

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou



Faculté De Génie Electrique Et D'Informatique
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de Fin d'Etude de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

Spécialité : **Machines Electriques**

Présenté par

Aziz TOULAIT
Rachid Aili

Thème

Modélisation et simulation sous MATALAB/SIMULINK d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT

Mémoire soutenu publiquement le 29 septembre 2014 devant le jury composé de :

Mr Nabil BENYAHIA
MC-B, UMMTO, Président

Mr Mustapha ZAOUIA
MC-B, UMMTO, Rapporteur

Melle Kamelia HELALI
MA-B, UMMTO, Co-rapporteur

Mr Hakim DENOUN
MC-B, UMMTO, Examineur

Mr Hakim DJOUDI
MA-A, UMMTO, Examineur

Remerciement

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 Mlle **Helali Kamilia** notre Co-promotrice et Mr **Zaouia Mustapha** notre 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.

Dédicaces

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 2014.*
- ★ *Tous ceux qui ont contribué a notre réussite.*

Aziz et Rachid

"As far as the laws of mathematics refer to reality, they are not certain; and as far as they are certain, they do not refer to reality »

EINSTEIN

Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I Généralité sur les générateurs photovoltaïques

I.1 Introduction.....	3
I.2 Rayonnement solaire dans l'espace	4
I.3 L'énergie solaire	4
I.4 Le photovoltaïque	7
I.4.1 Historique de la cellule photovoltaïque.....	7
I.4.2 La cellule photovoltaïque	8
I.4.3 Les Propriétés des Semi-conducteurs.....	8
I.4.4 Effet photovoltaïque	9
I.5 Principe de Fonctionnement de la Cellule Photovoltaïque	9
I.6 Matériaux utilisés dans les cellules PV.....	10
I.7 Générateur photovoltaïque.....	12
I.7.1 Constitution d'un module photovoltaïque.....	12
I.7.2 Mise en série.....	14
I.7.3 Mise en parallèle	14
I.8 Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque	15
I.8.1 Paramètres d'une cellule photovoltaïque	16
I.9 Conclusion	19

Chapitre II Modélisation d'un système photovoltaïque

II.1 Introduction :	20
II.2 Modélisation des cellules photovoltaïques :	20
II.2.1 Les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque:	21
II.2.2 Modèle de la cellule photovoltaïque :	21
II.2.3 Cellule photovoltaïque simplifiée :	22
II.2.4 Cellule photovoltaïque réelle :	23
II.3 Modèle amélioré :	25
II.4. Simulation de la collection photovoltaïque.....	27
II.4.1 Caractéristiques courant-tension et puissance-tension du modèle :	28
II.5 Influence de la température et de l'éclairement :	29
II.5.1 Influence de la température.....	28
II.5.2 Influence de l'éclairement :	31
II.5.3 Influence de résistance série	32
II.5.4 Influence de la résistance shunt	33
II.6 Conclusion	34

Chapitre III Description générale d'un système de conversion photovoltaïque

III.1 Introduction	34
III.2 Introduction d'un étage d'adaptation	34
III.3 Le Convertisseurs DC-DC	35
III.3.1 Le Principe de fonctionnement du hacheur BOOST	36
III.3.2 Détermination des paramètres du hacheur Boost	38
III.3.3 : Avantage de convertisseur BOOST.....	41
III.4 : Simulation du hacheur parallèle.....	41
III.5 Le fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque	43
III.6 Principe de la recherche du point de puissance maximal.....	43
III.6.1 Généralités	43
III.7 Gestion de la MPPT	45
III.8 Synthèse des différentes MPPT rencontrées dans la littérature	46
III.8.1 Les premiers types de commande MPPT	46
III.8.2 Les commande MPPT à algorithmes performants	47
III.9 Principe des commandes "Perturb and Observe" (P&O)	47
III.9.1 Le bloc de Simulation de l'algorithme perturbation et observation (P&O)	49
III.10 Conclusion.....	50

Chapitre IV Simulation de la chaine de conversion PV sous MATLAB/SIMULINK

IV.1 Introduction	51
IV.2 Simulation d'un panneau photovoltaïque avec MPPT et convertisseur DC-DC	51
IV.2.1 Résultats de la simulation a la sortie du générateur photovoltaïque	51

IV.2.2 Résultats a la sortie du convertisseur	53
IV.2.3 Interprétation des résultats.....	54
IV.3 Influence de l'éclairement.....	54
IV.3.1 Résultats a la sortie du générateur photovoltaïque	54
IV.3 .2 Résultats a la sortie du convertisseur	55
IV.3 .3 Interprétation des résultats.....	56
IV.4 Influence de la température.....	56
IV.4 .1 Résultats a la sortie du générateur photovoltaïque	57
IV.4 .2 Résultats a la sortie du convertisseur	58
IV.4.3 Interprétation	59
IV.5 Simulation d'un panneau photovoltaïque avec convertisseur DC-DC et MPPT avec MCC.....	59
VI.5.1 Equations électriques.....	59
IV.5.3 Equation du mouvement du moteur entrainant une charge de couple résistant C_r ...	59
IV.5.4 Moteur à courant continu à excitation constante.....	60
IV.6 Simulation d'un moteur à courant continu à excitation constante.....	60
IV.6.1 Paramètres de la machine à courant continu utilisée.....	60
IV.6.2 Visualisation des résultats :	61
IV.6.2.1 Moteur à courant continu sans couple résistant.....	61
IV.6.2.2 Valeurs en régime permanent	61
IV.6.2.3 Valeurs en régime transitoire	62
IV.6.2.4 Moteur à courant continu avec couple résistant	63
II.6.2.5 Valeurs en régime permanent	63
IV.7 Interprétation.....	67
IV.8 Conclusion	67
Conclusion générale	68

Introduction Générale

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

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

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

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

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

Dans ce travail nous nous sommes intéressés à l'étude et l'optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque. Ce mémoire est partagé en quatre chapitres.

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

Le deuxième chapitre présente la configuration physique des éléments de la cellule photovoltaïque aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément

Dans le troisième chapitre nous présentons les différentes techniques pour suivre et optimiser la puissance maximale et les différents types des convertisseurs statiques utilisés dans le système photovoltaïque et leur principe du fonctionnement.

Dans le quatrième et dernier chapitre, nous présentons une simulation complète avec et sans optimisation d'un système photovoltaïque alimentant un moteur à courant continu. En fin nous terminerons ce travail par une conclusion générale.

I.1 Introduction :

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette énergie est l'une des sources les plus importantes d'énergie renouvelable qui suscitait un intérêt croissant ces dernières années.

Le générateur photovoltaïque convertit la radiation solaire incidente en puissance électrique et en général, on distingue deux types d'installations [1]:

- ✓ *Non autonomes ou " grid-connected "*, rattachées au réseau de distribution électrique. Dans Les systèmes reliés aux réseaux, les consommateurs standards de puissance AC sont connectés au générateur via un onduleur (convertisseur DC/AC) parfois bidirectionnel (redresseur/onduleur). Le surplus d'énergie du générateur photovoltaïque est injecté au réseau public et les demandes de puissance sont attachées sur le réseau.
- ✓ *Autonomes ou " stand-alone"*, ces installations isolées ne sont pas connectées au réseau, mais elles doivent assurer la couverture de la demande de la charge en tout temps. La puissance à la sortie du générateur photovoltaïque n'est pas suffisante pour satisfaire la demande de charge, aussi l'autonomie du système est-elle assurée par un système de stockage d'énergie. En général ces installations comprennent quatre éléments : [1]
 - Un ou plusieurs modules PV.
 - Le système de régulation.
 - Une ou plusieurs batteries.
 - Convertisseurs statiques.

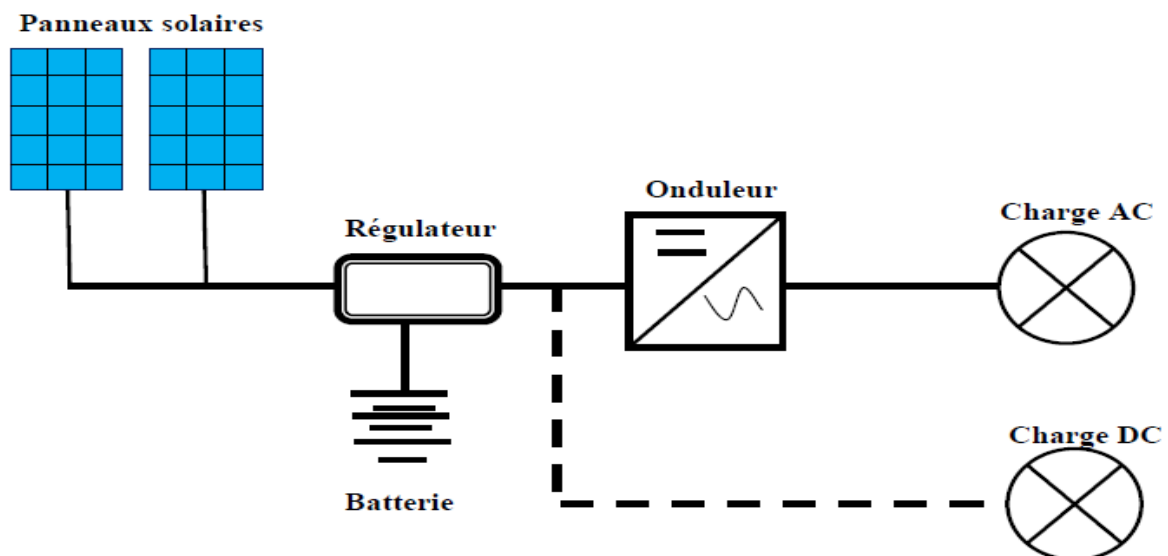


Figure I.1 : Schéma d'un système solaire autonome

I.2 Rayonnement solaire dans l'espace :

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus depuis que Lavoisier et Laplace, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, ont émis l'idée il y a une soixantaine d'années que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance, il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène –hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium; la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement [2].

- Sa lumière, à une vitesse de 300000 km/s,
- Met environ 8 minutes pour parvenir à la terre,
- Distance moyenne soleil-terre est de 150 million Kilomètres.
- Sa distribution spectrale de l'atmosphère présente un maximum pour une longueur d'onde d'environ 0.5 m,
- La température de corps noir à la surface du soleil est d'environ 5780°k [3]
- Diamètre de soleil $D=1,39.10^9$ m
- Diamètre de la terre $D=1,27.10^7$ m

I.3 L'énergie solaire :

La constante solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au soleil. La valeur de l'éclairement est communément prise égale à 1360W/m^2 . Au niveau du sol, la densité d'énergie solaire est réduite à 1000 W/ m^2 à cause de l'absorption dans l'atmosphère. La figure I.2 montre les différentes valeurs de l'éclairement dans le monde.

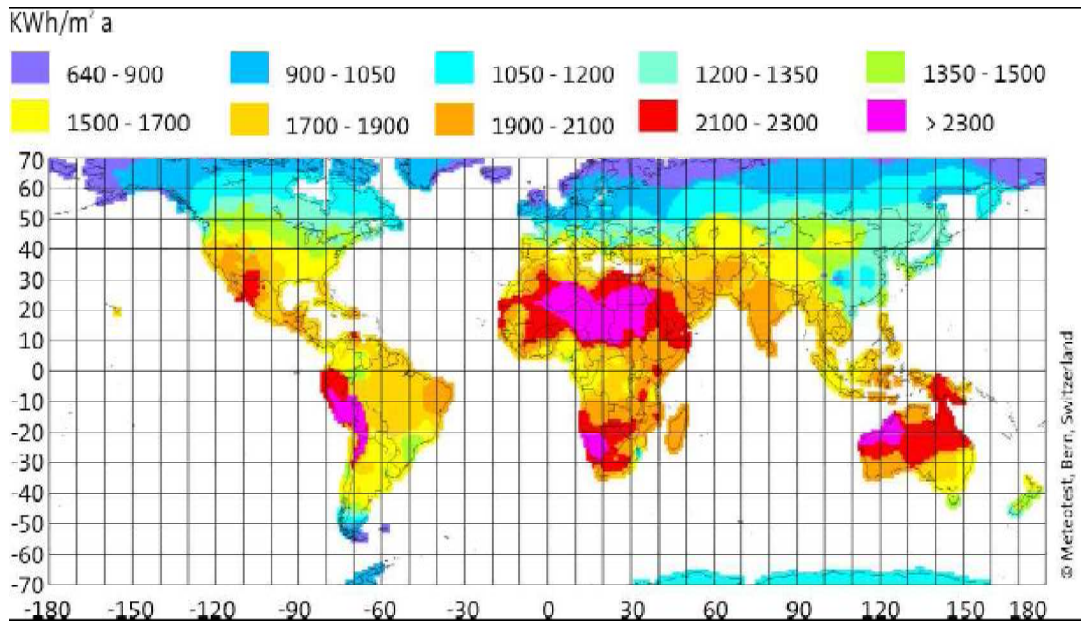


Figure I.2 : Rayonnement solaire annuel.

Albert Einstein a 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 :

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

h : la constante de Planck [j.s^{-1}],

c : la vitesse de la lumière [m.s^{-1}].

λ : la longueur d'onde [m].

ν : la fréquence [s^{-1}].

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande [4].

Une façon commode d'exprimer cette énergie est:

$$E = \frac{1.25}{\lambda} \quad (\text{I-2})$$

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique figure I.2 compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10 microns (μm) [5].

- 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 [3]:

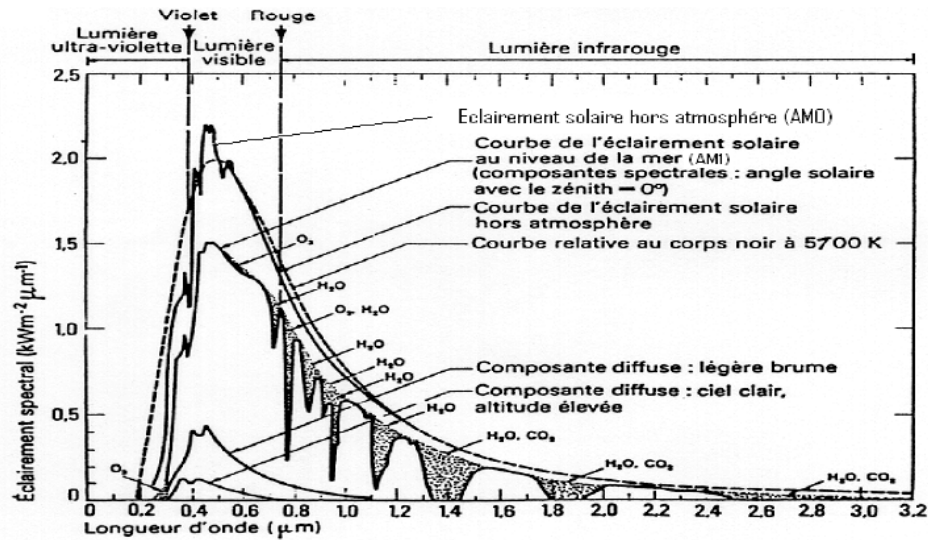


Figure I.3 : éclairement solaire [6].

L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi :

- Ultraviolet UV $0.20 < l < 0.38 \mu\text{m}$ 6.4%
- Visible $0.38 < l < 0.78 \mu\text{m}$ 48.0%
- Infrarouge IR $0.78 < l < 10 \mu\text{m}$ 45.6%
- l : longueur d'onde en μm .

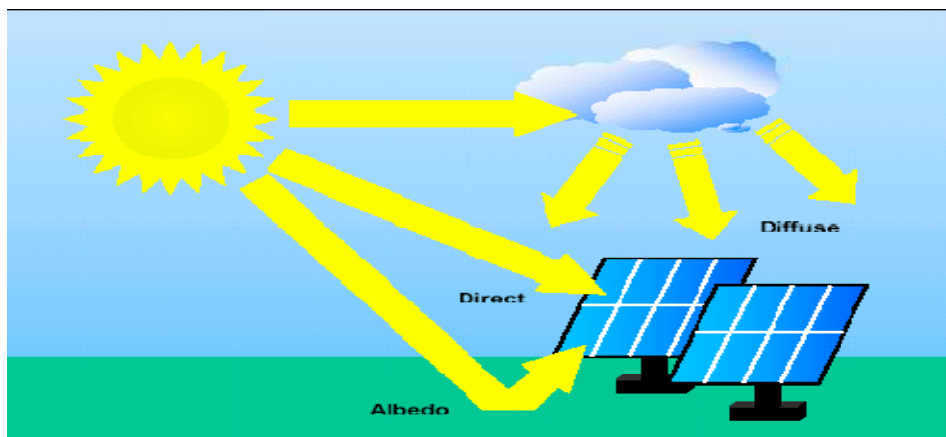


Figure I.4 : Rayonnement solaire global sur un collecteur photovoltaïque

Au sol, le rayonnement a au moins deux composantes : une composante directe et une composante diffuse (rayonnement incident diffusé ou réfléchi par un obstacle : nuage, sol) formant le rayonnement global Figure I.4 [7,8].

Sa valeur dépend de la pression, de l'altitude et de l'angle d'incidence des rayons lumineux. L'intégration de l'irradiance sur la totalité du spectre permet d'obtenir la puissance P (W.m^2) fournie par le rayonnement. Pour simplifier on utilise les notions suivantes [7].

- AM0: Hors atmosphere (application spatial). $P \approx 1.36 \text{ KW .m}^{-2}$.
- AM1 : le soleil est au zénith du lieu d'observation (a l'équateur).
- AM1.5 : Spectre standard, le soleil est a 45° . $P \approx 1.36 \text{ KW .m}^{-2}$.

Les conditions standards de caractérisation sont définis par la norme **IEC-609004** de **International Electrotechnical commission (IEC)** selon une distribution spectrale **AM1.5** globale (la somme des rayonnements directs et diffus), d'intensité 100 mW/cm^2 et pour une température de cellule de 25° [9 ,10].

I.4 Le photovoltaïque :

I.4.1 Historique de la cellule photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque est découvert par le physicien Alexandre Edmond Becquerel en 1839. Le mot "photo" vient du grec qui veut dire lumière et "voltaïque" vient du nom d'un physicien Italien Alessandro Volta qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité et d'après qui on a aussi nommé l'unité de tension électrique le "volt". Mais, c'est vers les années 1940 que débute l'utilisation des cellules solaires.

Quelques dates importantes dans l'histoire de la photovoltaïque:

- ✓ **1839** : Le physicien français Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque.
- ✓ **1875** : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.
- ✓ **1954** : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement.
- ✓ **1958** : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.
- ✓ **1973** : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.

- ✓ **1983** : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie.
- ✓ **Lem** et **Heweliusz** ", les premiers nano-satellites polonais de la constellation BRITe, décolleront en 2013

I.4.2 La cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique, qui exposé à la lumière (photons), génère une tension. Le courant obtenu est un courant continu (CC), les semi-conducteurs qui constituent les cellules photovoltaïques sont à base de silicium (Si), de sulfure de cadmium (CdS) ou de tellurure de cadmium (CdTe). Elles se présentent sous la forme de deux fines plaques en contact étroit. Ce semi-conducteur est pris en sandwich entre deux électrodes métalliques et le tout est protégé par une vitre [11].

I.4.3 Les Propriétés des Semi-conducteurs :

Un Semi-conducteur est un composant dont la conductivité électrique (plus importante que celle des isolants, mais plus faible que celle des métaux) augmente par addition d'impuretés dans sa structure. Le semi-conducteur le plus courant est à base de silicium Si, un élément chimique le plus souvent associé à l'oxygène dans la silice SiO_2 , donc très abondant dans la nature.

Le silicium pur est un semi-conducteur intrinsèque. Les propriétés d'un semi-conducteur peuvent être contrôlées en le dopant par des impuretés. Un semi-conducteur présentant plus d'électrons que de trous est alors dit de type N, tandis qu'un semi-conducteur présentant plus de trous que d'électrons est dit de type P.

Deux types de dopages sont possibles :

- ✓ Le dopage de type N (négatif) consiste à introduire dans la structure cristalline semi-conductrice, des atomes étrangers qui ont la propriété de donner chacun électron excédentaire (charge négative), Libre de se mouvoir dans le cristal. C'est le cas du phosphore (P) dans le silicium (Si). Dans un matériau de type N, on augmente fortement la concentration en électrons libres.

- ✓ Le dopage de type P (positif) utilise des atomes dont l'insertion dans le réseau cristallin donnera un trou excédentaire. Le bore (B) est le dopant de type P le plus

couramment utilisé pour le silicium. Lorsque l'on effectue deux dopages différents (type N et type P) de part et d'autre de la cellule, il en résulte, après recombinaison des charges libres (électrons et trous), un champ électrique constant créé par la présence d'ions fixes positifs et négatifs. Les charges électriques générées par l'absorption du rayonnement pourront contribuer au courant de la cellule PV.

I.4.4 Effet photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule. La figure I.4 illustre une cellule PV typique où sa constitution est détaillée. Les performances de rendement énergétique atteintes industriellement sont de 13 à 14 % pour les cellules à base de silicium monocristallin, 11% à 12 % avec du silicium polycristallin et enfin 7 à 8 % pour le silicium amorphe en films minces [12]. La photopile ou cellule solaire est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque [13].

I.5 Principe de Fonctionnement de la Cellule Photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif ;
- conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trou dans le matériau semi-conducteur ;
- collecte des particules générées dans le dispositif.

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant : d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque.

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons / trou créées est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction p-n.

D'autres structures, comme les hétérojonctions et les schottky peuvent également être utilisées.

Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la figure I.4 :

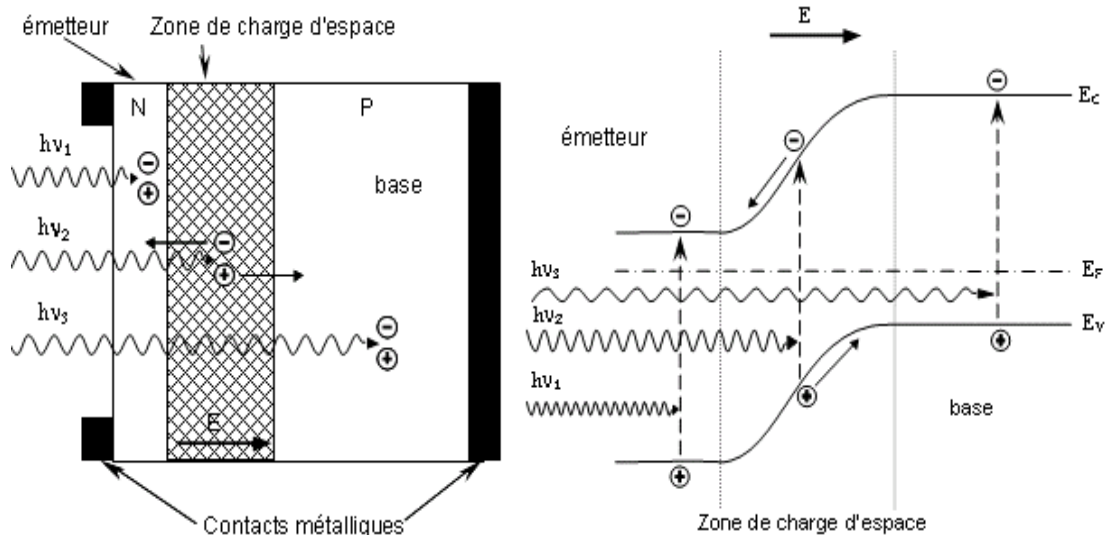


Figure. I.5: Schéma de principe de fonctionnement d'un générateur PV

I.6 Matériaux utilisés dans les cellules PV :

➤ Silicium mono-cristallin

Le silicium cristallin est actuellement l'option la plus populaire pour les cellules commerciales, bien que beaucoup d'autres matériaux soient disponibles. Le terme « cristallin » implique que tous les atomes dans le matériau PV actif font partie d'une structure cristalline simple où il n'y a aucune perturbation dans les arrangements ordonnés des atomes.

➤ Silicium poly-cristallin

Il est composé de petits grains de silicium cristallin. Les cellules à base de silicium poly cristallin sont moins efficaces que les cellules à base de silicium monocristallin.

Les joints de grains dans le silicium poly-cristallin gênent l'écoulement des électrons et réduisent le rendement de puissance de la cellule. L'efficacité de conversion PV pour une cellule à base de silicium poly cristallin modèle commercial s'étend entre 10 et 14%.



Figure 1.6 : photos de cellules mono-cristalline (a) et poly cristalline (b)

➤ **Silicium amorphe (a-si)**

Le silicium est déposé en couche mince sur une plaque de verre ou un autre support souple. L'organisation irrégulière de ses atomes lui confère en partie une mauvaise semi-conduction. Les cellules amorphes sont utilisées partout où une solution économique est recherchée ou lorsque très peu d'électricité est nécessaire, par exemple pour l'alimentation des montres, des calculatrices, ou des luminaires de secours. Elles se caractérisent par un fort coefficient d'absorption, ce qui autorise de très faibles épaisseurs, de l'ordre du micron. Par contre son rendement de conversion est faible (de 7 à 10 %) et les cellules ont tendance à se dégrader plus rapidement sous la lumière [4].

➤ **Nouvelle technologie**

On utilise de plus en plus de matériaux organiques dans le domaine de l'optoélectronique, avec des perspectives d'électronique organique voire moléculaire, pour l'éclairage à l'aide de diodes électroluminescentes organiques (OLED : Organic Light- Emitting Diode). Bien que les optimisations des matériaux à mettre en œuvre ne soient pas les mêmes, le domaine du photovoltaïque bénéficie depuis quelques années des avancées technologiques de l'optoélectronique. Ainsi, bien que cette filière soit vraiment récente, les progrès annuels sont spectaculaires. Les matériaux organiques, moléculaires ou polymériques, à base de carbone, d'hydrogène et d'azote, sont particulièrement intéressants en termes d'abondance, de coût, de poids et de mise en œuvre [14].

Le tableau I.1 présente les avantages et les inconvénients pour les technologies les plus utilisées d'une cellule photovoltaïque.

Type	Silicium mono cristallin	Silicium poly cristallin	Amorphe
Durée de vie	35 ans	35 ans	35 ans
Avantages	Bon rendement en soleil direct	Bon rendement en soleil direct (moins que le mono-cristallin mais plus que l'amorphe)	Souplesse, prix moins élevé que les cristallins, Bon rendement en diffus
Inconvénient	Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux..) Prix élevé.	Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux...), prix élevé	Mauvais rendement en plein soleil.

Tableau I.1: Avantage et inconvénient des cellules photovoltaïques

I.7 Générateur photovoltaïque :

I.7.1 Constitution d'un module photovoltaïque :

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Les cellules photovoltaïques sont constituées :

- d'une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne,
- d'une couche anti-reflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires,
- d'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode,
- les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissantes justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.

- câblage des cellules photovoltaïques : les cellules sont connectées entre elles par un fins ruban métallique (cuivre étamé), du contact en face avant (-) au contact en face arrière (+)

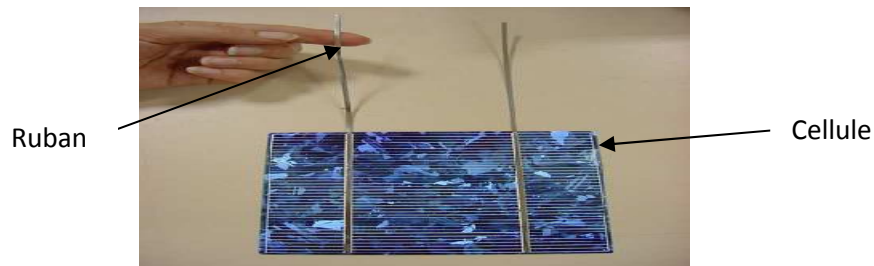


Figure I-7 : Ruban métallique d'une cellule.

- les cellules sont encapsulée sous vide entre 2 films thermoplastiques transparents (EVA : Ethylène Acétate de Vinyle)
- le plus souvent présence d'un cadre en aluminium avec joint périphérique pour permettre la dilatation
- un verre trempé en face avant protège les cellules sur le plan mécanique tout en laissant passer la lumière
- la face arrière est constituée d'un verre ou d'une feuille TEDLAR

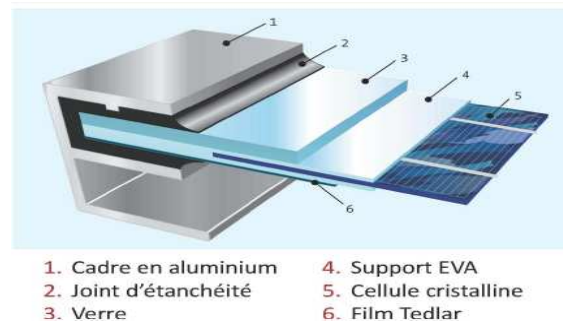
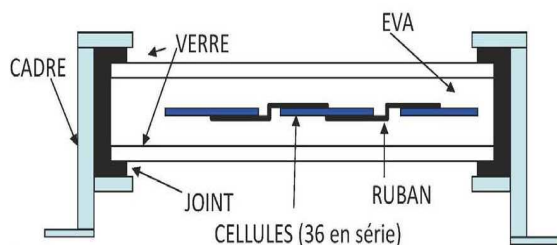


Figure I-8 : Encapsulation des cellules.

- connexion ; la boîte de connexion étanche regroupe les bornes de raccordement, les diodes by-pass
- les 2 câbles unipolaires sont raccordés

I.7.2 Mise en série :

Une association de (N_s) cellule en série figure (1.9) 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 électrique d'une association série de (N_s) cellules [14].

$$V_{coNs} = N_s \times V_{co} \quad (I-3)$$

$$I_{cc} = I_{ccNs} \quad (I-4)$$

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

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

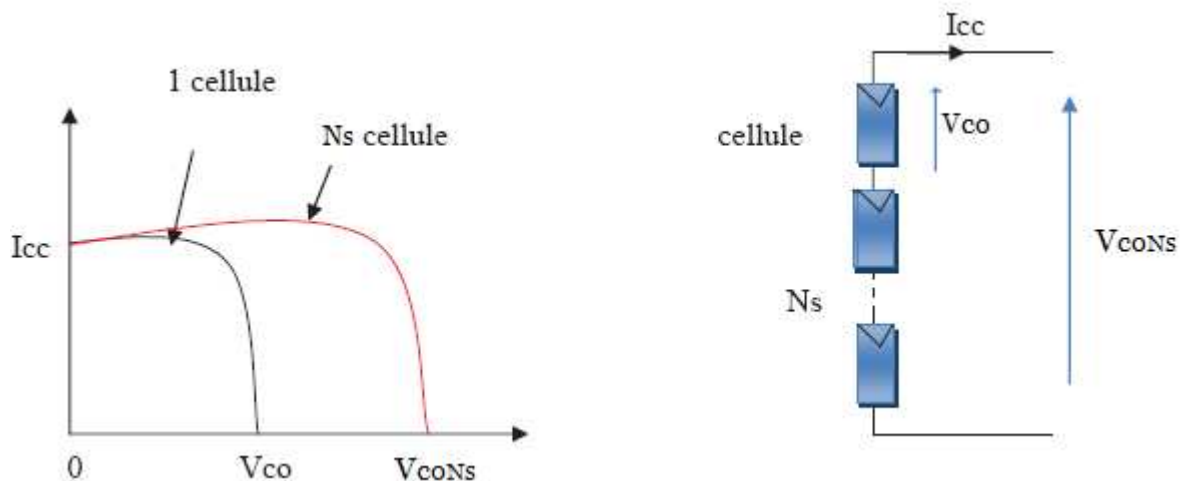


Figure 1.9: Caractéristique courant tension de N_s cellule en série.

I.7.3 Mise en parallèle :

Une association parallèle de (N_p) cellule figure (1.10) est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants [15].

$$I_{ccNP} = N_p \times I_{cc} \tag{I-5}$$

$$V_{co} = V_{coNP} \tag{I-6}$$

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

V_{coNP} : Tension du circuit ouvert de (N_p) cellules en parallèle

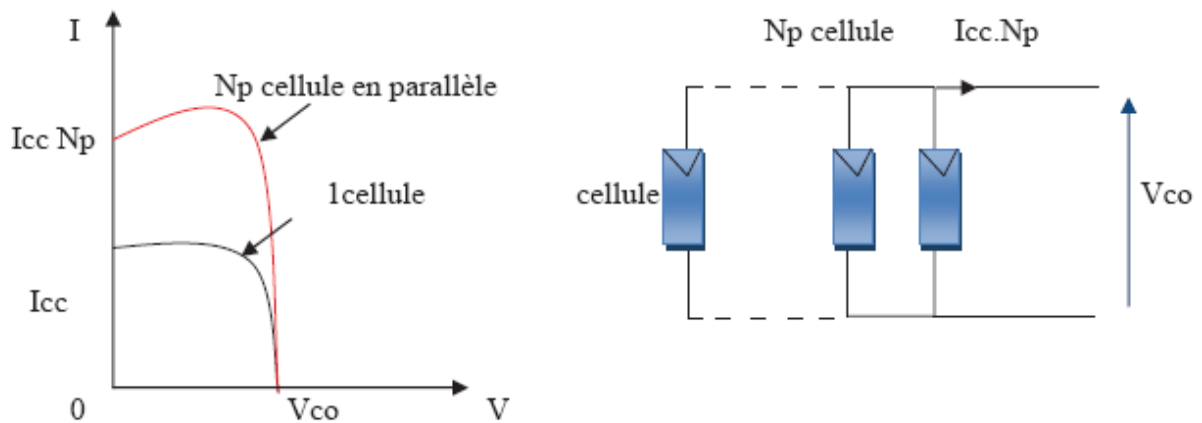


Figure 1.10 : Caractéristique courant tension de (N_p) cellule en parallèle

I.8 Modélisation électrique d’une cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque a un comportement équivalent à une source de courant shuntée par une diode (Figur I.11). Le modèle est complété par une résistance série R_s due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts face avant et arrière et une résistance parallèle ou shunt R_p qui provient des contacts métalliques et des résistances de fuite sur la périphérie de la cellule[16] .

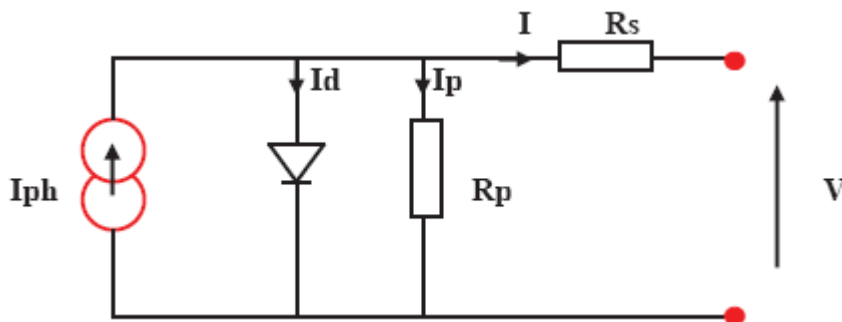


Figure I.11. : Modèle de la cellule photovoltaïque réel

Le modèle mathématique pour la caractéristique courant-tension d'une cellule PV est donné par :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{V_t n}\right) - 1 \right) - \left(\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{R_{sh}} \right) \quad (I-7)$$

Avec:

$V_t = \frac{KT_c}{q}$: représentant le potentiel thermodynamique

Où I_s est le courant de saturation, K est la constante de Boltzmann ($1,38110 \times 10^{-23}$ J/K), T_c est la température effective des cellules en Kelvin(K), e est la charge de l'électron ($e=1,602 \times 10^{-19}$ C), n est le facteur d'idéalité de la jonction ($1 < n < 3$), I_{pv} est le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur, V_{pv} est la tension aux bornes de cette même cellule, I_{ph} est le photo-courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température ou bien courant de (court circuit), R_{sh} est la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction, R_s est la résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions

I.8.1 Paramètres d'une cellule photovoltaïque :

Il existe de nombreux paramètres qui permettent de caractériser une cellule solaire. Ces paramètres sont appelés paramètres photovoltaïques et sont déduits de la caractéristique $I(V)$.

➤ *Courant de court-circuit (I_{cc})*

Il s'agit du courant lorsque le potentiel appliqué à la cellule est nul. C'est le plus grand courant que la cellule peut fournir. Celui-ci est fonction de la température, de

la longueur d'onde du rayonnement, de la surface active de la cellule, de la mobilité des porteurs ce courant est linéairement dépendant de l'intensité lumineuse reçue.

➤ *Tension de circuit ouvert (V_{co})*

Comme son nom l'indique, c'est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge ou lorsqu'elle est connectée à une charge de résistance infinie. Elle dépend essentiellement du type de cellule solaire (jonction PN, jonction Schottky),

des matériaux de la couche active et de la nature des contacts de la couche active-électrode. Elle dépend de plus de l'éclairement de la cellule.

$$V_{co} = \frac{KT_c}{q} \log \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (\text{I-8})$$

Deux régimes peuvent être observés suivant le degré d'éclairement figure.

- Régime des faibles flux lumineux : dans ce cas, $I_{ph} \ll I_s$, ce qui permet d'écrire :

$$\log \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) = \frac{I_{ph}}{I_s} \quad (\text{I-9})$$

D'où :

$$V_{co} \approx \frac{K.T_c}{q} \cdot \left(\frac{I_{ph}}{I_s} \right) \quad (\text{I-10})$$

C'est la zone de comportement linéaire de la cellule. La formule précédente peut s'écrire aussi $V_{co} = R_0 \cdot I_{ph}$, en posant $R_0 = \frac{K.T_c}{q.I_s}$: R_0 est la résistance interne de la diode en polarisation externe nulle (circuit ouvert) et sous faible flux lumineux.

- Régime des flux lumineux suffisamment intenses pour que $I_{ph} \gg I_s$, soit :

$$\frac{I_{ph}}{I_s} \gg 1 \quad (\text{I-11})$$

D'où :

$$V_{co} = \frac{KT_c}{q} \log \left(\frac{I_{ph}}{I_s} \right) \quad (\text{I-12})$$

C'est le domaine du comportement logarithmique.

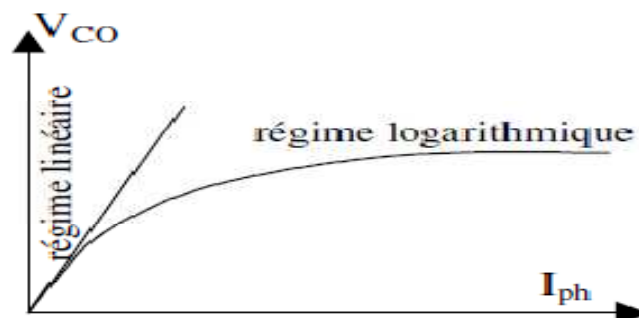


Figure I- 12: différents régimes selon la puissance d'éclairement.

Il est important de remarquer que cette tension augmente avec le log de I_{ph} , donc avec le log de l'illumination. En revanche, elle décroît avec la température, malgré le terme $\frac{KT_c}{q}$. En effet, le courant de saturation, I_s dépend de la surface de la diode (donc de la cellule) et des caractéristiques de la jonction : il varie exponentiellement avec la température et cette dépendance en température compense largement le terme $\frac{KT_c}{q}$. Donc la tension de circuit ouvert V_{co} baisse avec la température, ce qui est important dans le dimensionnement des systèmes [17].

➤ **Facteur de forme, FF**

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique I(V) pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV : c'est le facteur de remplissage ou fill factor (FF). Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{max} et la puissance formée par le rectangle $I_{cc} \cdot V_{oc}$. Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également. Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de compromis technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales [17]. Il est défini par la relation suivante:

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (\text{II-13})$$

➤ **Le rendement, η**

Le rendement, η des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente, P_{in} .

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{co}}{P_{in}} \quad (\text{II-14})$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. Le rendement de conversion est un paramètre essentiel. En effet, la seule connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule.

I.9 Conclusion :

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par la cellule photovoltaïque basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule.

L'association de plusieurs cellules en série et/ou parallèle donnent lieu à un module photovoltaïque qui a une caractéristique courant-tension non linéaire présentant un point de puissance maximale.

Les performances d'un module photovoltaïque sont fortement influencées par les conditions climatiques, particulièrement l'irradiation solaire et la température du module. Nous avons opté pour le modèle à une diode pour simuler le fonctionnement du module photovoltaïque pour différentes conditions d'irradiation et de température. Le principal intérêt de ce modèle réside dans sa simplicité et sa facilité de mise en œuvre à partir des caractéristiques techniques données par le constructeur.

II.1 Introduction :

Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule PV, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément. Selon cette philosophie plusieurs modèles électriques ont été proposés pour représenter la cellule photovoltaïque.

Dans cette partie, nous allons tenter de définir un modèle s'appliquant aux cellules photovoltaïques. Ce modèle devra rester général et la détermination de ses paramètres se fera sur bases de données fournies par les constructeurs de panneaux. Le but est ainsi d'éviter un recours, bien trop souvent nécessaire dans le cas d'installations photovoltaïques, à de nombreuses expérimentations, longues et complexes. Etant donné le nombre restreint d'informations données par les constructeurs, une grande précision ne sera pas envisageable, mais toute personne désireuse d'estimer l'intérêt d'une installation photovoltaïque pourra avoir recours à ce modèle, sans qu'une trop grande connaissance scientifique ne soit requise.

II.2 Modélisation des cellules photovoltaïques :

La modélisation des cellules photovoltaïques passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents. Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule PV il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément. Le tableau II-1 donne les caractéristiques du module PV sous les conditions standards (Masse optique: AM 1.5).

Grandeurs	Valeurs
Puissance nominale	80,37 W
Tension au MPP (V _{mp})	17,1 V
Courant de court-circuit (I _{cc})	4,96 A
Tension de circuit ouvert (V _{co})	21,9 V
Nombre de cellules en série (N _s)	32
Nombre de cellules en parallèles (N _p)	1
Coefficient de sensibilité de la tension a la température k _v	-0,77 V/K
Coefficient de sensibilité de l'intensité a la température k _i	2,06.10 ⁻³ A/K
Eclairement	1000 W/m ²
Température de la cellule	25 C°

Tableau II-1: Caractéristiques du module PV.

II.2.1 : Les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque:

Les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque seront décrites comme suit :

- Courant de court circuit (I_{cc}) qui fournit chaque cellule est :

$$I_{cc}(\text{cellule}) = \dots \quad (\text{II.1})$$

- Tension de circuit ouvert (V_{co}) de chaque cellule est :

$$V_{co} = \dots \quad (\text{II.2})$$

- Courant maximale de chaque cellule est :

$$I_{mp}(\text{cellule}) = \dots \quad (\text{II.3})$$

- Tension maximale de chaque cellule est :

$$V_{mp}(\text{cellule}) = \dots \quad (\text{II.4})$$

- Puissance maximale de chaque cellule est :

$$P_{max}(\text{cellule}) = I_{mp}(\text{cellule}) \cdot V_{mp}(\text{cellule}) \quad (\text{II.5})$$

II.2.2 : Modèle de la cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque idéale peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant I_{ph} proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode. En addition au modèle idéal, le modèle réel tient compte des propriétés résistives de la cellule qui sont modélisées par une résistance série R_s mais aussi des courants de fuites modélisés par une résistance parallèle R_p .

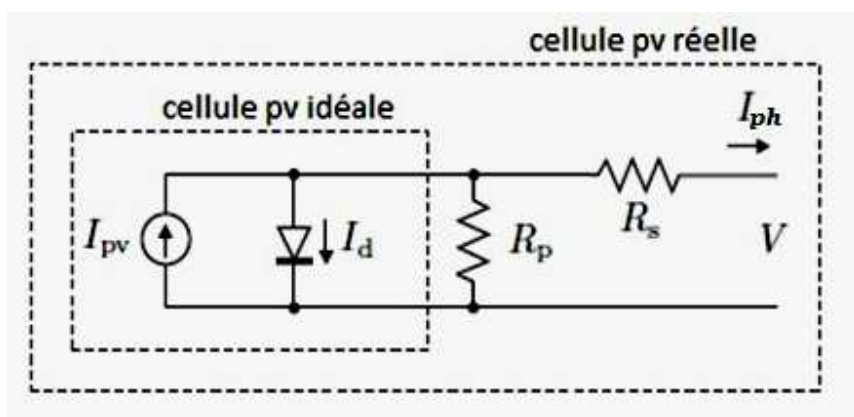


Figure II.1 : Modèle de la cellule PV.

II.2.3 Cellule photovoltaïque simplifiée :

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant I_{ph} proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode qui correspond à l'aire de transition P-N de la cellule PV. Pour un générateur PV idéal, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode.

Le schéma électrique équivalent de la cellule PV pour ce modèle est représenté sur la figure II.3.

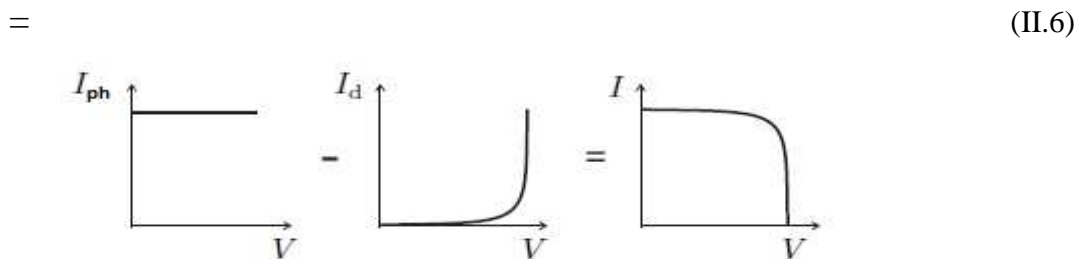


Figure II.2 : Caractéristique I - V courbe de la cellule photovoltaïque.

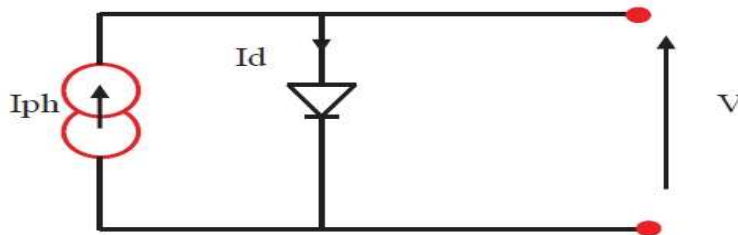


Figure II.3 : Modèle de cellule photovoltaïque simplifiée.

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

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{V}{nV_t}} - 1 \right) \tag{II.7}$$

Avec :

I_0 : Le courant de saturation inverse de la diode.

V : La tension au borne de diode.

V_t : Potentiel thermodynamique.

Donc la relation (II.6) sera :

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V}{nV_t}} - 1 \right) \tag{II.8}$$

L'équation de base (II.8) de la cellule photovoltaïque ne représente pas la caractéristique IV d'une pratique générateur photovoltaïque. Pratiquement sont composées de plusieurs cellules photovoltaïques connectés et l'observation des caractéristiques aux bornes de la matrice photovoltaïque exige l'inclusion des paramètres supplémentaires à l'équation de base.

II.2.4 Cellule photovoltaïque réelle :

Le model photovoltaïque précédent ne rendait pas compte de tous les phénomènes présents lors de la conversion d'énergie lumineuse. En effet, dans le cas réel, on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuite. On modélise donc cette perte de tension par une résistance en série R_s et les courants de fuite par une résistance en parallèle R_p [16].

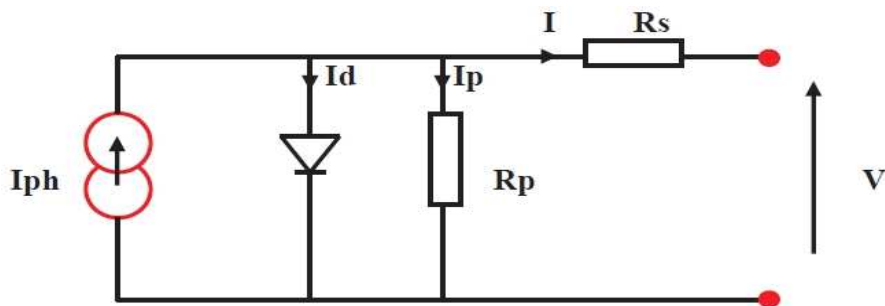


Figure II.4 : Modèle de la cellule photovoltaïque réel.

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff:

$$= \tag{II.9}$$

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

$$= \tag{II.10}$$

Le courant de la résistance de shunt est alors donné par l'expression suivante :

$$= \tag{II.11}$$

Le courant de saturation de la diode est donné par la suite:

$$I_0 = \frac{I_{cc}}{\exp\left(\frac{q}{n k t} (V + I R_s)\right)} - 1 \quad (\text{II.12})$$

Avec:

I_{cc} : Le courant fourni par la cellule

I_0 : Le courant de saturation de la diode.

K : constante de Boltzmann ($1,381 \cdot 10^{-23}$ joule/Kelvin).

q : charge d'électron = $1,602 \cdot 10^{-19}$ C.

n : Le facteur de qualité de diode.

T : La température de cellule en kelvin.

Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante

$$I = I_{cc} - I_0 \exp\left(\frac{q}{n k t} (V + I R_s)\right) \quad (\text{II.13})$$

Cette équation est originaire la courbe I-V visible sur la figure II.5, où trois points remarquable sont mis en évidence: court-circuit $(0, I_{cc})$, la puissance maximale Point (V_{mp}, I_{mp}) et en circuit ouvert $(V_{co}, 0)$.

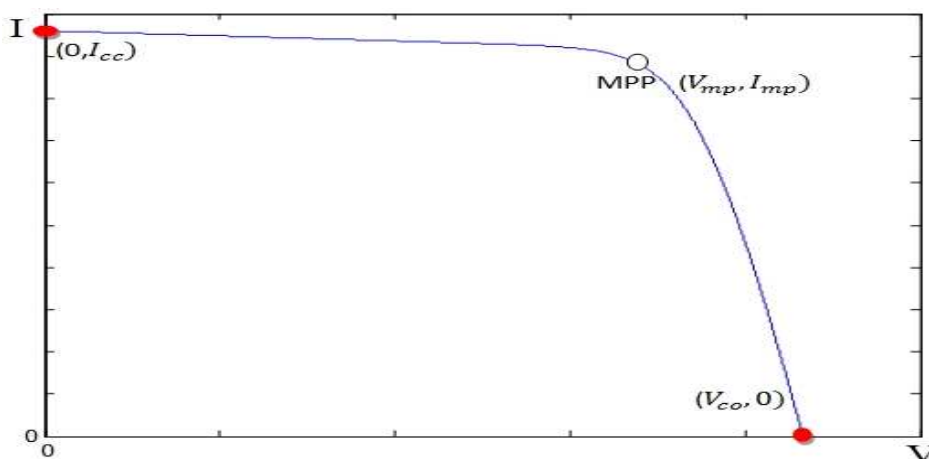


Figure II.5: Caractéristique I - V courbe d'un dispositif photovoltaïque pratique et les trois points remarquables.

II.3 Modèle amélioré :

La photopile réelle (cellule photovoltaïque réel) à une résistance série R_S dont l'influence est plus forte lorsque l'appareil fonctionne dans la région de source de tension, et une résistance parallèle R_P ayant une influence plus grande dans la région de fonctionnement en source de courant.

La caractéristique (I-V) de la photopile représentée sur la figure II.5 dépend de ses caractéristiques internes (R_S , R_P) et des facteurs externes comme l'irradiance et la température. Dans les modèles photovoltaïques, on suppose généralement que $I_{pv} \approx I_{CC}$ parce que dans la photopile réelle, la résistance série est faible et la résistance parallèle est élevée.

Le courant photonique de la cellule photovoltaïque dépend directement de l'irradiance solaire et est proportionnelle à la température d'après l'équation suivante :

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} (I_{ph_{ref}} - K_i(T_c - T_{c_{ref}})) \quad (II.14)$$

Avec:

$I_{ph_{ref}}$: Le courant photonique sous condition de référence [A]

K_i : Coefficient de sensibilité de l'intensité à la température [A/K]

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

$T_c, T_{c_{ref}}$: La température de cellule, réelle et à la condition de référence

L'équation de la dépendance à la température du courant de saturation inverse de la diode I_s , peut être exprimée par l'équation

$$I_0 = I_{0_{ref}} \left(\frac{T_c}{T_{c_{ref}}} \right)^3 \exp \left(\left(\frac{q \cdot E_{gap}}{n \cdot K} \right) \left(\frac{1}{T_{c_{ref}}} \right) - \left(\frac{1}{T_c} \right) \right) \quad (II.15)$$

Le courant de saturation I_0 des cellules photovoltaïques qui composent le dispositif dépend de la densité de courant de saturation du semi-conducteur (J_0 généralement en $A \cdot cm^{-2}$) et de la surface effective des cellules. La densité du courant J_0 dépend des caractéristiques intrinsèques de la cellule photovoltaïque, qui dépendent de plusieurs paramètres physiques comme le coefficient de diffusion d'électrons dans le semi-conducteur, la durée de vie des porteurs minoritaires, la densité des porteurs intrinsèques, etc.

Le courant de saturation nominal $I_{0_{ref}}$, peut être exprimé par l'équation (II.16):

$$I_{0_ref} = \frac{I_{CC}}{\exp(V_{CO}/nV_t)-1} \quad (\text{II.16})$$

Le dispositif photovoltaïque réel présente un comportement hybride, il peut être considéré soit comme une source de courant ou comme une source de tension selon la caractéristique I-V.

Le modèle photovoltaïque décrit précédemment peut être amélioré en remplaçant l'équation (II.16) par :

$$I_0 = \frac{I_{CC} + k_i \Delta T_c}{\exp(V_{CO} + k_v \Delta T / n V_t)} \quad (\text{II.17})$$

L'équation (II.17) est obtenue à partir de l'équation (II.16) en y introduisant les coefficients de courant et de tension K_i et K_v .

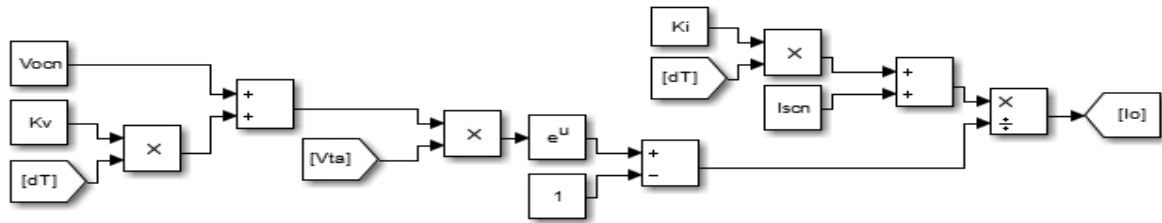
Le courant de saturation I_0 dépend fortement de la température, l'équation (II.17) propose une approche différente pour exprimer cette dépendance, de telle sorte que l'effet net de la température soit une variation linéaire de la tension en circuit ouvert selon le coefficient de tension/température pratique. Cette équation simplifie le modèle et annule l'erreur aux alentours de la tension en circuit ouvert et par conséquent, à d'autres régions de la caractéristique I-V. Le coefficient de tension/température K_v apporte des informations pour obtenir le meilleur ajustement possible des caractéristiques I-V pour différentes températures de la valeur nominale.

II.4 Simulation de la collection photovoltaïque :

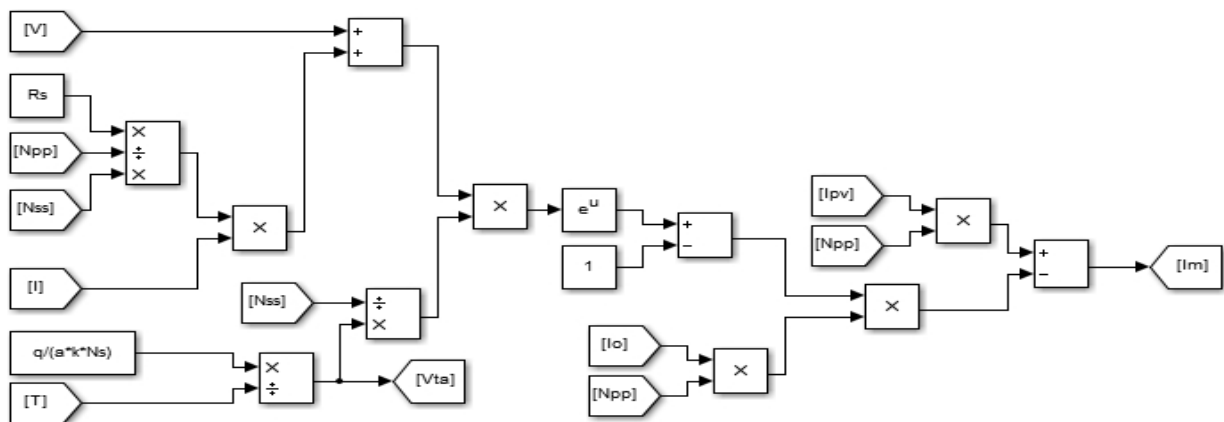
Le synoptique présenté sur la figure II.6, a été développé sous Matlab/Simulink, pour un ensemble de $N_{SS} \times N_{pp}$ modules photovoltaïques. N_{SS} et N_{pp} sont respectivement le nombre de modules photovoltaïques en série et en parallèle. Chaque module est constitué ici de NS cellules photovoltaïques assemblées en série.

De manière générale, un module peut comprendre des ensembles de cellules associés en série ou en parallèle pour augmenter respectivement la tension et l'intensité produites. Signalons également qu'un panneau solaire peut être constitué par un ensemble de modules comportant un nombre défini de cellules

• Le courant I_0 :



• le courant $I_m = I_{pv}$:



• Le courant I_{ph} :

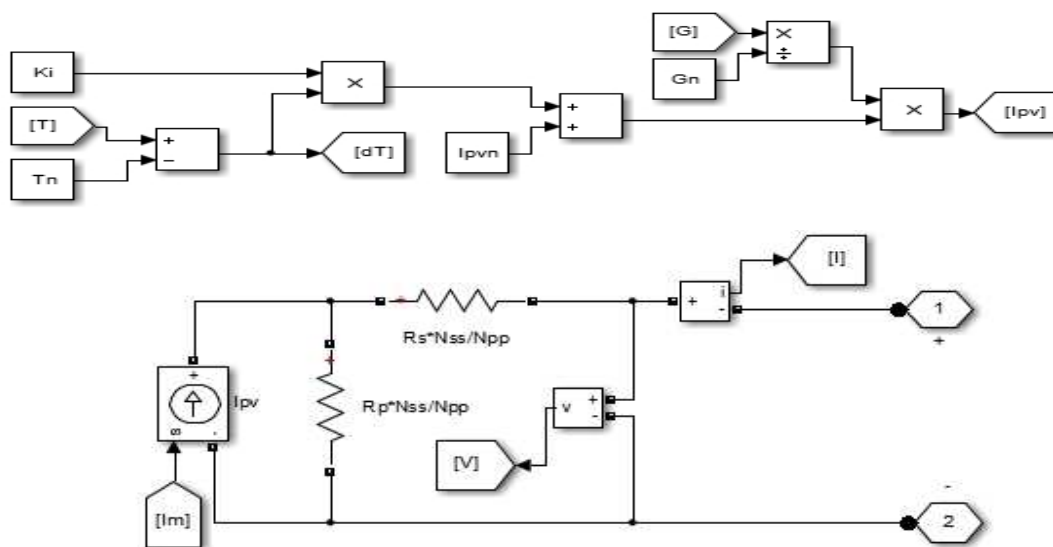


Figure II.6 Synoptique du modèle amélioré de la cellule photovoltaïque sous le logiciel MATLAB/Simulink

II.4.1 Caractéristiques courant-tension et puissance-tension du modèle :

La Figure II.7 représente la caractéristique courant-tension $I(V)$ et puissance-tension $P(V)$ d'une cellule photovoltaïque en utilisant le modèle sous conditions standards.

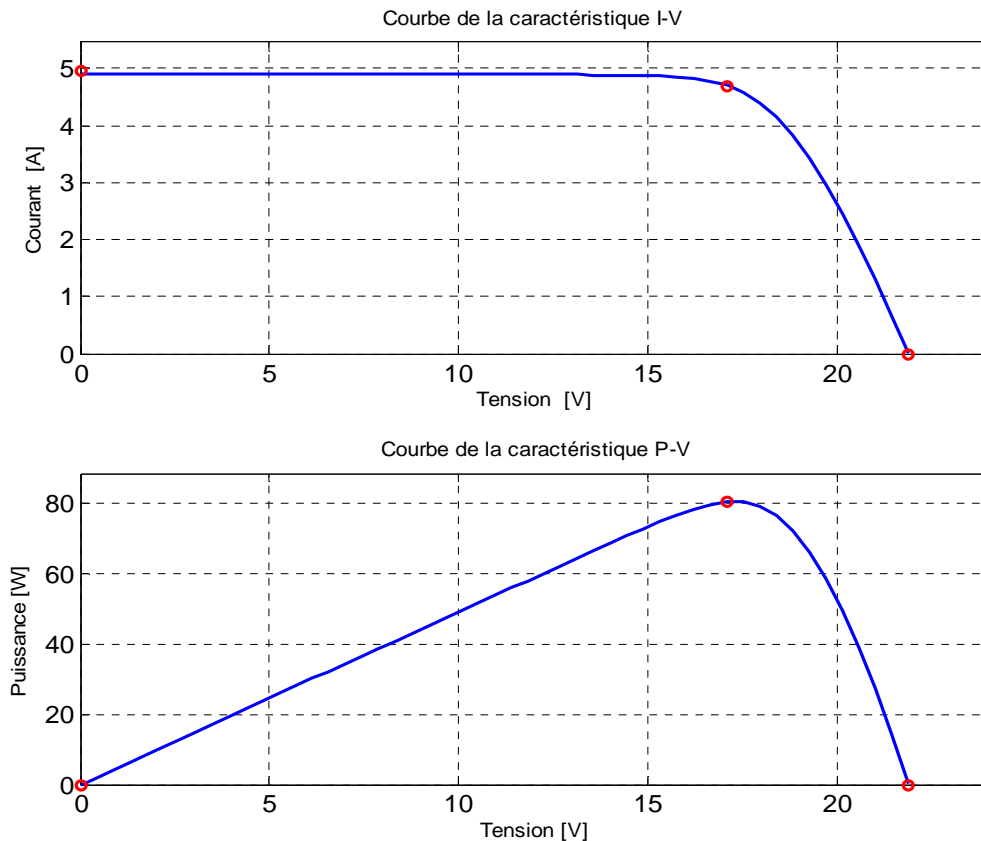


Figure II.7: Caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ d'une cellule photovoltaïque

II.5 Influence de la température et de l'éclairement :

La caractéristique d'une cellule PV (ou d'un générateur PV) est directement dépendante de l'éclairement et de la température.

II.5.1 Influence de la température :

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules solaires. La température a également une influence sur la caractéristique d'un générateur PV. La figure II.8 et figure II.9 présente la variation des caractéristiques d'une cellule PV en fonction de la température à un éclairement donné. L'éclairement est ici fixé à $1000\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$.

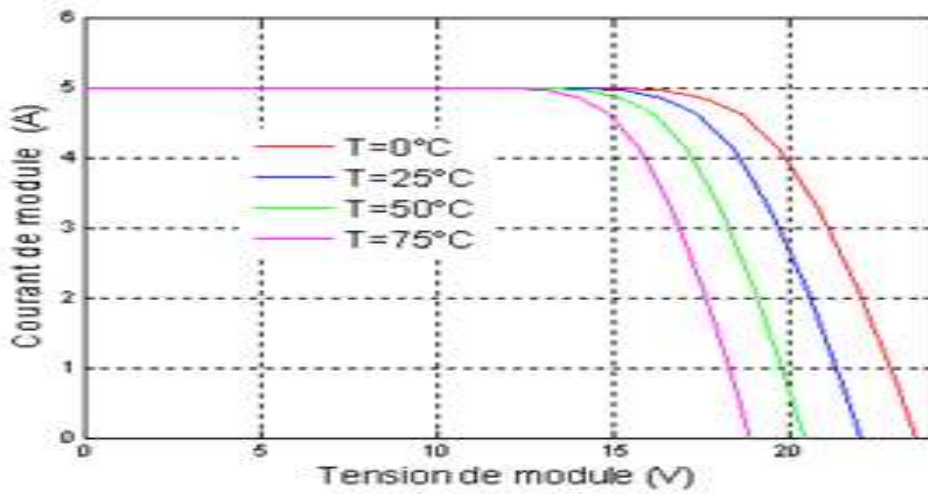


Figure II.8 : Influence de la température sur la caractéristique courant-tension

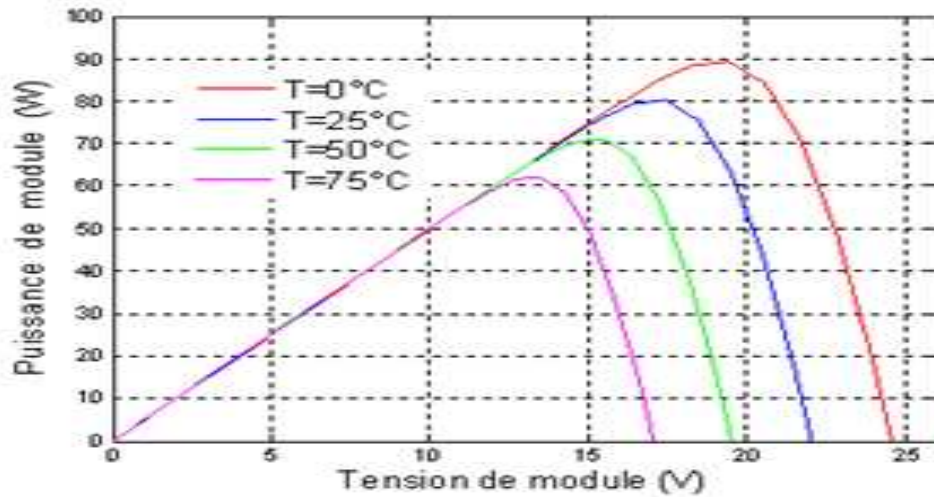


Figure II.9 : Influence de la température sur la caractéristique puissance-tension.

L'équation de Boltzmann donne :

$$I_{cc} = I_0 \exp\left(\frac{qV_0}{kT}\right) \quad (\text{II.18})$$

L'expérience montre que la tension de circuit ouvert d'une cellule solaire diminue avec l'augmentation de la température de la cellule [13,14].

Nous remarquons que la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert (Plus la température est élevée plus V_{co} est faible et le courant de court-circuit I_{cc} augmente avec la

température). Et par contre la puissance maximale du générateur subit une diminution lorsque la température augmente.

II.5.2 Influence de l'éclairement :

Les variations du courant et de la puissance en fonction de la tension pour différents niveaux d'éclairements à température maintenue constante 25°C, figure II.10 et figure II.11, montrent clairement l'existence de maxima sur les courbes de puissance correspondant aux Points de Puissance Maximale P_{max} . Lorsque l'irradiation varie pour une température donnée, le courant de court-circuit I_{cc} varie proportionnellement à l'irradiation. Dans un même temps, la tension de circuit ouvert V_{co} (à vide) varie très peu.

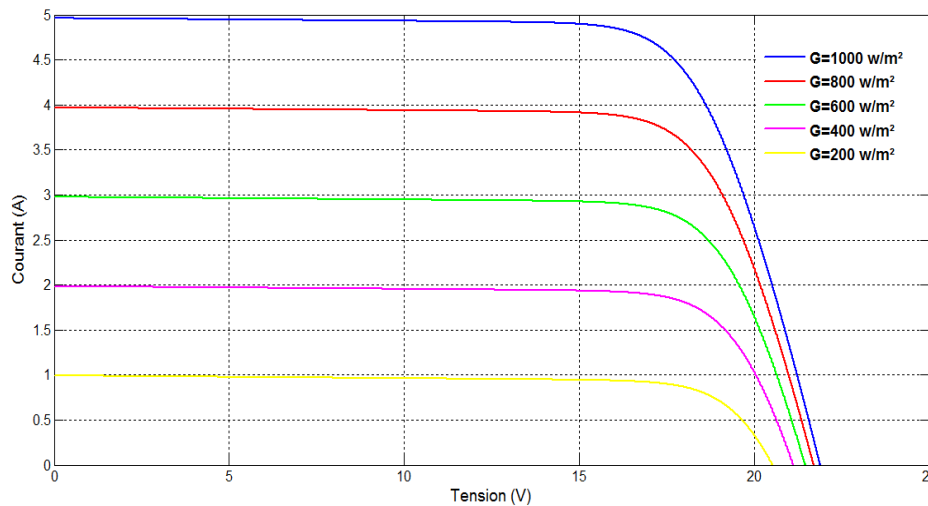


Figure II.10 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique courant-tension.

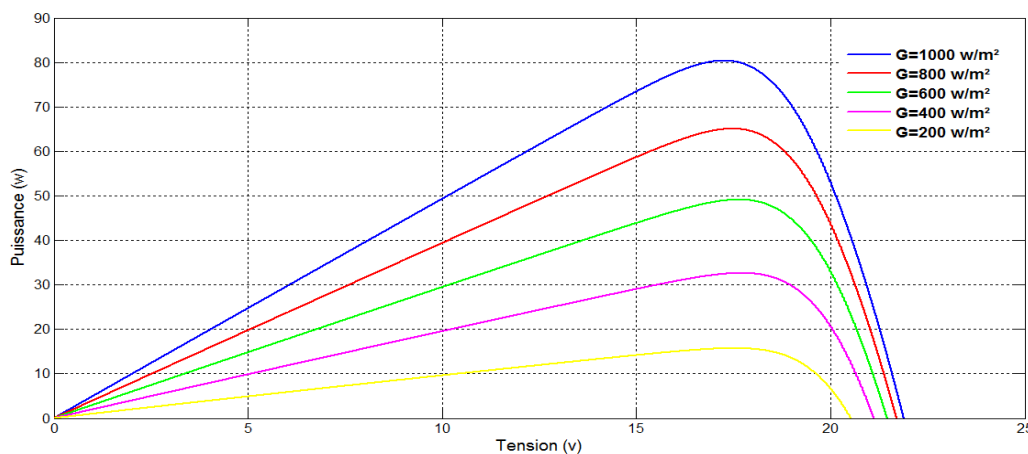


Figure II.11 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique puissance-tension

II.5.3 Influence de résistance série :

Les figures II.12 et II.13 montrent l'influence de la résistance série sur la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ de la cellule photovoltaïque.

La résistance série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone où la photodiode se comporte comme un générateur de tension. Elle ne modifie pas la tension du circuit ouvert, et lorsqu'elle est élevée, elle diminue la valeur de courant de court circuit.

L'augmentation de la résistance série se traduit par une diminution de pente de la courbe de puissance.

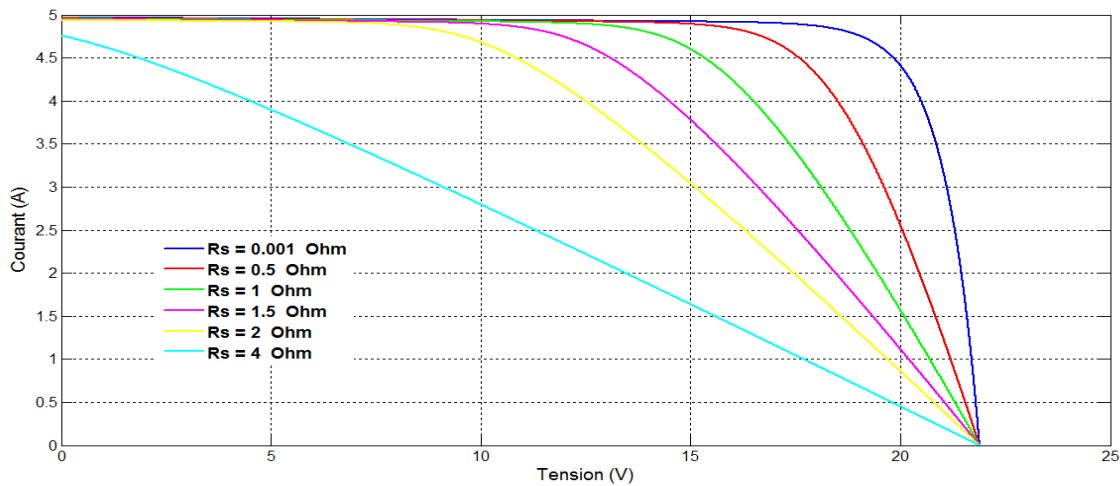


Figure II.12 : Influence de résistance série la caractéristique courant-tension

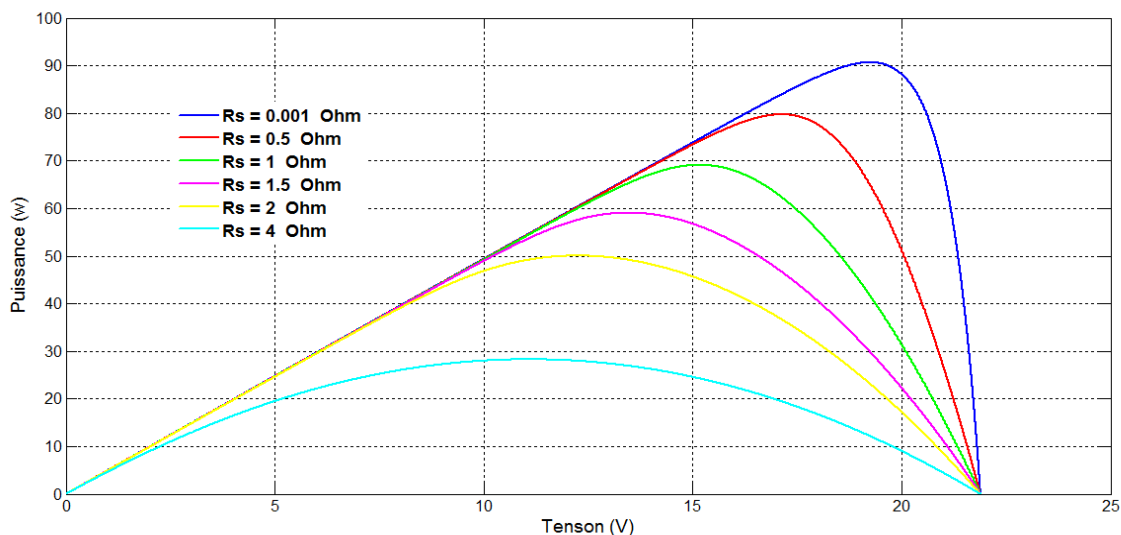


Figure II.13 : Influence de résistance série la caractéristique puissance-tension

II.5.4 Influence de la résistance shunt :

La résistance shunt est une résistance qui prend en compte les fuites inévitables du courant qui intervient entre les bornes d'une photopile. En générale, la résistance shunt est très élevée, son effet se fait sentir surtout dans la partie génération de courant.

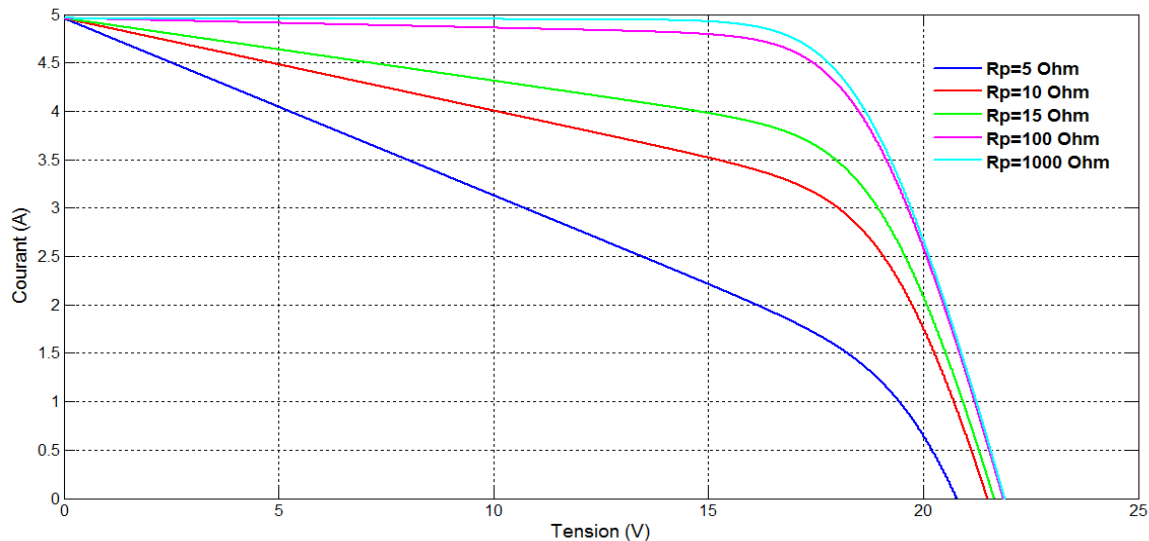


Figure II.14 : Influence de la résistance shunt sur la caractéristique courant-tension.

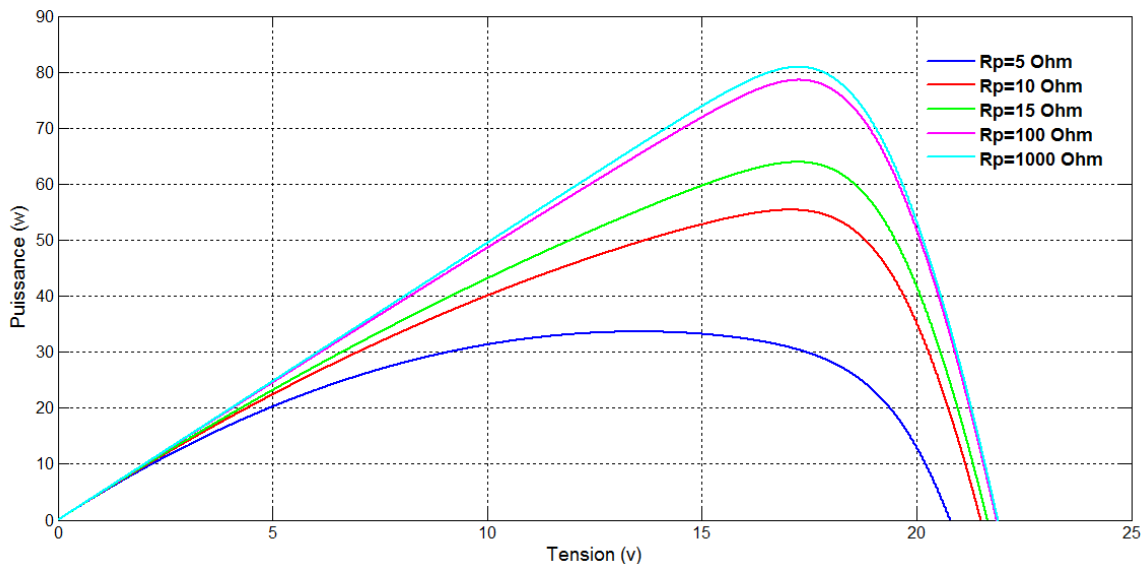


Figure II.15 : Influence de la résistance shunt sur la caractéristique puissance-tension.

L'influence de la résistance parallèle (shunt) sur la caractéristique courant-tension se traduit par une légère diminution de la tension de circuit ouvert, et une augmentation de la

penne de la courbe $I-V$ de la cellule dans la zone correspondante à un fonctionnement comme une source de courant.

Ceci provient du fait qu'il faut soustraire du photo-courant, outre le courant direct de diode, un courant supplémentaire variant linéairement avec la tension développée. La puissance fournie par une cellule solaire varie avec sa résistance parallèle, plus cette résistance est élevée plus la puissance fournie est importante.

II.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté des caractéristiques électriques fondamentales d'une cellule photovoltaïque (module photovoltaïque). Nous avons vu que la cellule PV présente une caractéristique $I(V)$ non linéaire, présente un point de puissance maximal (PPM) caractérisé par un courant (I_{max}) et une tension (V_{max}) et qu'elle peut être modélisée par un circuit électrique simple. Nous avons présenté l'influence des différents paramètres extérieurs sur cette caractéristique. Le courant de court-circuit évolue principalement avec l'éclairement et la tension à vide avec la température.

Les performances d'une cellule photovoltaïque sont d'autant plus dégradées que R_s est grande ou que R_p est faible.

III.1 Introduction :

La conception d'un étage d'adaptation permet aujourd'hui de relier aisément un générateur photovoltaïque (GPV) à une charge de type continue (DC), avec un rendement de conversion très élevé. En fait, le concept de cet étage correspond à la modélisation des fonctions basiques idéalisées d'un convertisseur à découpage continu-continu (DC/DC). Ce concept est nommé ainsi à cause des liens que le convertisseur crée entre ses quatre grandeurs électriques sur les ports d'entrée et de sortie qui sont ses courants et ses tensions d'entrée et de sortie.

Un générateur photovoltaïque présente des caractéristiques I-V non linéaires avec de point de puissance maximum PPM. Ces caractéristiques dépendent entre autre du niveau d'éclairement et de la température de la cellule. De plus, selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le GPV débite, nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode connexion directe.

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du générateur photovoltaïque et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge comme décrit dans la figure III.1.

Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de puissance maximale disponible.

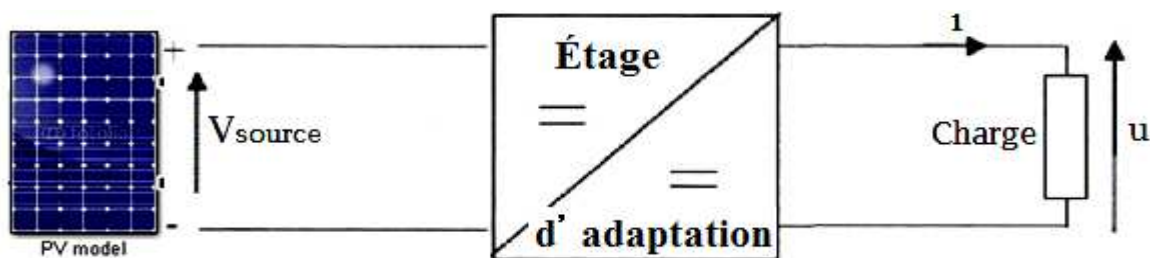


Figure III.1 : Étage d'adaptation entre un GPV et une charge.

III.2 Introduction d'un étage d'adaptation :

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

Il existe plusieurs types de convertisseurs DC-DC nous citons :

- Convertisseur BUCK (hacheur série).
- Convertisseur BOOST (hacheur parallèle).
- Convertisseur BUCK-BOOST (hacheur série- parallèle).

La topologie Buck est employée pour les faibles tensions. Dans les applications PV, le convertisseur Buck est habituellement employé comme chargeur de batteries et dans des systèmes de pompage de l'eau.

La topologie Boost est employée pour augmenter la tension. Les systèmes de production de l'énergie emploient un convertisseur BOOST pour augmenter la tension de sortie au niveau du service avant l'étage de l'onduleur. Puis, il y a des topologies capables d'augmenter et de diminuer la tension telles que le BUCK-BOOST. Les convertisseurs DC-DC peuvent être vus comme des transformateurs DC-DC.

Le présent travail est basé sur le convertisseur BOOST.

III.3 Le Convertisseurs DC-DC :

Le convertisseur BOOST est connu par le nom d'élévateur de tension peut être représenté par le circuit donne par la Figure III.2.

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K_1 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).

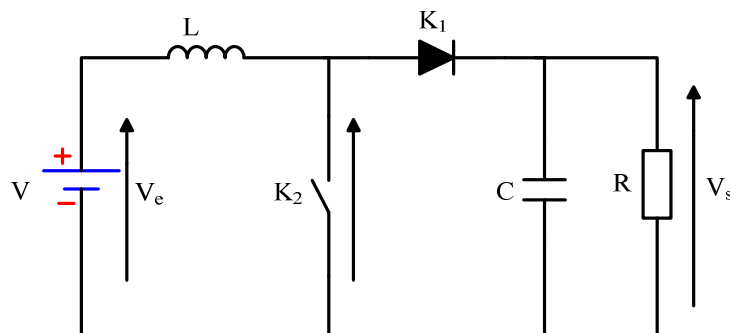


Figure III.2 : Le convertisseur BOOST.

III.3.1 Le Principe de fonctionnement du hacheur BOOST :

Déterminer le comportement réel de ce convertisseur, nécessite de connaître en détail son modèle mathématique.

Pour cela nous devons faire la représentation du circuit équivalent par les deux états du commutateur et de tirer par la suite le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/sortie. La figure III.3 montre les schémas des circuits équivalents d'un convertisseur survolteur dans les deux cas : l'interrupteur fermé pendant αT et l'interrupteur ouvert pendant $(1 - \alpha) T$.

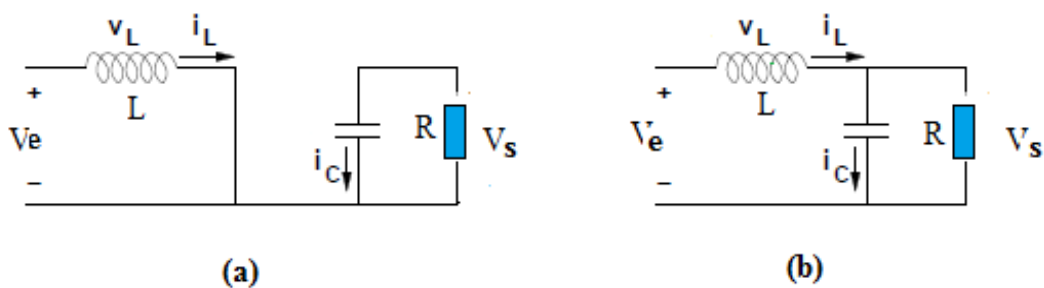


Figure III.3 (a) : Diagramme BOOST en position 1 et (b) diagramme BOOST en position 2

En appliquant les lois de Kirchhoff sur les deux circuits de la figure III.3, on obtient les systèmes d'équations suivants :

- De $[0 \text{ à } \alpha T]$ (état passant) : le MOSFET est en position 1, l'inductance stocke le courant provenant de la source et la capacité maintient la tension de sortie utilisant l'énergie précédemment stockée. Pendant ce temps le courant I_L augmente suivant l'équation suivante : Pour la première période αT :

$$V_e = V_L \quad (\text{III.1})$$

$$I_c = I_L = \frac{V_s}{R} \quad (\text{III.2})$$

- De $[DT \text{ à } T]$ (état bloqué) : le MOSFET est en position 2, Lorsque l'interrupteur s'ouvre, l'interruption de courant dans l'inductance provoque une surtension qui s'ajoute à celle du condensateur.

$$V_L = V_e - V_s \quad (\text{III.3})$$

$$I_c = I_L - I_s = I_L - \frac{V_s}{R} \tag{III.4}$$

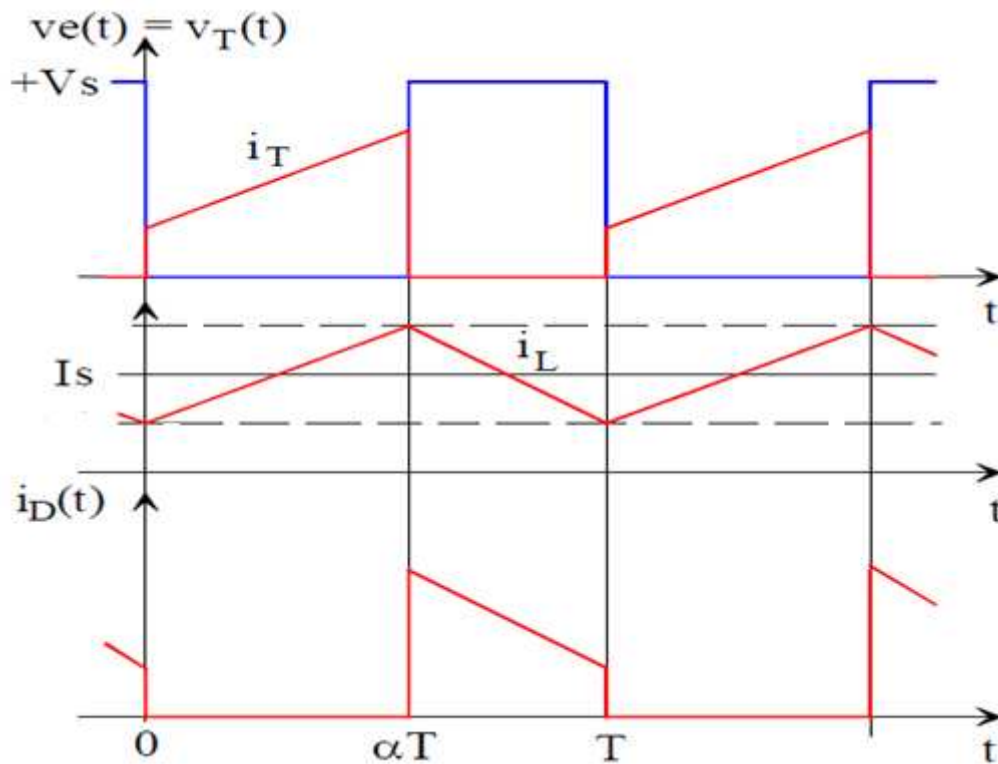


Figure III.4: Signaux typiques de convertisseur BOOST.

Dans un convertisseur bien conçu dans l'état d'équilibre il devrait n'y avoir aucun entraînement significatif sur l'intensité et la tension pendant une période de commutation. Par conséquent, il est supposé que l'ondulation de commutation est beaucoup plus petite que le DC composantes du courant et de la tension. Cela signifie que le courant et la tension sont les mêmes au début et à la fin d'une période de commutation. C'est la petite approximation d'entraînement et il mène aux suivantes expressions de la tension de l'inducteur et le courant condensateur pendant une période de commutation T .

$$\begin{cases} \int_0^T V_L dt = 0 \\ \int_0^T I_c dt = 0 \end{cases} \tag{III.5}$$

Par conséquent, les expressions de la tension d'inductance et le courant du condensateur dans les deux cas de commutation sont évaluées et considéré sur une période de commutation.

$$I_L = \frac{V_s}{R} \frac{1}{1-\alpha} \tag{III.6}$$

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

Cependant il est important de dimensionner l'inductance et la capacité pour obtenir les performances données par la figure suivante afin de calculer la valeur de l'inductance.

III.3.2 Détermination des paramètres du hacheur Boost :

L'inductance de lissage L est utilisée pour limiter l'ondulation du courant dans le convertisseur et dans la source V_e . Le condensateur de filtrage permet de limiter les ondulations de tension dues au découpage en sortie du convertisseur.

➤ Calcul de l'inductance L

L'ondulation de courant dans l'inductance est calculée en considérant la tension de sortie continue, c'est-à-dire en négligeant l'ondulation de tension vis-à-vis de la valeur moyenne.

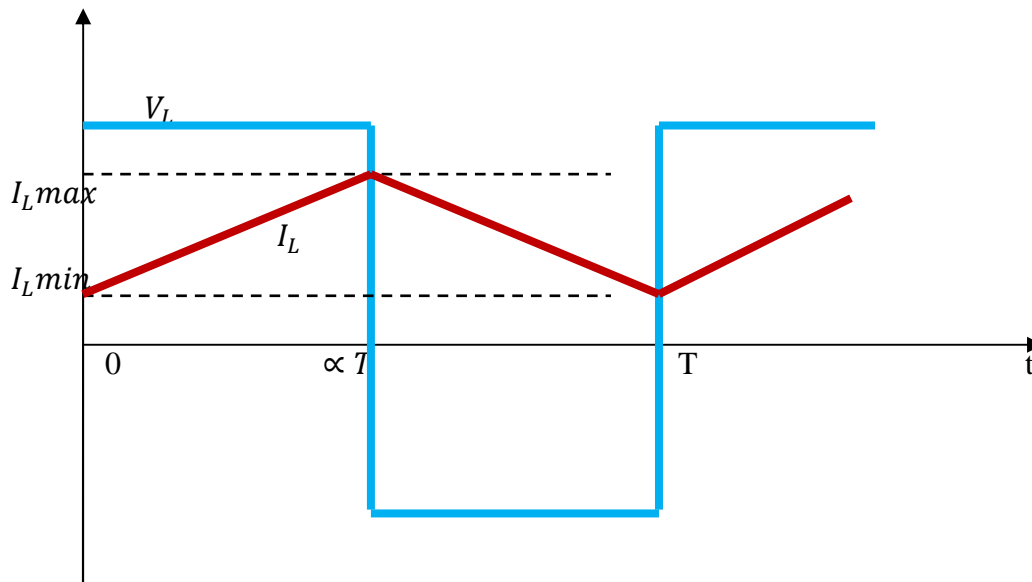


Figure III.5 : Ondulation du courant

Calculons l'ondulation du courant :

Pour $0 \leq t \leq \alpha T$:

$$V_L(t) = \frac{V_e}{L} + I_L \min \quad (\text{III.8})$$

En $t = \alpha T$,

$$I_L(\alpha T) = \frac{V_e}{L} \alpha T + I_L \min = I_L \max \quad (\text{III.9})$$

D'où :

$$\Delta I_L = I_L \max - I_L \min = \frac{V_e}{L f_p} \alpha \quad (\text{III.10})$$

Or :

$$V_s = \frac{V_e}{1-\alpha} \quad (\text{III.11})$$

Nous pouvons donc écrire :

$$\Delta I_L = \frac{\alpha(1-\alpha)}{Lf_p} V_S \quad (\text{II.12})$$

Où :

V: tension aux bornes du générateur(V).

V_S : Tension de sortie du convertisseur(V).

T : période de découpage du signal de l'interrupteur $T = \frac{1}{f_p}$ en secondes (s).

$I_L \min$: Courant minimum dans l'inductance(A).

$I_L \max$: Courant maximum dans l'inductance(A).

ΔI_L : Ondulation de courant dans l'inductance(A)

L : Valeur de l'inductance de lissage (H).

α : Rapport cyclique du signal de l'interrupteur $\alpha = \frac{t_{on}}{T}$.

L'ondulation est calculée en fonction de l'ondulation maximale de courant souhaitée

L'ondulation maximale de courant est donc donnée par :

$$\Delta I_L \max = \frac{V_S}{4Lf_p} \quad (\text{III.13})$$

Ainsi l'inductance minimale pour un hacheur survolteur est donnée par la relation :

$$L = \frac{V_S}{4f_p \Delta I_L \max} \quad (\text{III.14})$$

➤ Calcul du condensateur C

Ce condensateur doit pouvoir tenir le courant à fournir lors des pics de puissance. L'ondulation de tension en sortie résulte du courant alternatif dans le condensateur.

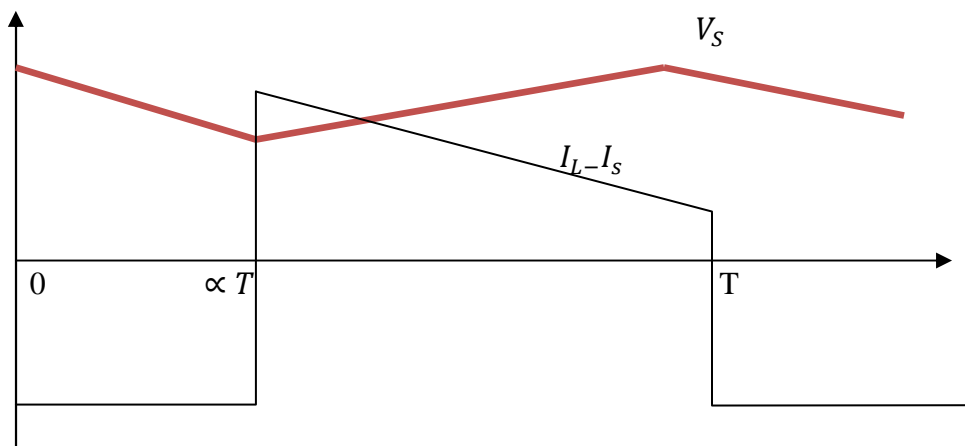


Figure III.6 : ondulation de tension.

Calculons l'ondulation de la tension :

Pour $0 \leq t \leq \alpha T$:

$$V_S(t) = V_S \max - \frac{I_S}{C} t \quad (\text{III.15})$$

En $t = \alpha T$:

$$V_S(\alpha T) = V_S \max - \frac{I_S}{C} t = V_S \min \quad (\text{III.16})$$

D'où :

$$\Delta V_S = V_S \max - V_S \min = \frac{I_S}{C f_p} \alpha \quad (\text{III.17})$$

Or :

$$I_S = \frac{I_L}{1-\alpha} \quad (\text{III.18})$$

Nous pouvons donc écrire :

$$\Delta V_S = \frac{\alpha(1-\alpha)}{C f_p} I_L \quad (\text{III.19})$$

Où :

C : valeur du condensateur de filtrage (F).

$V_S \min$: Tension minimum aux bornes de condensateur (V).

$V_S \max$: Tension maximum aux bornes de condensateur (V).

ΔV_S : Ondulation de tension aux bornes de condensateur (V).

La capacité du condensateur est calculée en fonction de l'ondulation maximale de la tension souhaitée.

L'ondulation maximale de tension est obtenue pour un rapport cyclique de $\frac{1}{2}$ (car $\frac{d\Delta V_S}{d\alpha} = 0$ pour $\alpha = \frac{1}{2}$).

L'ondulation maximale de la tension est donnée par

$$\Delta V_S = \frac{I_L}{4 C f_p} \quad (\text{III.20})$$

Ainsi la capacité minimale pour un hacheur survolteur est donnée par la relation :

$$C = \frac{I_L}{4 f_p \Delta V_S \max} \quad (\text{III.21})$$

III.3.3 : 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 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 des 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 [18].

III.4 : Simulation du hacheur parallèle

Pour montrer le rôle des convertisseurs (BOOST) nous avons utilisé logiciel Matlab pour la simulation Figure III.7

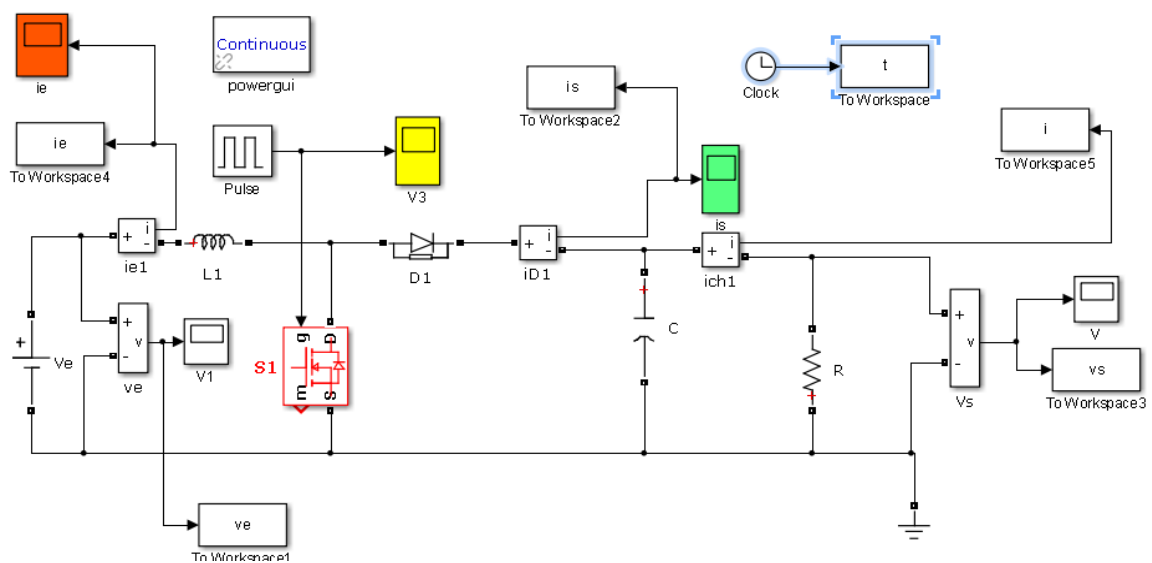


Figure III.7: schéma bloc de simulation du convertisseur BOOST

Le résultat de simulation du convertisseur survolteur de la figure III.8 et 9 est obtenu à l'aide du modèle mathématique sous Matlab/Simulink, Figure III. 7.

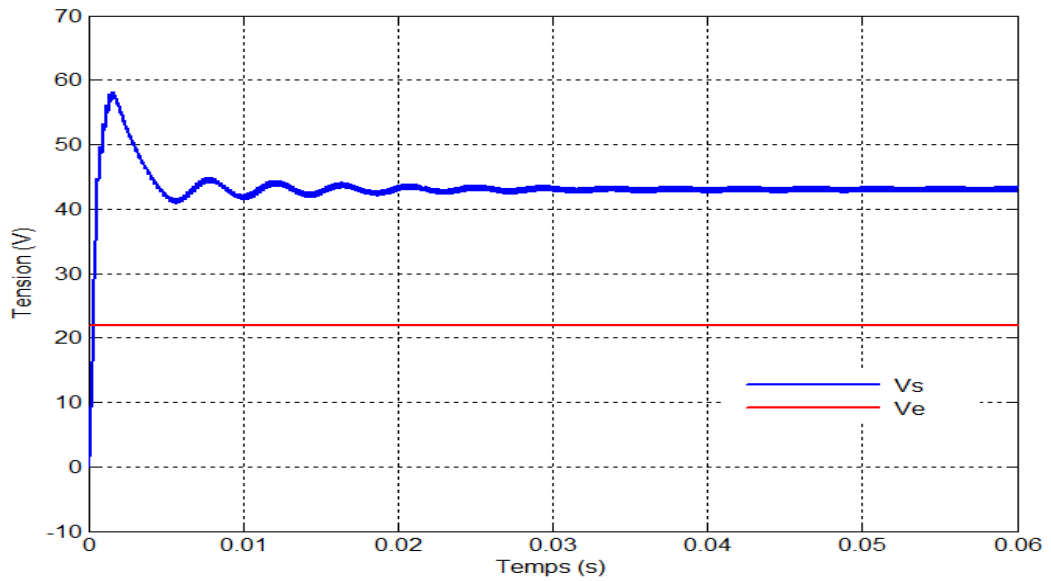


Figure III.8 : Tensions de sortie du convertisseur BOOST

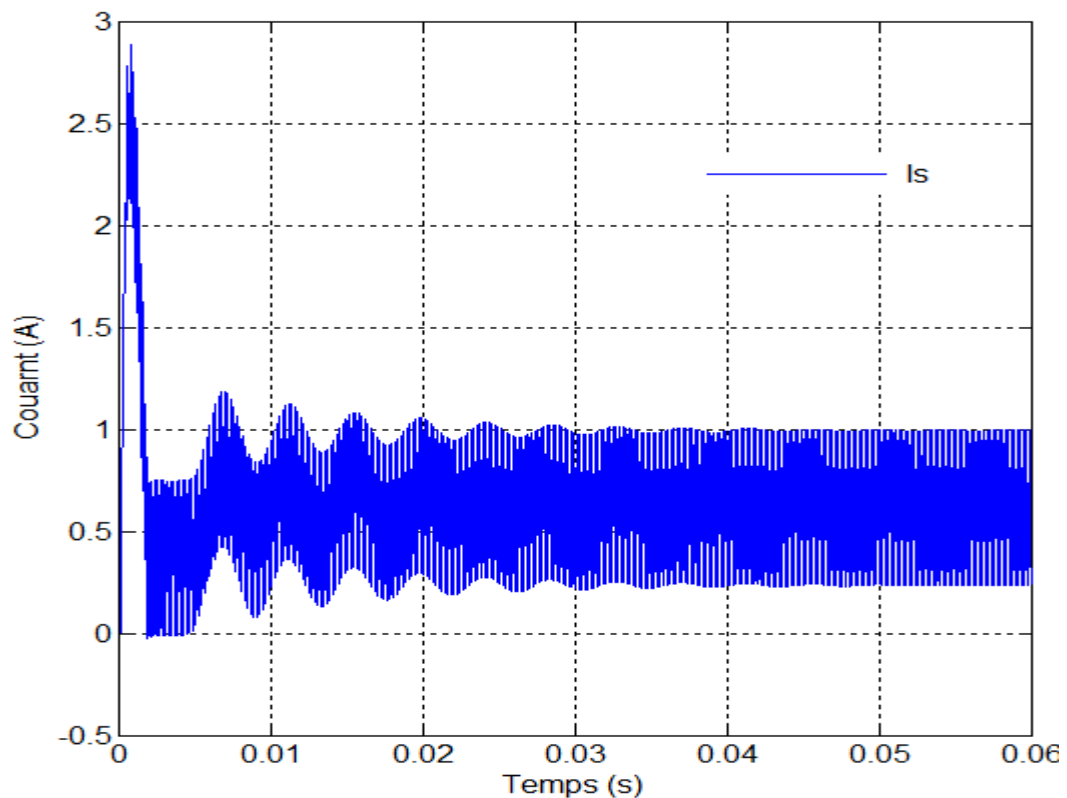


Figure III.9 : courant de sortie du convertisseur BOOST.

On remarque que la tension de sortie ne pas le même que l'entrée ce qui exprime le rôle de convertisseur élévateur (BOOST).

III.5 Le fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque :

Dans un système électrique comprenant une source et une charge, la recherche du point de fonctionnement optimal par des techniques d'optimisation représente ce qui est le plus important. Dans le cas du photovoltaïque, cette démarche est plus complexe du fait que la caractéristique des cellules dépend fortement de l'ensoleillement et de la température ambiante, entre autres. Il faut trouver un dispositif permettant de fonctionner à tout moment suivant le point de fonctionnement optimal. Ces dernières années plusieurs dispositifs ont été développés, aussi élaborés les uns que les autres. Dans la référence, les auteurs passent en revue les différentes méthodes de maximisation de puissance classées en deux catégories : les méthodes indirectes et les méthodes directes.

Pour le cas de sources énergétiques, cela se traduit par des points de puissance maximum. Ce type de commande est souvent nommé dans la littérature (Recherche du Point de Puissance Maximum) ou bien (*Maximum Power Point Tracking*) en anglo-saxon (MPPT). Le principe de ces commandes est d'effectuer une recherche du point de puissance maximal (PPM) tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance. [19 ,20].

III.6 Principe de la recherche du point de puissance maximal :

III.6.1 Généralités :

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 III.10) représente la trajectoire du point de puissance maximale produite par le générateur.

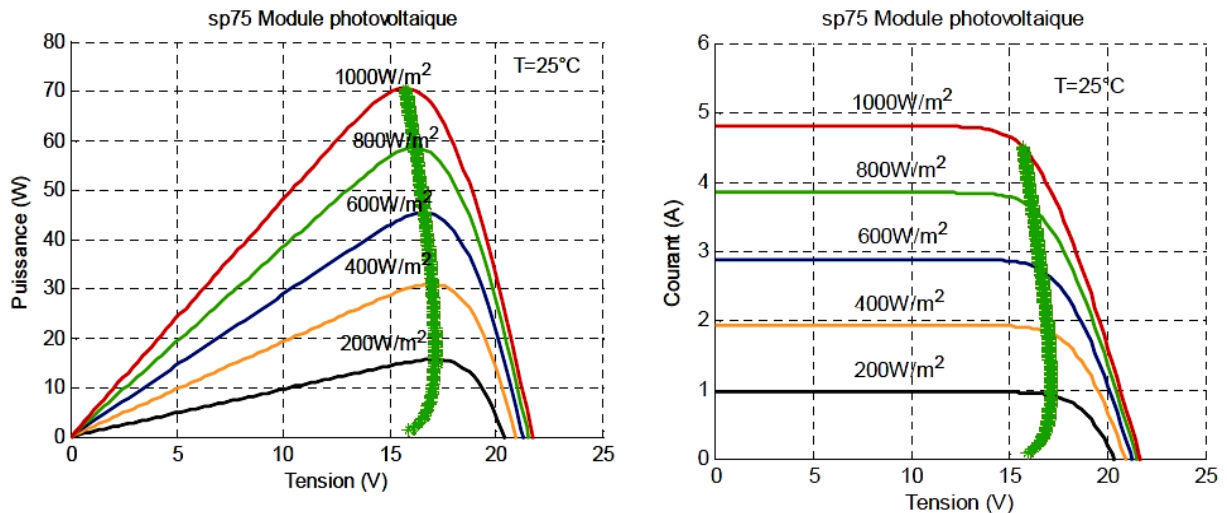


Figure III.10 : La caractéristique I-V, P-V et la trajectoire de PPM

La figure III.11 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 associé [21].

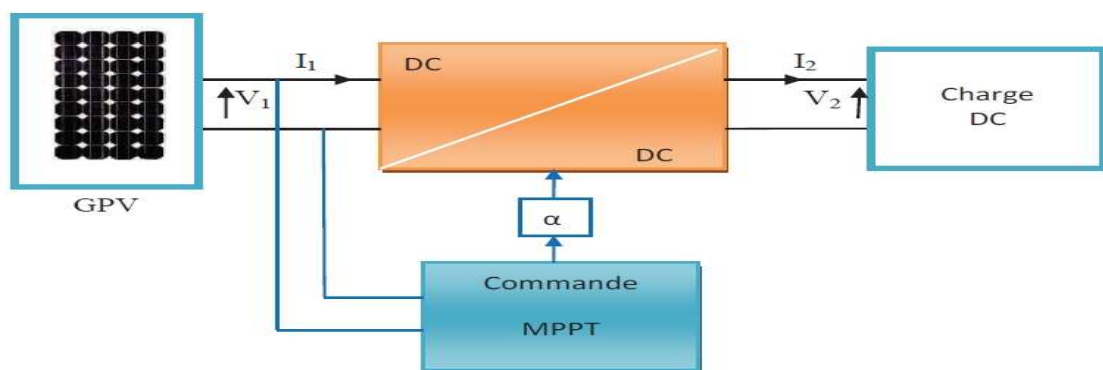


Figure III.11 : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.

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 basées sur des méthodes optimales [19].

III.7 Gestion de la MPPT :

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

Dans ce cas est pour une variation d'ensoleillement il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2. Dans le cas b pour une variation de charge on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande. Enfin dans le dernier cas c de variation de point de fonctionnement peut se produire lié aux variations de température de fonctionnement du GPV .Bien qu'il faut également agir au niveau de la commande [23].

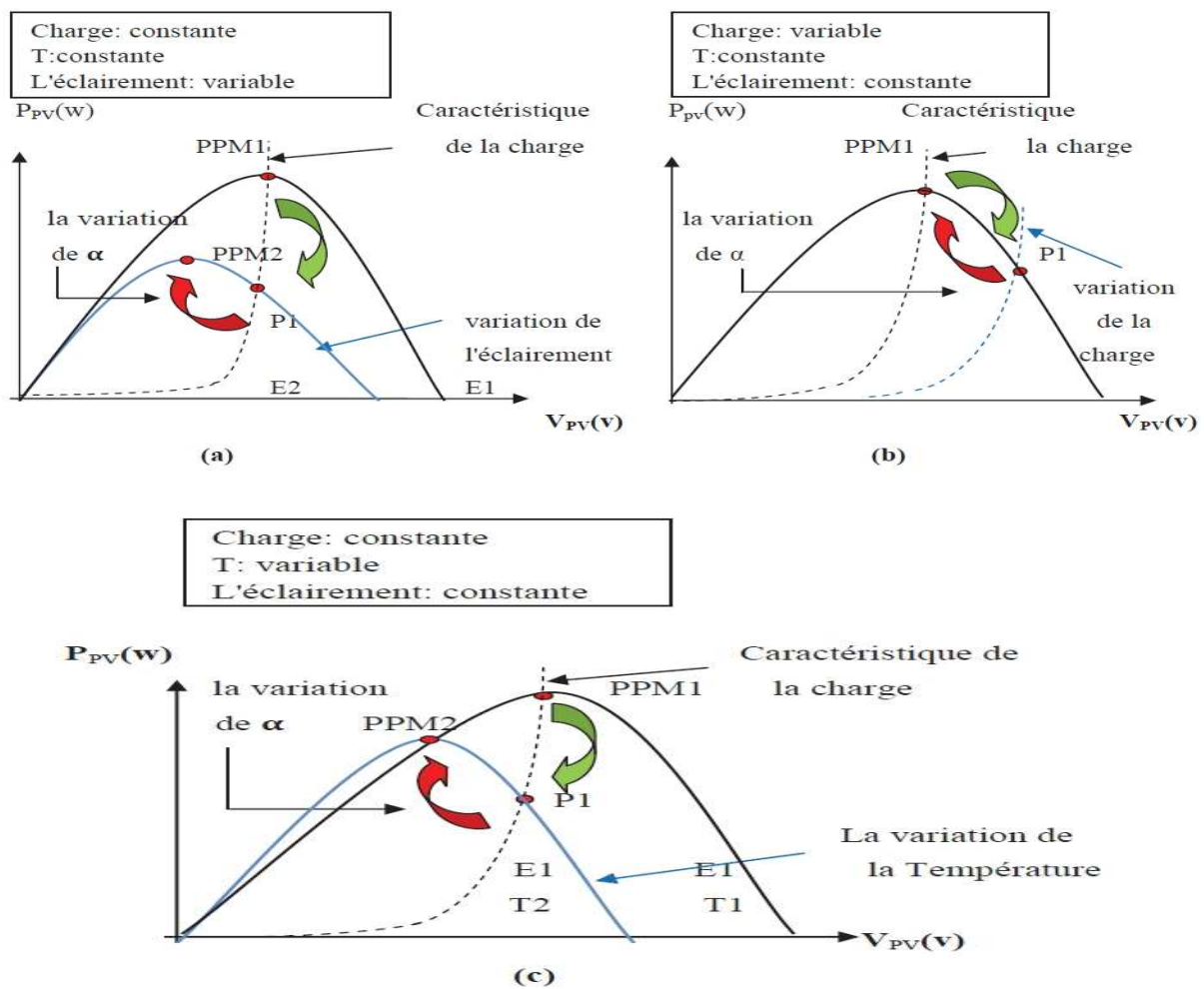


Figure III.12 : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale a) suite à une variation d'éclairement, b) suite à une variation de charge, c) suite à une variation de température

III.8 Synthèse des différentes MPPT rencontrées dans la littérature :

Diverses publications sur les commandes assurant un fonctionnement de type commande MPPT apparaissent régulièrement dans la littérature depuis 1968, date de publication de la première loi de commande de ce genre, adaptée à une source d'énergie renouvelable de type photovoltaïque [23]. Etant donné le grand nombre de publications dans ce domaine, nous avons fait une classification des différentes MPPT existantes en les regroupant selon leur principe de base. La classification, en plus du principe, s'est effectuée selon des critères comme la précision de la recherche ou sa rapidité pour en faire une évaluation comparative. Seuls les algorithmes qui nous semblent décrire une méthode de recherche spécifique sont reportés dans ce manuscrit et brièvement analysés.

III.8.1 Les premiers types de commande MPPT :

L'algorithme mis en œuvre dans les premières commandes MPPT était relativement simple. En effet, les capacités des microcontrôleurs disponibles à l'époque étaient faibles et les applications, surtout destinées au spatial avaient beaucoup moins de contraintes en variation de température et d'éclairement que les applications terrestres. Appliqué initialement au photovoltaïque, son principe a d'abord été décrit par A.F. Boehringer [23]. Cette commande est basée sur un algorithme de contrôle adaptatif, permettant de maintenir le système à son point de puissance maximum (PPM). Ce dernier est décrit en figure III.13 et peut être implanté entièrement en numérique.

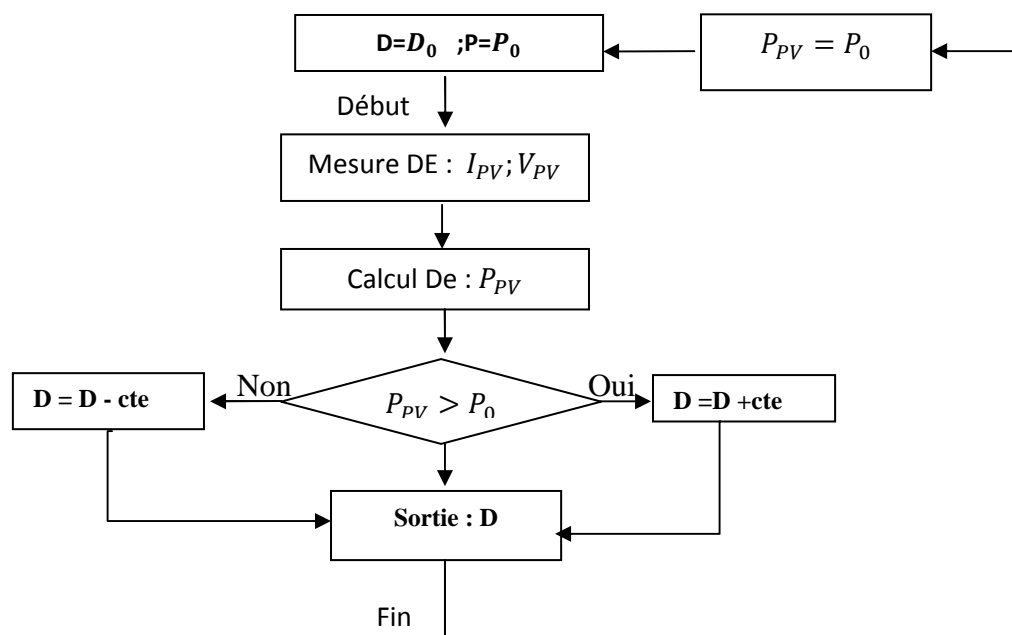


Figure III.13 : Principe de la première commande MPPT numérique [23].

Il consiste à calculer la puissance à l'instant t_i à partir des mesures de I_{PV} et V_{PV} , et de la comparer à celle stockée en mémoire, correspondant à l'instant t_{i-1} . De là, un nouveau rapport cyclique D est calculé et est appliqué au convertisseur statique. Ce principe est toujours valable du point de vue théorique et appliqué de nos jours sur des algorithmes numériques plus performants. Cependant, le temps de réaction a été amélioré ainsi que la précision de la recherche du PPM associée à un certain nombre de précautions pour ne pas perdre le PPM même temporairement.

III.8.2 Les commande MPPT à algorithmes performants :

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

III.9 Principe des commandes "Perturb and Observe" (P&O) :

Le principe des commandes MPPT de type *P&O* consiste à perturber la tension V_{PV} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{PV} qui en résulte [21-22]. Ainsi, comme l'illustre la figure 2.13, on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{PV} engendre un accroissement de la puissance P_{PV} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P_{PV}(V_{PV})$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié.

En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM.

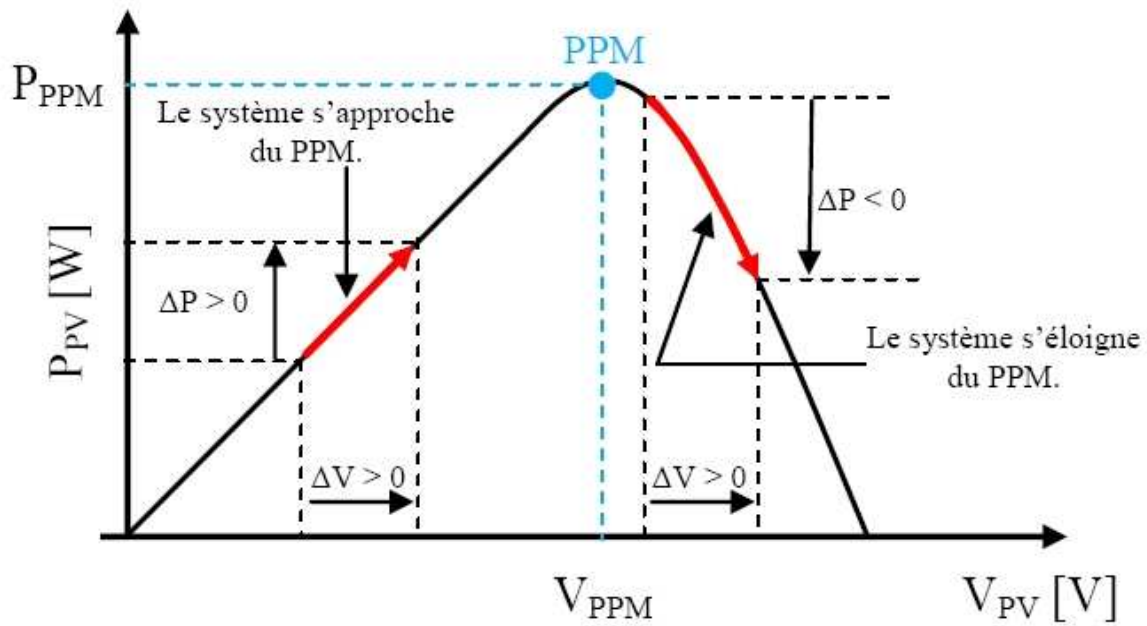


Figure III.14 : Caractéristique $P_{PV}(V_{PV})$ d'un panneau solaire.

La figure III.15 représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant.

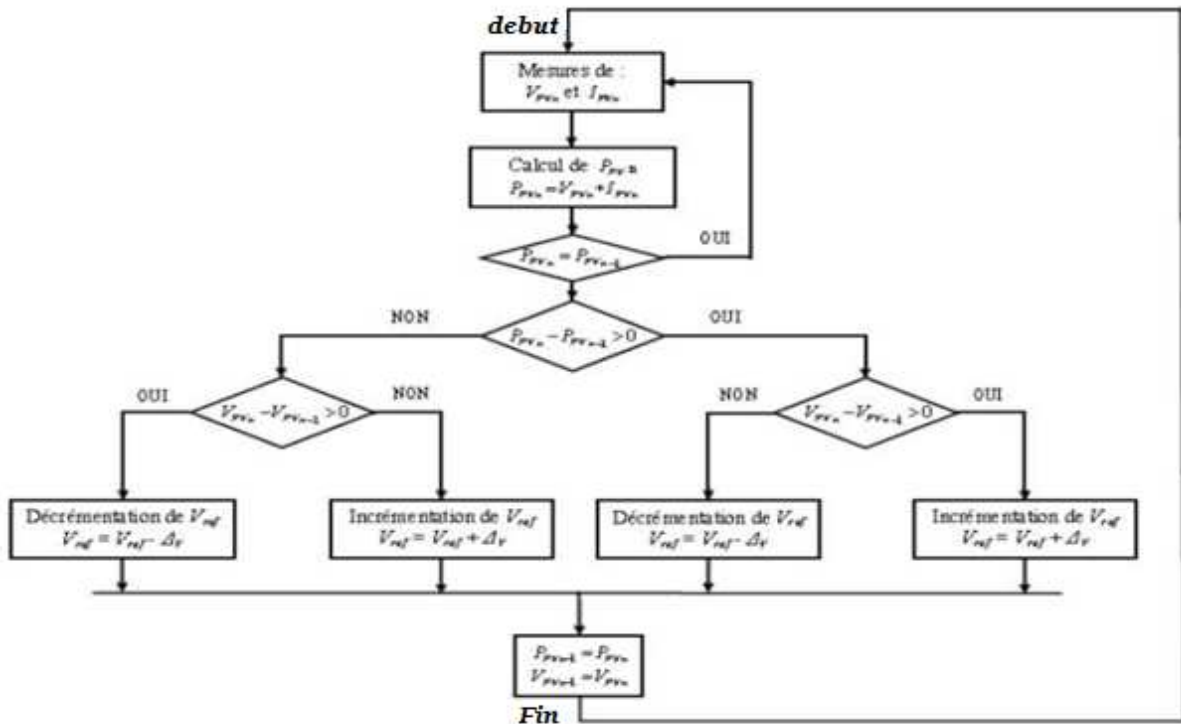


Figure III.15 : Algorithme type de la méthode P&O.

III.10 Conclusion :

Dans ce chapitre on a fait l'étude d'un convertisseur DC-DC de type BOOST et aussi on a présenté les méthodes MPPT basées sur contre réaction de puissance, comme la méthode de perturbation et observation. Cette commande MPPT utilise directement la tension et le courant du panneau photovoltaïque pour chercher le point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale.

Et nous avons présenté les caractéristiques électriques des convertisseurs statiques (convertisseur DC-DC). Nous avons montré par simulation que la valeur de la tension de sortie peut être ajustée en jouant sur la valeur du rapport cyclique. Et nous avons montrés le principe des commandes MPPT de type *P&O*.

Nous avons basé sur l'étude des convertisseurs du courant continu (boost) et la commande MPPT de type *P&O* pour le but d'utiliser dans le chapitre suivante.

IV.1 Introduction :

Dans ce chapitre, on présentera une étude de modélisation et de simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT numérique « perturbation et observation ». Ce système comprend un générateur photovoltaïque, un convertisseur survolteur DC/DC Boost, une commande MPPT « perturbation et observation » ainsi qu'une charge. Le contrôle de la puissance, ainsi que la modélisation et la simulation ont été effectués sous le logiciel MATLAB/Simulink.

IV.2 Simulation d'un panneau photovoltaïque avec MPPT et convertisseur DC-DC :

- **Schéma bloc :**

La figure IV.1 illustre le bloc schématique de SIMULINK du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT

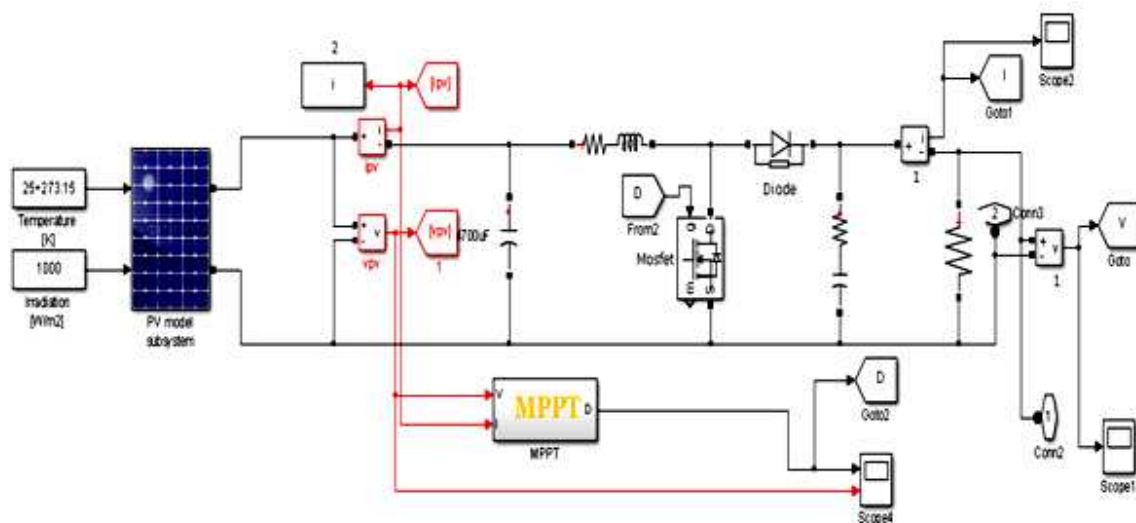


Figure IV.1 : Schéma bloc d'un photovoltaïque muni de la MPPT.

IV.2.1 Résultats de la simulation à la sortie du générateur photovoltaïque :

Les résultats de simulation du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT « perturbation et observation » représentent par les figures suivantes. Ces figures représentent la tension et la puissance générées par le générateur photovoltaïque. Ainsi, la tension et la puissance à la sortie du système photovoltaïque.

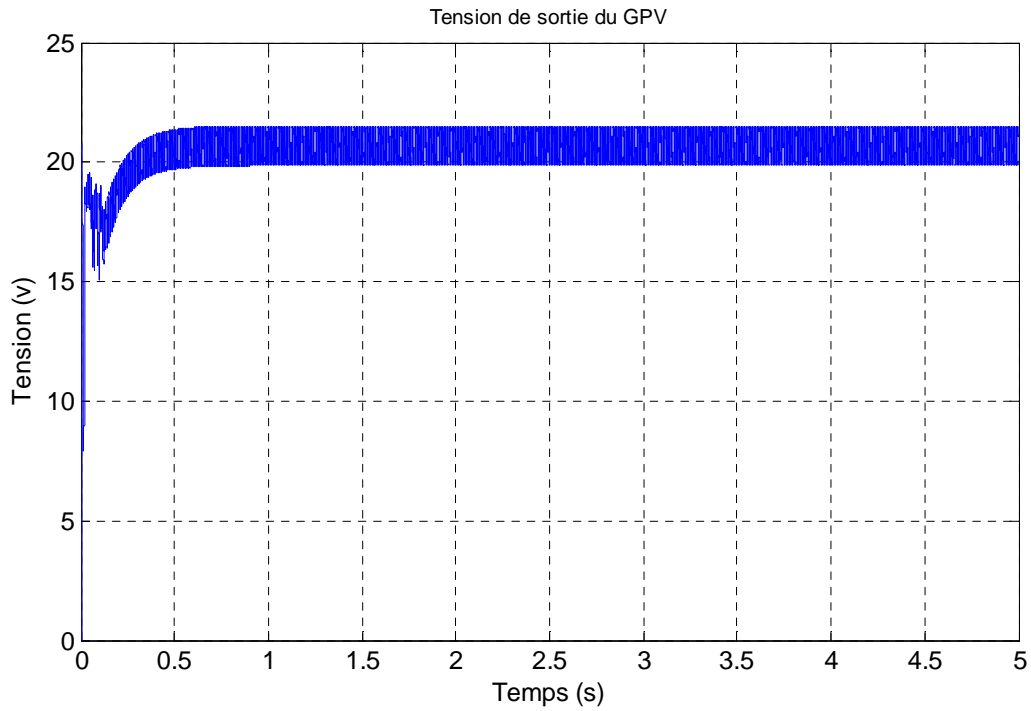


Figure IV.2 : Tension de sortie du générateur photovoltaïque

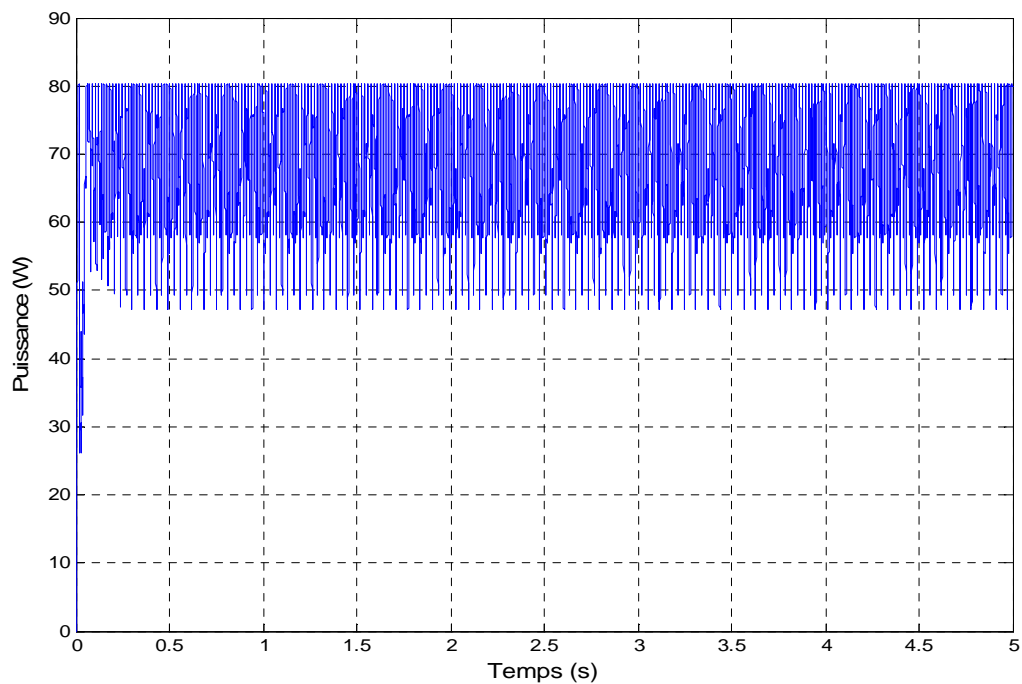


Figure IV.3 : Puissance de sortie du générateur photovoltaïque

IV.2.2 Résultats a la sortie du convertisseur :

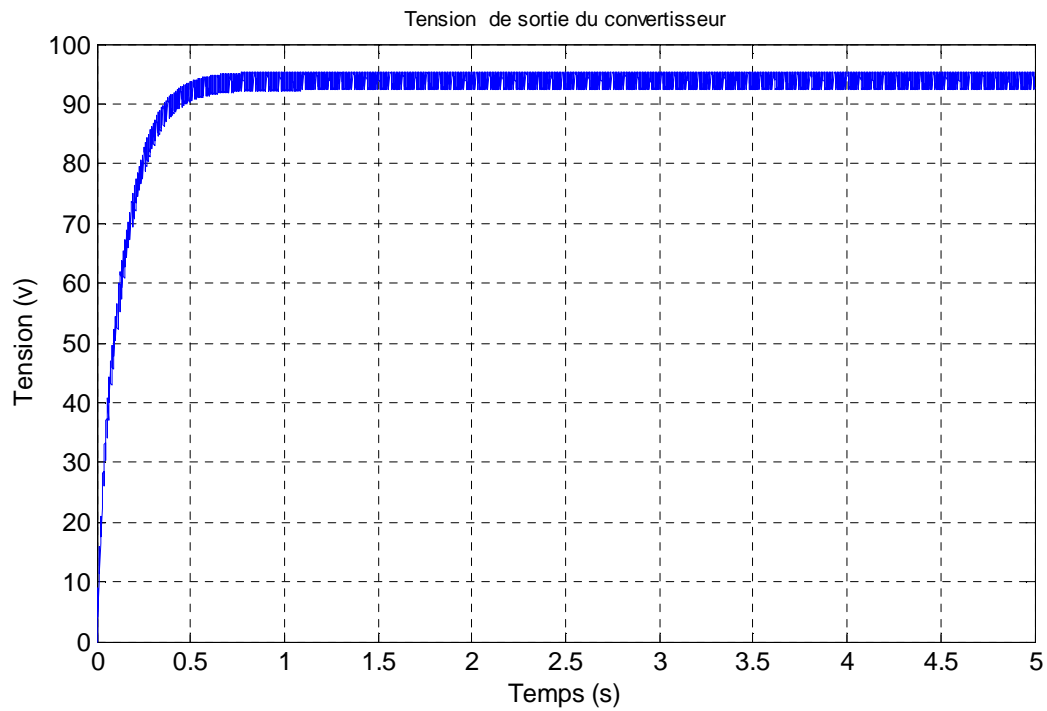


Figure IV.4 : Tension de sortie du convertisseur DC-DC

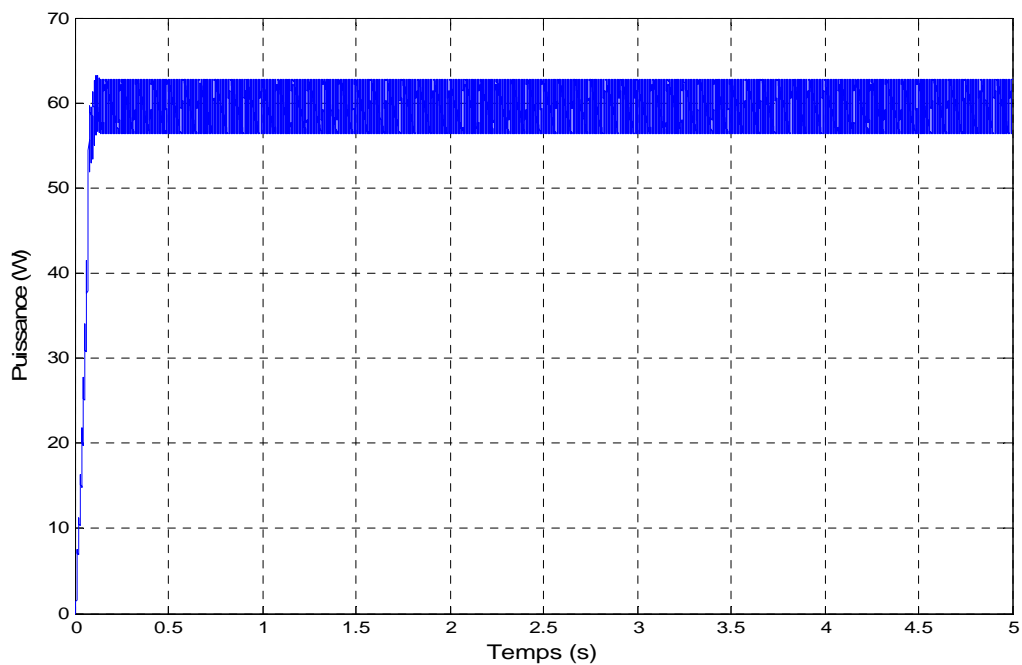


Figure IV.5 : Puissance de sortie du convertisseur DC-DC

IV.2.3 Interprétation des résultats :

A travers les courbes précédentes on remarque que la tension a la sortie du convertisseur est environ quatre fois supérieure a celle de la sortie du panneau et cela grâce au hacheur Boost qui a le rôle d'élever la tension tout en gardant la même puissance, avec une faible diminution a cause des pertes au niveau des composants et la commande utilisée.

IV.3 Influence de l'éclairement :

Afin d'analyser la réaction du système suit a un changement brusque de l'éclairement, on procède à l'instant $t=3s$ une perturbation de $G=1000 \text{ w/m}^2$ vers $G=400 \text{ W/m}^2$.

IV.3.1 Résultats a la sortie du générateur photovoltaïque :

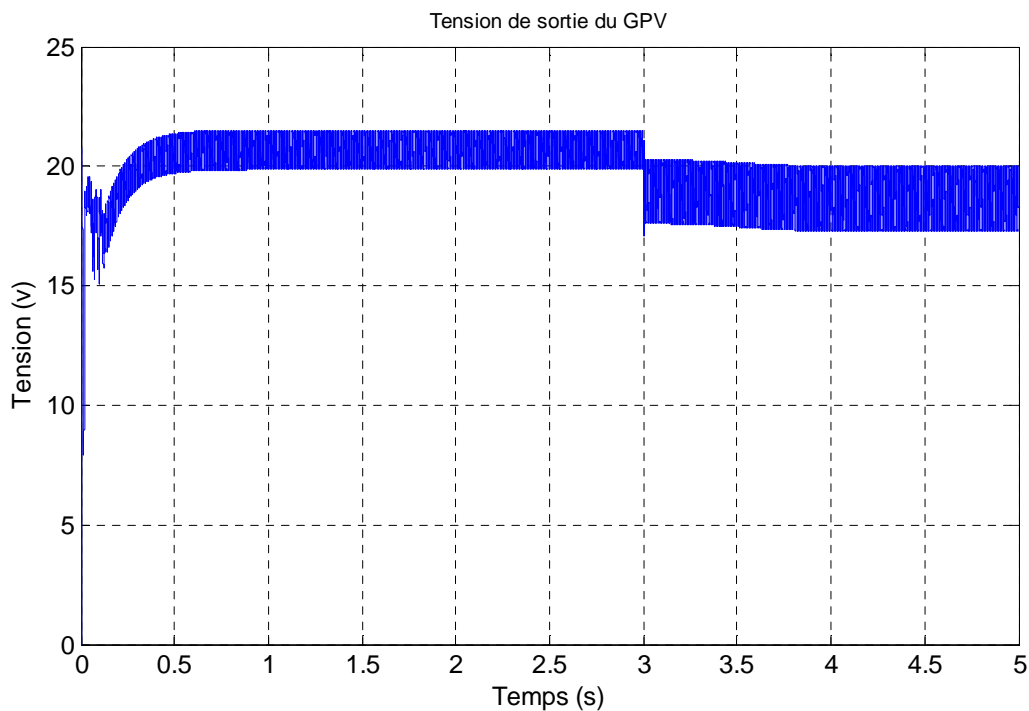


Figure IV.6 : Tension de sortie du générateur photovoltaïque

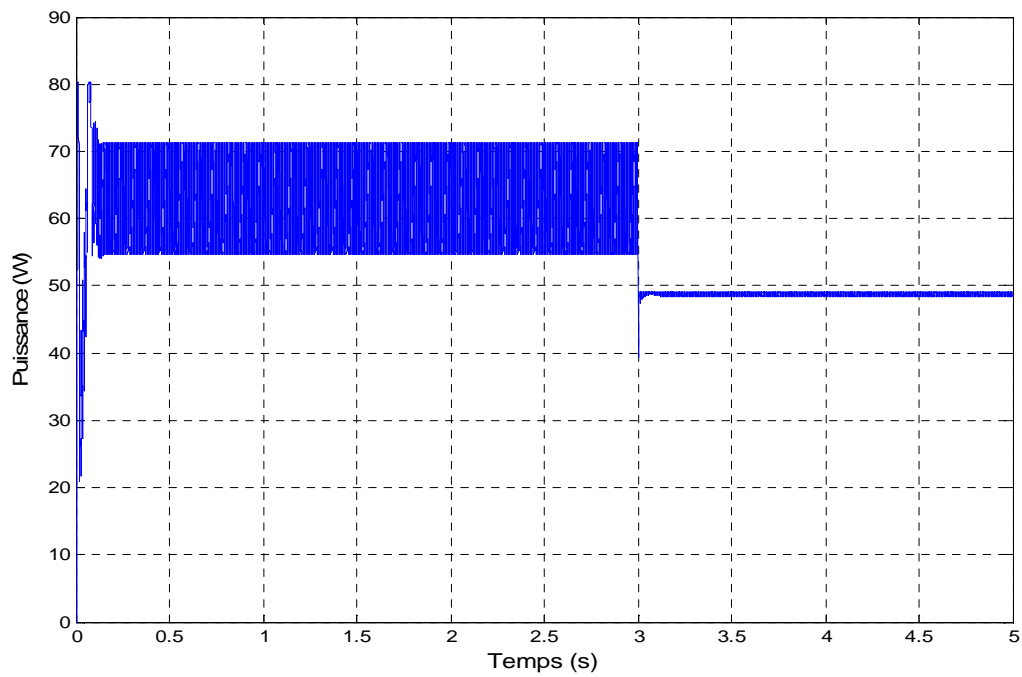


Figure IV.7 : Puissance de sortie du générateur photovoltaïque.

IV.3 .2 Résultats a la sortie du convertisseur

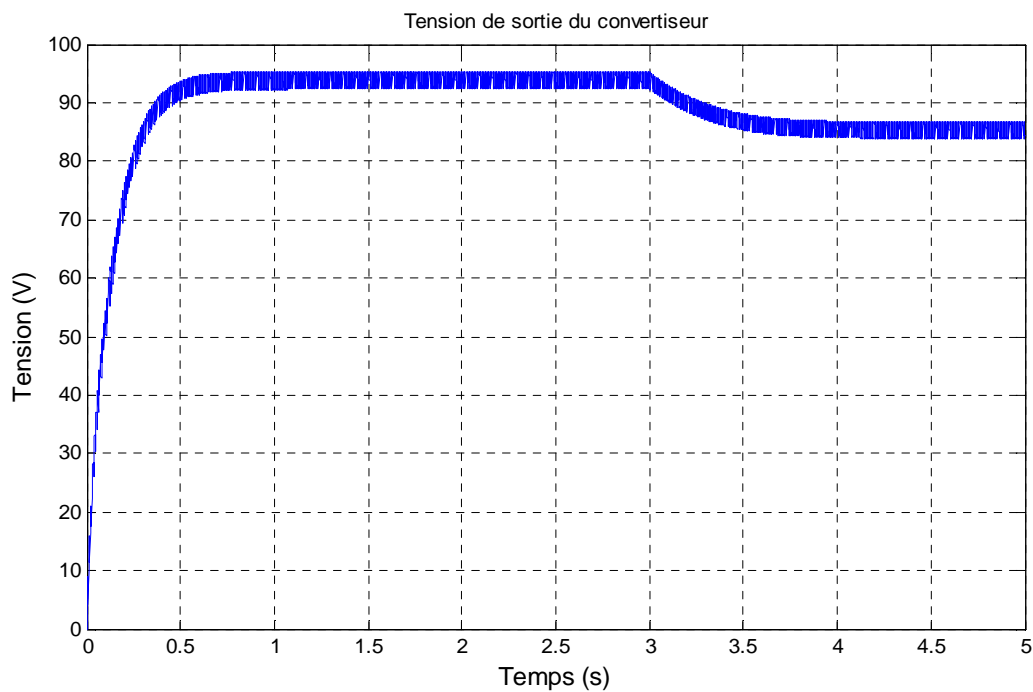


Figure IV.8 : Tension de sortie du convertisseur DC-DC

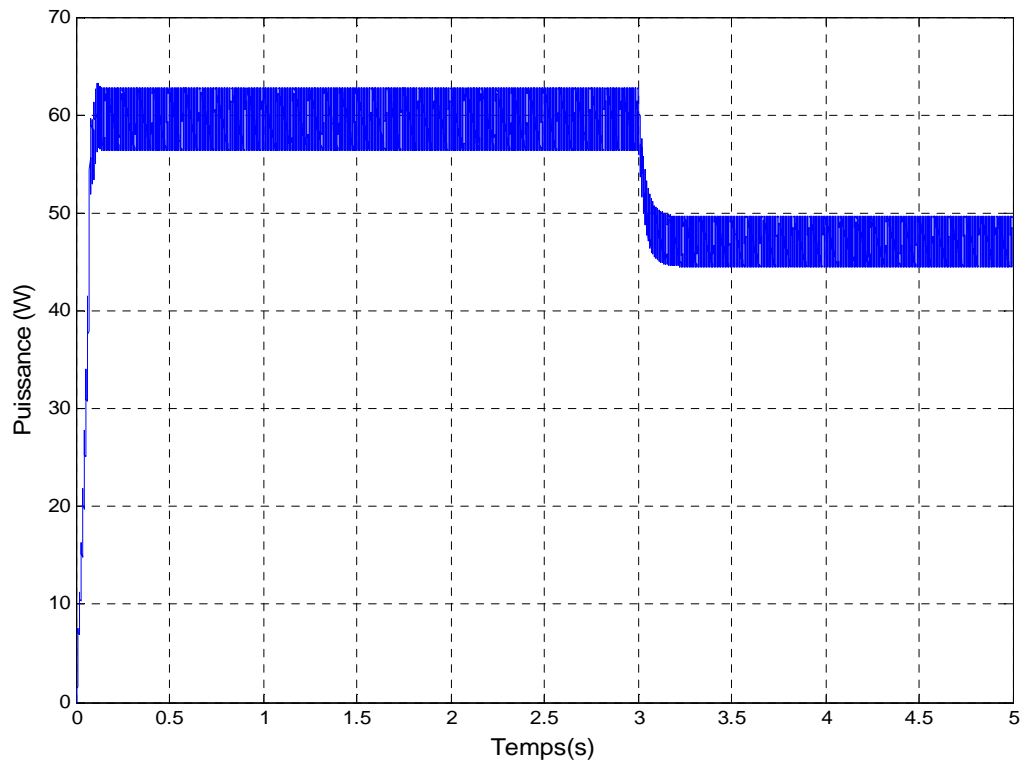


Figure IV.9 : Puissance de sortie du convertisseur DC-DC

IV.3.3 Interprétation des résultats :

Il est remarquable que la valeur de la tension a un lien direct et proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Figure IV.6 et Figure IV.8 elle diminue avec la diminution de cette dernière.

De même pour la puissance puisque elle dépend de la tension avec une diminution des ondulations.

IV.4 Influence de la température :

Pour voir en fonction du temps la réaction du système sur le changement brusque de la température on applique une perturbation à l'instant $t = 2.5$ s de $T=25^{\circ}\text{C}$ vers $T=40^{\circ}\text{C}$:

IV.4.1 Résultats a la sortie du générateur photovoltaïque :

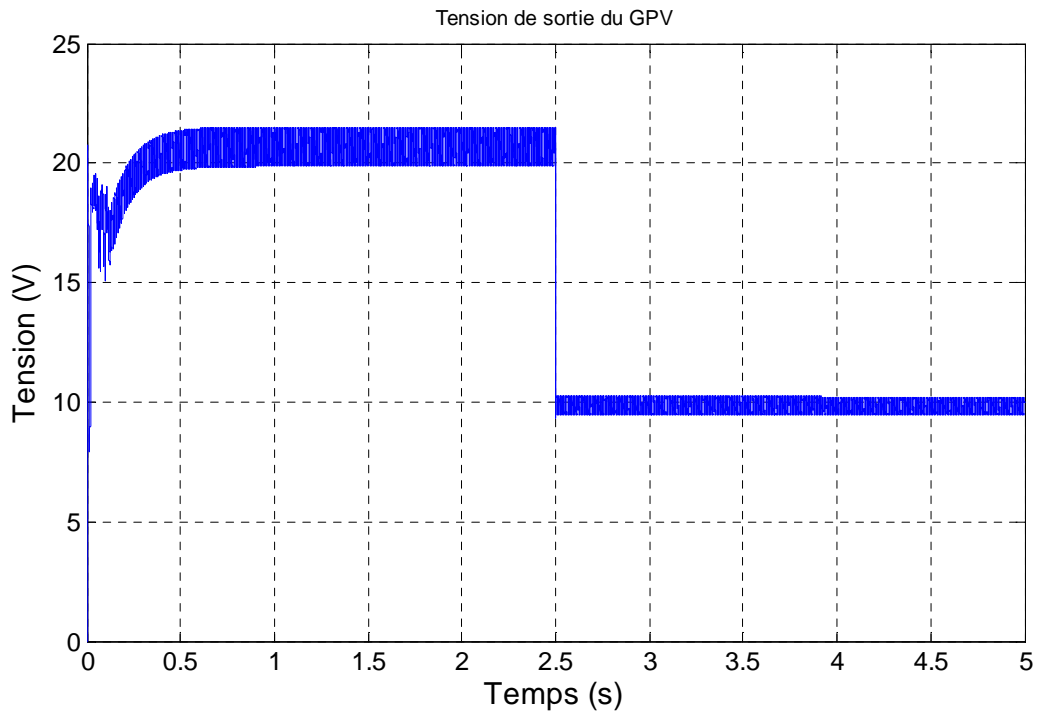


Figure IV.10 : Tension de sortie du générateur photovoltaïque.

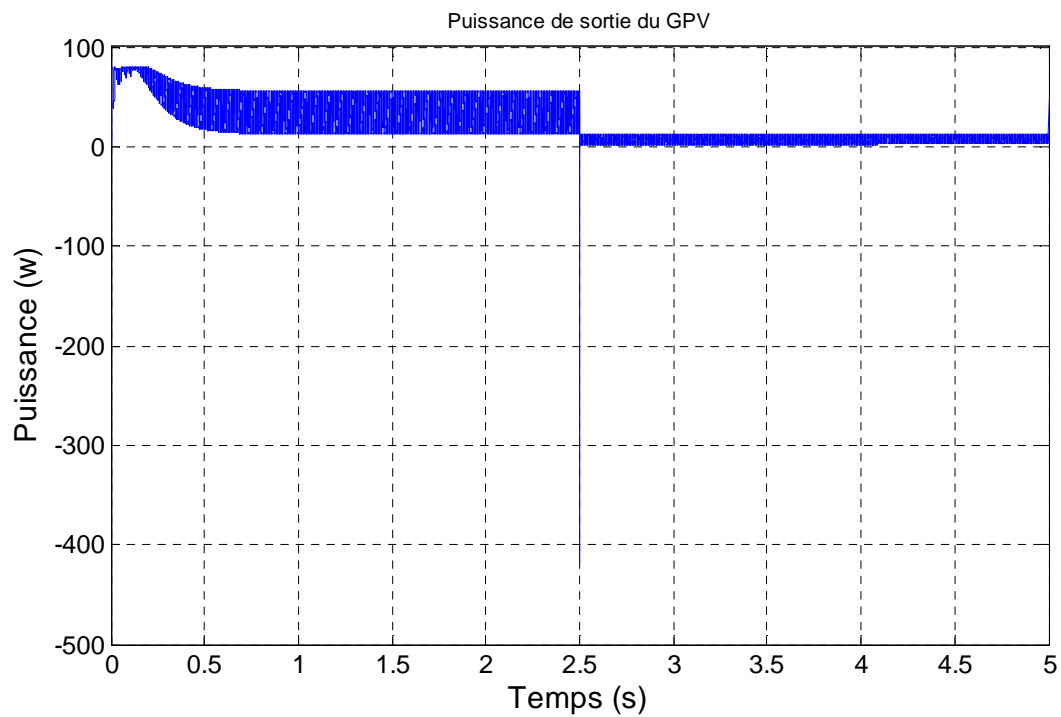


Figure IV.11 : Puissance de sortie du générateur photovoltaïque

IV.4.2 Résultats a la sortie du convertisseur :

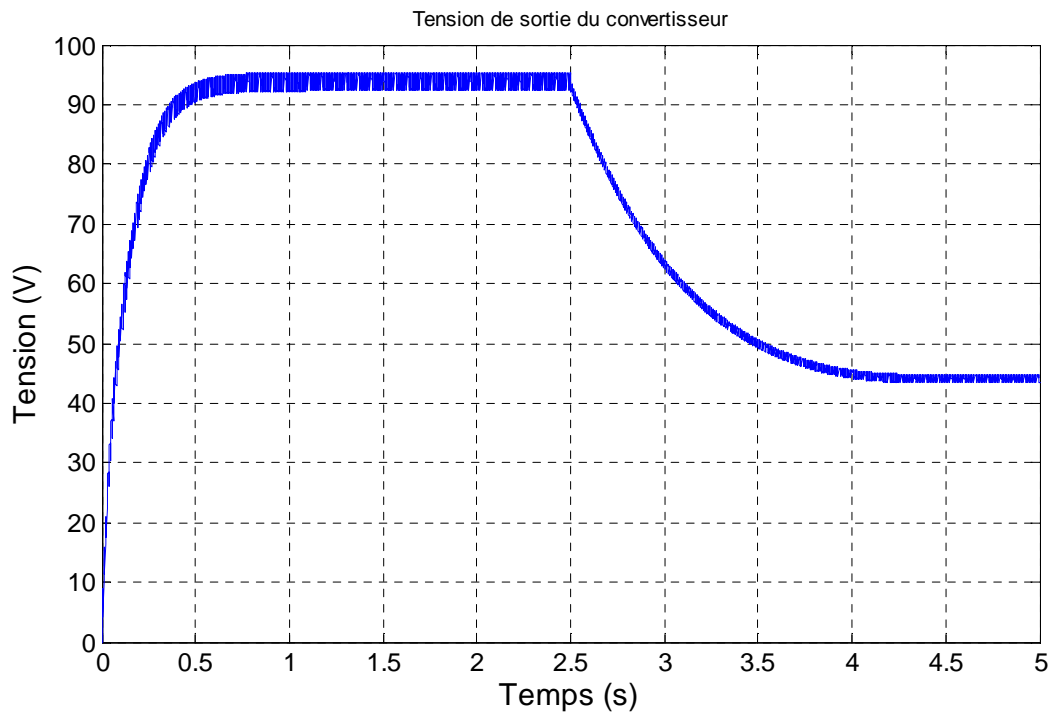


Figure IV.12 : Tension de sortie du convertisseur DC-DC

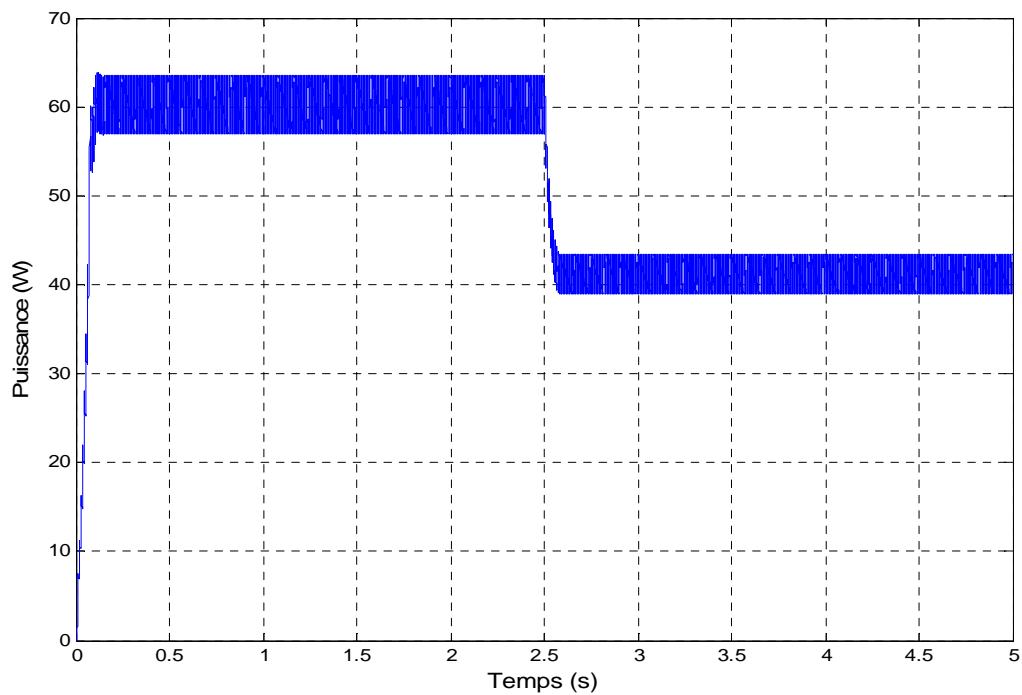


Figure IV.13 : Puissance de sortie du convertisseur DC-DC

IV.4.3 Interprétation :

Nous remarquons que la température a une influence directe sur la tension de sortie du générateur photovoltaïque, la tension de sortie avant et après le convertisseur baisse assez fortement lorsque la température augmente Figure IV.10 et Figure IV.12. Ce qui fait lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement à prendre en compte car la puissance diminue environ de 0.5% par chaque degré d'augmentation de la température de la cellule au décus de 25 C° Figure IV.11, IV.13.

Après un régime transitoire, la commande MPPT fait osciller le point de fonctionnement autour du point du PPM. La commande MPPT adapte le générateur PV à la charge : transfert de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

IV.5 Simulation d'un panneau PV-BOOST avec MCC :

La machine à courant continu peut être modélisée par le biais d'équations électrique, électromécanique et mécanique. Ces trois groupes d'équations nous permettrons de mieux appréhender la machine à courant continu dans son fonctionnement réel.

Du coté électrique nous pouvons dire que la machine à courant continu se définit par un circuit d'induit et un circuit inducteur ; l'induit de la MCC peut être vu comme une résistance R_a et une inductance L_a en série avec une source de tension commandée $e(t)$ proportionnelle à la vitesse $\omega(t)$. Du coté mécanique, nous représentons la machine à courant continu par l'inertie de l'induit augmentée de celui de la charge entraînée.

VI.5.1 Equations électriques :

$$V_f = R_f \cdot I_f + \frac{L_f \cdot dI_f}{dt} \Rightarrow \frac{dI_f}{dt} = \frac{1}{L_f(V_f - R_f \cdot I_f)} \quad (\text{IV.1})$$

$$V_q = M_{fd} \cdot W_r I_f + R_q \cdot I_q + \frac{L_q \cdot dI_q}{dt} \Rightarrow \frac{dI_q}{dt} = \frac{1}{L_q(V_q - M_{fd} \cdot W_r \cdot I_f - R_q \cdot I_q)} \quad (\text{IV.2})$$

IV.5.2 Expression du couple électromagnétique :

$$C_{em} = M_{fd} \cdot I_f \cdot I_q \quad (\text{IV.3})$$

IV.5.3 Equation du mouvement du moteur entrainant une charge de couple résistant C_r :

$$C_{em} - C_r - K_f \cdot W_r = \frac{J \cdot dW_r}{dt} \Rightarrow \frac{dW_r}{dt} = \frac{1}{J(M_{fd} \cdot I_f \cdot I_q - C_r - K_f \cdot W_r)} \quad (\text{IV.4})$$

IV.5.4 Moteur à courant continu à excitation constante :

Si $I_f = C^{ste} \Rightarrow$ on pose : $K_m = M_{fd} \cdot I_f$ (II.5)

— = — (II.6)

— = — (II.7)

IV.6 Simulation d'un moteur à courant continu à excitation constante :

Pour s'initier a logiciel Matlab Simulink, la simulation de la machine à courant continu à excitation constante:

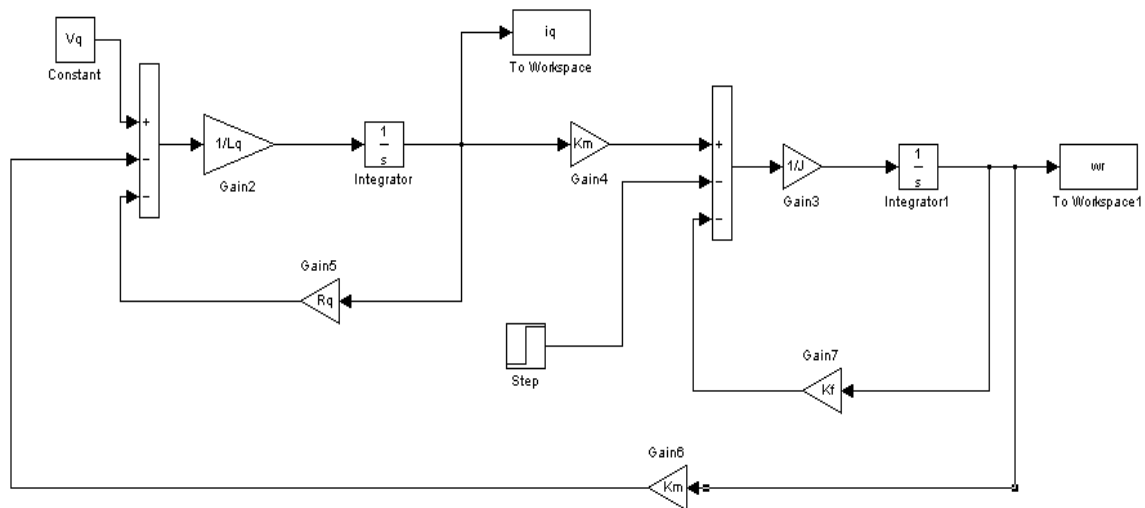


Figure II.14 Bloc de simulation de la MCC

IV.6.1 Paramètres de la machine à courant continu utilisée :

Ces paramètres correspondent aux différentes variables contenues dans schéma bloc

```

%Paramètres d'une machine à courant continu à excitation indépendante
%Fonctionnant à excitation constante Km=Mfd*if

Vq = 220 V    tension d'induit
Rq = 0.26 Ω   Resistance de l'induit
Kf = 0.001   coefficient de frottement
J = 0.001    inertie des masses tournantes
Km = 0.6;    coefficient du couple
Lq = 0.0078 H inductance propre de l'induit
Cr = 1;      couple résistant constant
    
```

IV.6.2.1 Moteur à courant continu sans couple résistant :

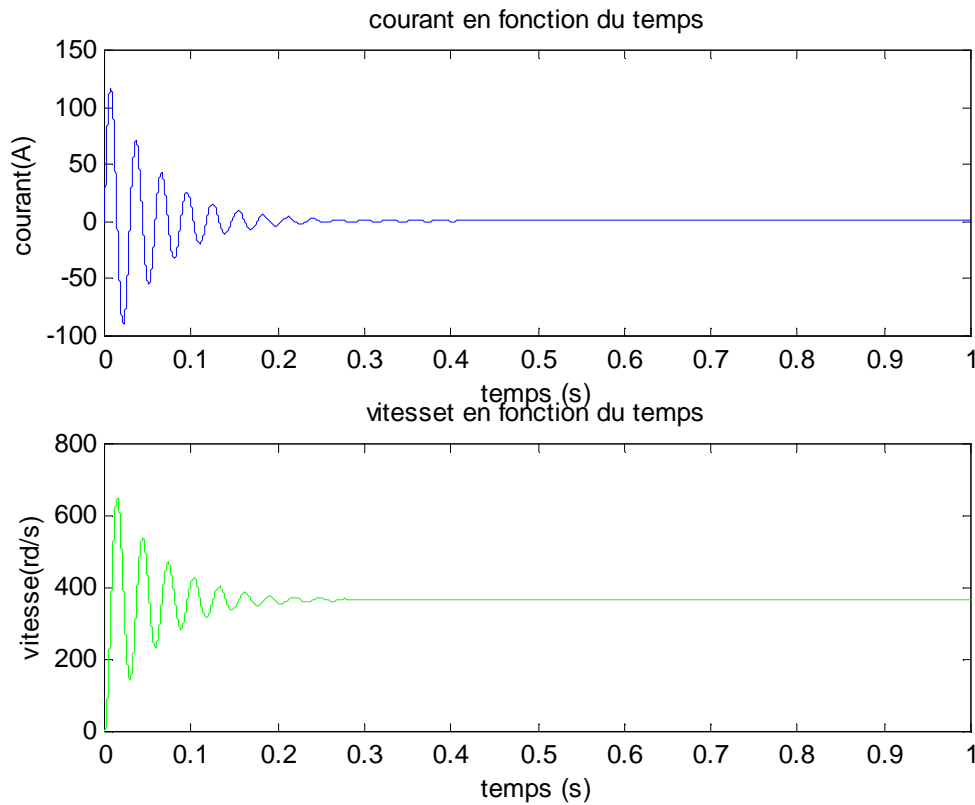


Figure II.15 Caractéristique de courant et la vitesse en fonction du temps de la machine cc sans couple résistant

IV.6.2.2 Valeurs en régime permanent :

A partir des graphes obtenus on prélève les valeurs suivantes :

➤ ***courant de d'induit :***

$$I_q = 0.6107 \text{ A}$$

➤ ***couple électromagnétique :***

$$C_{em} = M_{fd} \cdot i_f \cdot i_q = K_m \cdot i_q = 0,6 \cdot 0.6107 = 0.3664 \text{ N.m}$$

➤ ***vitesse de rotation :***

$$W_r = 366.402 \text{ rd/s}$$

IV.6.2.3 Valeurs en régime transitoire :

A partir des graphes obtenus on a prélevé juste les valeurs max positives suivantes :

➤ **courant de d'induit :**

$$I_q = 116.9863 \text{ A}$$

➤ **couple électromagnétique :**

$$C_{em} = M_{fd} \cdot i_f \cdot i_q = K_m \cdot i_q = 0,6 \cdot 116.9863 = 70.1918 \text{ N.m}$$

❖ **Interprétation des courbes :**

- Le moteur a fait à un appel de courant au démarrage pour amener sa vitesse à sa vitesse nominale, par la suite il se stabilise en régime permanent.
- En régime permanent le moteur tourne à une vitesse constante (le moteur fonctionne à vide), à cet instant la valeur du couple est très faible donc le courant d'induit est aussi faible : $I_q = 0.6107 \text{ A}$
- le couple électromagnétique évolue de la même manière qu'avec le courant d'induit car on a $C_{em} = K_f i_q$.

$$C_{em} - C_r = J \frac{d\omega_r}{dt} + K_f \omega_r \quad (\text{II.33})$$

Puisque $C_r = 0$ et $\omega_r = \text{cst}$ donc $\frac{d\omega_r}{dt} = 0$

$$C_{em} = K_f \cdot \omega_r = K_m \cdot i_q = 0,6 \cdot 0.6107 = 0.3664 \text{ N.m}$$

- La vitesse augmente en fonction du temps puis il se stabilise à une valeur constante, à cet instant le couple résistant est négligeable.

$$\omega_r = 366.402 \text{ rd/s}$$

- La vitesse augmente en fonction du temps puis il se stabilise à une valeur constante, à cet instant le couple résistant est négligeable.

$$\omega_r = 366.402 \text{ rd/s}$$

IV.6.2.4 Moteur à courant continu avec couple résistant :

En met en action un couple résistant à l'instant « $t = 0.5 \text{ s}$ » qui vaut « $Cr=100 \text{ N.m}$ » :

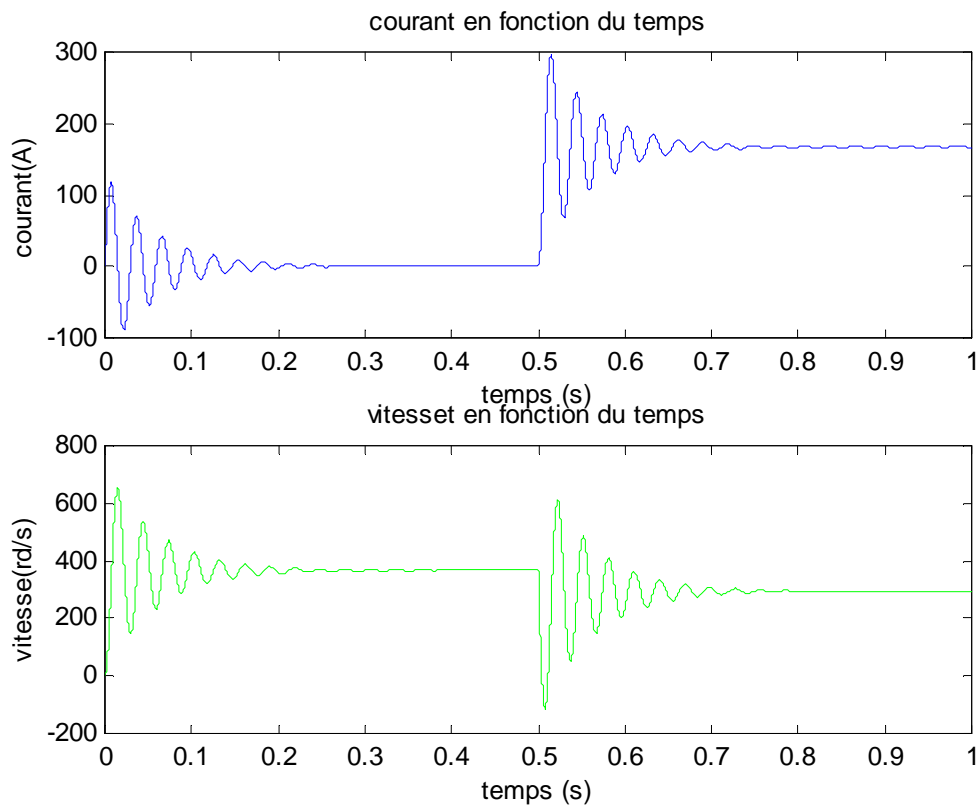


Figure II.16 : Caractéristique de courant et la vitesse en fonction du temps de la machine cc avec couple résistant

II.6.2.5 Valeurs en régime permanent :

A partir des graphes obtenus on prélève les valeurs suivantes :

➤ **courant de d'induit**

$$I_q = 167.1269 \text{ A}$$

➤ **couple électromagnétique**

$$C_{em} = M_{fd} \cdot i_f \cdot i_q = K_m \cdot i_q = 0,6 \cdot 167.1571 = 100.2761 \text{ N.m}$$

➤ **vitesse de rotation**

$$W_r = 294.232 \text{ rd/s}$$

Après avoir simulé la machine à courant continu à excitation indépendante et avoir vu ses caractéristiques, on va la connecter directement à un panneau photovoltaïque. Pour avoir la tension d'alimentation nécessaire et pour satisfaire les caractéristiques de la machine à courant continue on a opté pour un panneau à quatre modules en série avec un Hacheur Boost.

➤ **Schéma bloc :**

La figure IV-1 représente Le bloc de simulation du système PV alimentant une MCC sous Matlab/Simulink.

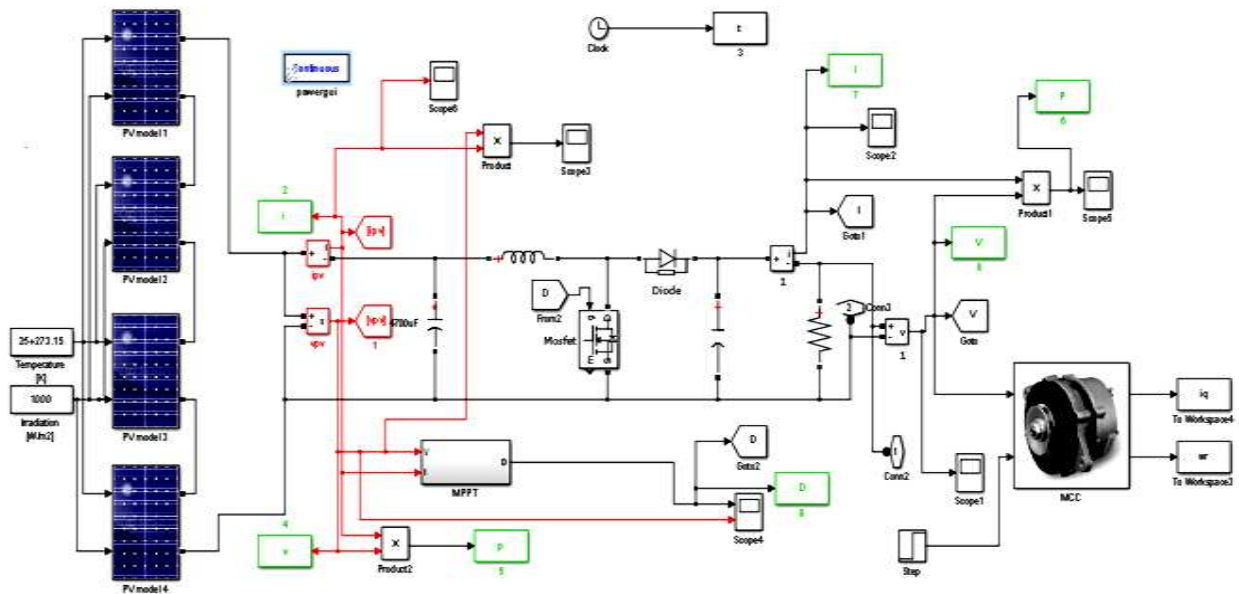


Figure IV.17 : Le bloc de simulation du système PV alimentant une MCC sous Matlab/Simulink.

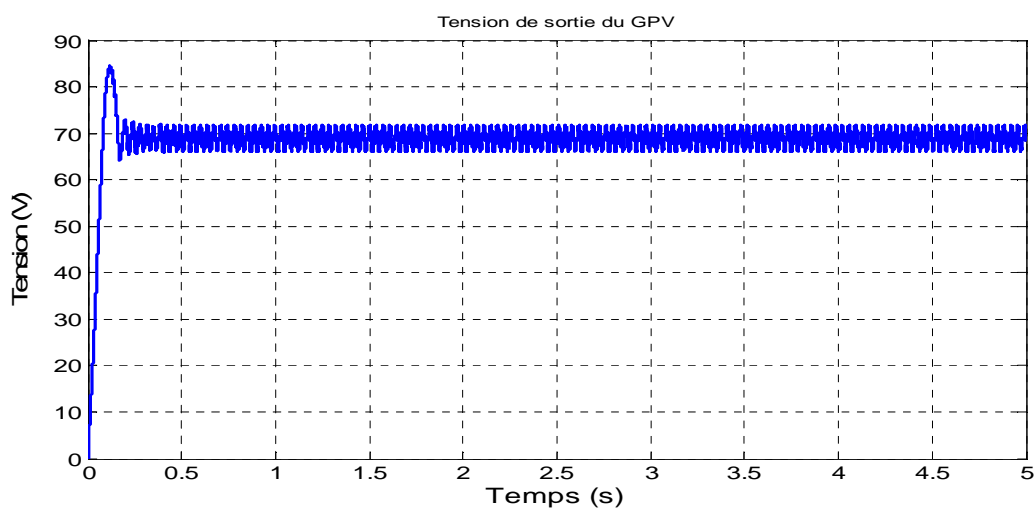


Figure IV.18 : Tension de sortie du générateur photovoltaïque

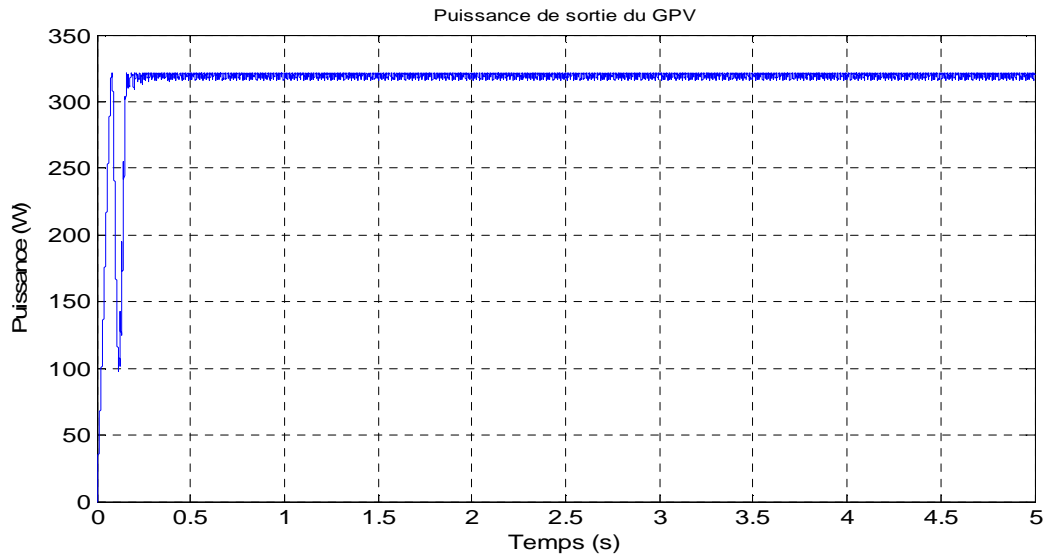


Figure IV.19 : Puissance de sortie du générateur photovoltaïque

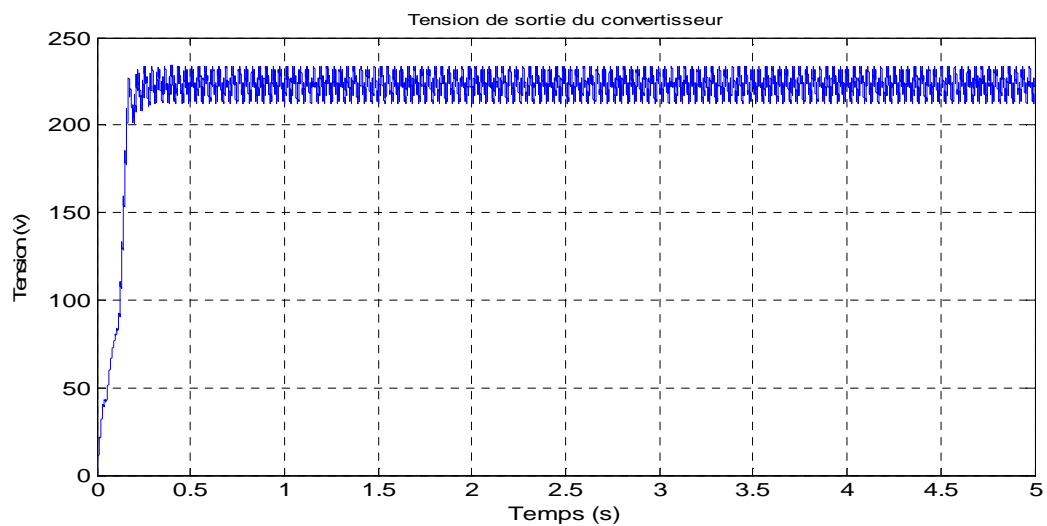


Figure IV.20 : Tension de sortie du convertisseur DC-DC

La tension a augmentée après avoir utilisé quatre panneaux en série ce qui nous permet de brancher la MCC.

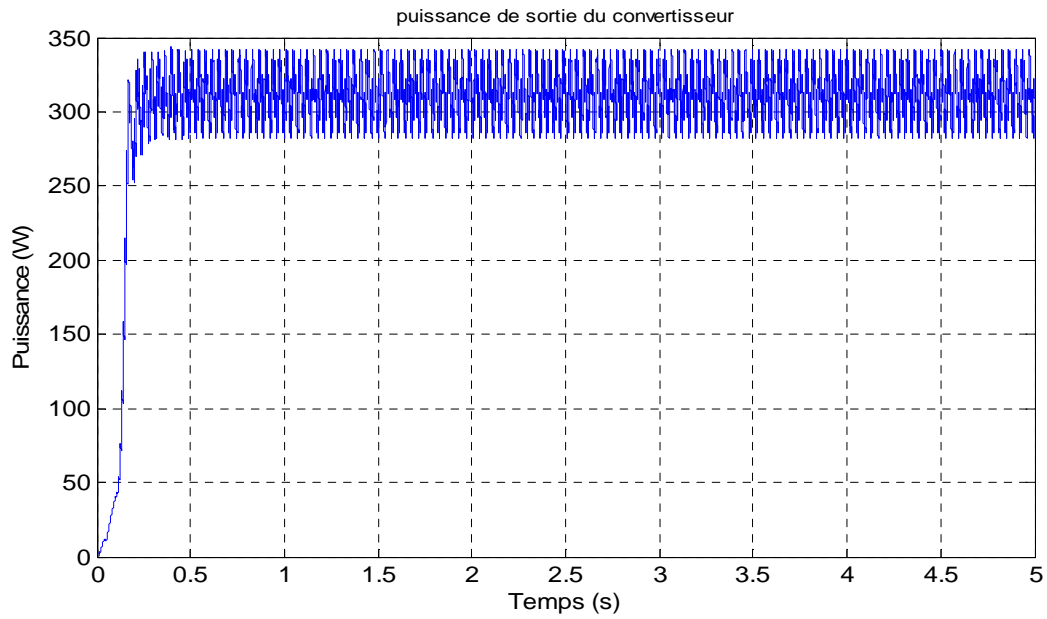


Figure IV.21 : Puissance de sortie du convertisseur DC-DC

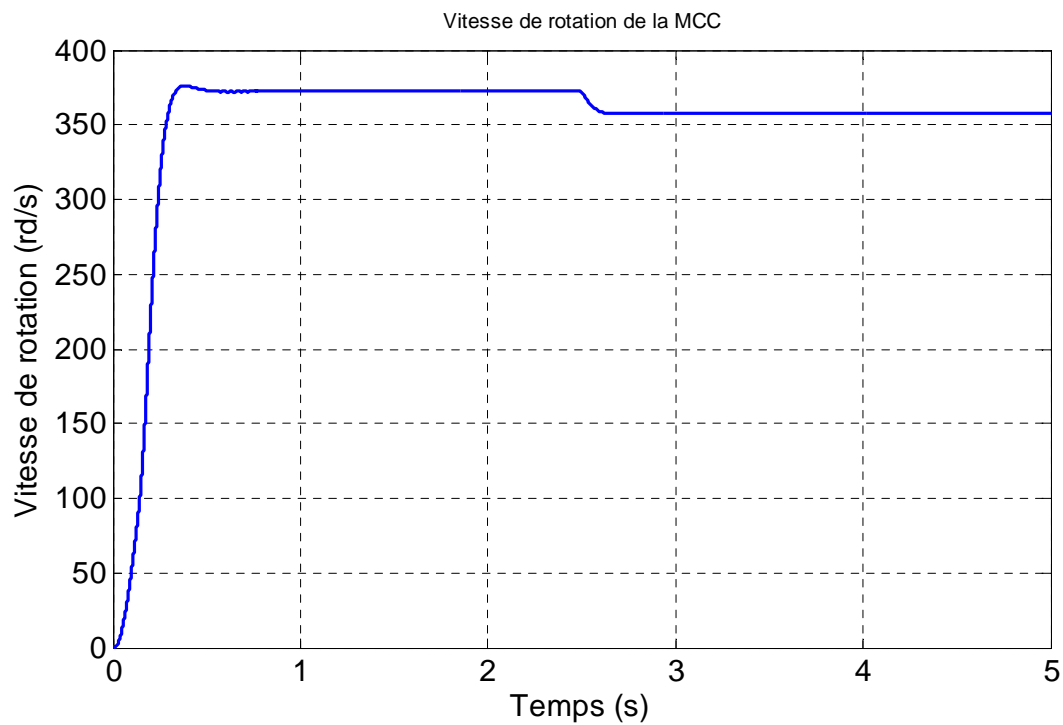


Figure IV.22 : Vitesse de la MCC avec application de couple charge après le démarrage.

IV.7 Interprétation :

On a appliqué un couple résistant à la machine pour bien illustrer son influence sur le courant et la vitesse.

De même manière que le système seul on remarque que lorsqu'on connecte la machine à courant continue le système fonctionne de même principe avec une augmentation de la tension et la puissance a cause d'augmentation de nombre de module.

IV.8 Conclusion :

La modélisation de chaque composant du système photovoltaïque complet a été élaborée à partir de modèles mathématiques, cette modélisation est une étape essentielle permet d'introduire un certain nombre de modèles puis évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation ainsi les paramètres constitutants.

L'implémentation de ces modèles dans un environnement de simulation adapté permettra d'étudier le comportement des composants en fonction de certains paramètres. L'outil ainsi réalisé sera utilisé pour déterminer le dimensionnement optimal d'un tel système pour des cas d'applications.

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 conduites à l'énergie renouvelable. Une des énergies renouvelables qui peut honorer la demande est l'énergie solaire photovoltaïque, c'est une énergie propre, silencieuse, disponible et gratuite.

Cela explique pourquoi son utilisation connaît une croissance significative dans le monde.

Avant d'aborder la problématique de conversion, nous avons tout d'abord étudié le contexte et la problématique de l'énergie solaire photovoltaïque. Ceci s'avère nécessaire pour acquérir une connaissance approfondie du comportement d'un générateur photovoltaïque.

Nous avons établi des programmes de calculs sous l'environnement Matlab 2013 permettant de tracer la caractéristique I-V pour différents éclairagements et températures solaires et de calculer la puissance maximale délivrée par la cellule photovoltaïque correspondante.

Pour mieux analyser les contraintes de l'exploitation d'un système photovoltaïque, nous avons analysé dans le simulateur Matlab 2013 le fonctionnement optimal d'un système PV, de moyennes puissances dont la régulation de la puissance est effectuée par une commande MPPT, suites aux variations des conditions météorologiques (éclairagements,...) et de la charge.

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

Références bibliographiques

- [1]: S.Aminata, «*Simulation du système hybrides Photovoltaïque* » Thèse de Doctorat, canada, 1998.
- [2]. K. Kassmi et M. Hamdaoui et F. Olivié 'Conception et modélisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT analogique', université de maroc, revue des énergies renouvelables ,pp 451 – 462, 2007.
- [3] : N. Chandrasekaran, K. Thyagarajah ' Modeling and matlab simulation of pumping system using pmdc motor powered by solar system', European Journal of Scientific Research, pp 6-13,2011.
- [4]. S.ABADA ' Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur sepic', Mémoire Maître es Sciences , Université laval, 2011.
- [5]. J. Royer et T. Djiako et E. Schiler, B. Sadasy. ' Le pompage photovoltaïque', université d'Ottawa, 1998.
- [6]. Alonso Corinne « Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie ». Mémoire d'habilitation à diriger les recherches, Université Paul Sabatier Toulouse III, 2003.
- [7]. Thibaut Desrues « Développement de cellules photovoltaïques à hétérojonctions silicium et contacts en face arrière ». Thèse de doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2009.
- [8]. Rémi Bettignies « Cellules photovoltaïques organiques dérivées de nouveaux systèmes conjugués ». Thèse de doctorat, Ecole Doctorale d'Angers ,2003.
- [9] José Miguel Navarro « Cellules Photovoltaïques Organiques Transparentes Dans Le Visible ».Thèse de doctorat. Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2008.
- [10] Marcelo Gradella Villalva, Jonas Rafael Gazoli, and Ernesto Ruppert Filho « Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays ». IEEE Transaction on powr electronics, Vol.24, No 5, 1198-1208, May 2009.
- [11] Anne Labouret, Michel Villon, « Energie solaire PV », 3eme Edition Dunod ,2007
- [12]. B. Flèche - D. Delagnes 'Energie solaire photovoltaïque.doc', juin 2007,
- [13]. M.belhad ' Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome', mémoire de magister université de bachar ,2008.
- [14]. S. PETIBON ' Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques', université de Toulouse, 2009.

- [15] L. ABBASSEN ‘ Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque’ Mémoire de magister, université mouloud Mammeri Tizi ouzzo, 2011.
- [16] A. T.SINGO ‘ Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome’ Thèse de doctorats, université Henri Poincaré, Nancy-I,2010.
- [17] HELALI KAMELIA ,Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque , Etude Comparative , Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzzou, Thèse de Magister 2012 .
- [18] H. LEQUEU – [DIV435] – Fichier : IUT-EDP-9, 2004/2005.
- [19] C. CABAL ‘Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque ’, Thèse de doctorat université de Toulouse III ,2008.
- [20] Y. PANKOW ‘Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension. application au générateur photovoltaïque’, thèse de doctorats de l'école nationale, 2004.
- [21] Z. Bendjellouli ‘ Contribution a la modélisation d'une cellule solaire’, Mémoire de magister université de bachar, 2009.
- [22] O. BELABBASSI, M. REZMA ‘Contribution a l'étude et dimensionnement d'un système hybride photovoltaïque / réseau sone gaz’ mémoire d'ingénieur d'état université de Laghouat, 2011.
- [23] MLLE BENHADDOUCHE NESRINE FATIMA ‘La commande d'un système photovoltaïque d'un satellite’ Thèse de master université tlemcen 2013/2014.