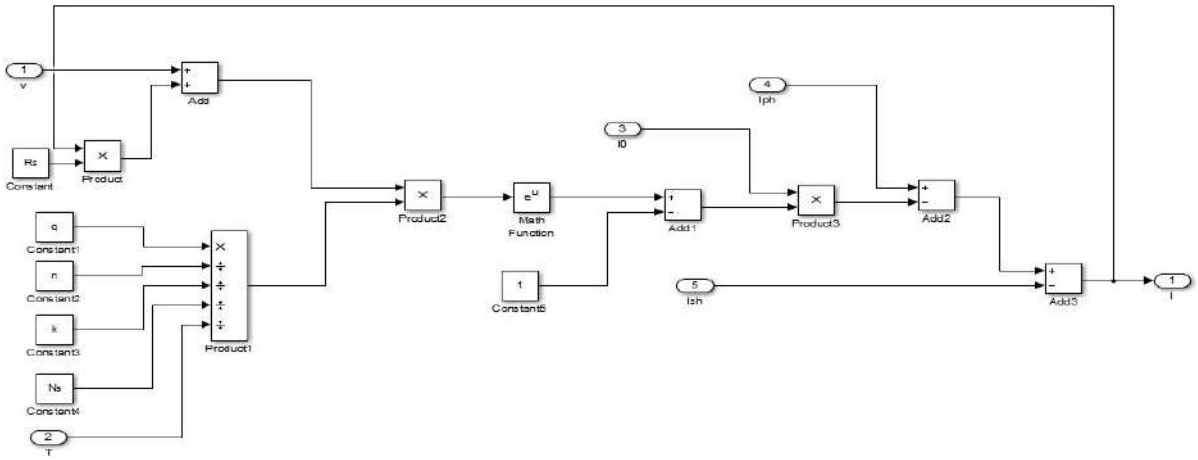


Figure A.6 : Block diagramme de l'équation du courant I.