

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

Université Abou Bekr Belkaïd – Tlemcen
Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique et Electronique



Filière : Electrotechnique

Master : Académique

MEMOIRE

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

Spécialité : Réseaux Electriques & Réseaux Electriques Intelligents

Par : ZENAKHI Asma

**Etude par simulation du fonctionnement
d'un système photovoltaïque menu d'une
commande MPPT**

Soutenu publiquement, le **14 /06/2016**, devant le jury composé de :

M S.M.MELIANI

Maître de Conférences -A

Univ. Tlemcen

Président

M A. BOUMEDIENE

Professeur

Univ. Tlemcen

Encadreur

M M.C.BENHABIB

Maître de Conférences -A

Univ. Tlemcen

Examineur

M A.BRIKCI NIGASSA

Maître Assistant-A-

Univ. Tlemcen

Examineur

Remerciements

*Avant tout je remercie Allah pour que je vie ce jour et la force et la patience pour terminer ce travail. Je tiens à exprimer mes remerciements à mon encadreur **M A. BOUMEDIENE** qui a proposé et a dirigé ce travail.*

*Je remercie monsieur le président de jury **M S.M.MELIANI**, ainsi que les membres de jury d'avoir accepté de juger ce travail **M M.C.BENHABIB** et **M A.BRIKCI NIGASSA**. Je dois remercier aussi qui n'ont épargné aucun effort pour mettre à ma disposition la documentation et les explications nécessaires. Et aussi je tiens à remercier l'ensemble du corps enseignant du Département GEE.*

Merci enfin à tous ceux qui, de près ou de loin, nous ont aidé et donc ont contribué au succès de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce travail :

À mes très chers parents, que dieu les garde et les protège pour leurs soutien inconditionnel, moral et financier, ses encouragements, et pour m'avoir permis de réaliser mes études dans les meilleures conditions.

À mes frères Abdel Rahman et Mohamed, ma sœur Khadîdja et son mari Abdel Kader et ces enfants Yassine et Issam.

À toute la famille Zenakhi et Ramdani

À tout(es) mes cher(es) ami(es) Et toute la promotion 2016 Réseau électrique et réseaux électriques intelligents à Tlemcen.

A.S.M.A

Liste des symboles

D_2 : Diamètre de soleil($1.39.10^9$ m)

D_t : Diamètre de la terre($1.27.10^7$ m)

L_{ts} : Distance moyenne soleil_ terre ($1.5. 10^{11}$ m)

I_{cc} : Le courant de court-circuit (A)

V_{co} : La tension de circuit ouvert (V)

N_s : Nombre de modules dans le panneau en série

N_p : Nombre de modules dans le panneau en parallèle

I_{pv} : Courant générer par la cellule photovoltaïque(A)

I_{ph} : Photo courant créer par la cellule(A)

I_d : Le courant circulant dans la diode (A)

I_{sh} : Le courant circulant dans la résistance R_{sh} (A)

E_g : Energie de seuil

I_{os} : le courant de court-circuit de la cellule à la température de référence T_r et l'éclairement de référence(A)

I_s : Courant de Saturation(A)

I_{cc} : Courant de court de circuit(A)

K : la constante de Boltzmann ($1.3854 10^{-23}$ J /K)

q : Charge électrique élémentaire ($1,6 10^{-19}$ C)

A : Facteur d'idéalité de la diode ($1 < A < 3$)

V_{pv} : La tension aux bornes de cette même cellule(V)

η : Rendement de la cellule(%)

T_r : Température référence de la cellule

T_c : Température ambiante

T_{mod} :Température de fonctionnement de la cellule

R_s : Résistance Série(Ω)

R_{sh} : Résistance Parallèle(Ω)

V_{co} : Tension de circuit ouvert(V)

V_{th} : Tension thermique(V)

K_i : Coefficient de la température de I_{pv}

V_e : Tension d'entrée du hacheur – Boost(V)

V_s : Tension de sortie du hacheur – Boost(V)

V_d : Tension aux bornes de la diode (V)

G : Eclairage (W /m^2)

G_0 : Eclairage pour les STC

L : Inductance(H)

C : Capacité (F)

α : rapport cyclique

R : Résistance(Ω)

I_c : Courant de Capacité(A)

I_L : Courant de l'inductance(A)

Abréviation utilisées

PV: Panneau Photovoltaïque.

GPV: Générateur Photovoltaïque.

FF: Facteur de forme.

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

NOCT: Nominal Operating Cell Temperature.

STC: Standard Test Conditions.

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

P&O: Perturbation et Observation.

DC: Courant Continu (Direct Current).

Listes des figures

Chapitre I

Figure (I.1) : Composantes du rayonnement solaire au sol

Figure (I.2) : cellule photovoltaïques

Figure (I.3) : Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire

Figure (I.4) : le type de cellule monocristalline

Figure (I.5) : le type de cellule poly cristalline

Figure (I.6) : le type de cellule amorphe

Figure(I.7):Caractéristique résultantes d'un regroupement de N_p cellules en parallèle

Figure(I.8):Caractéristique résultantes d'un regroupement de N_s cellules en série

Figure(I.9) : Schéma équivalent de la cellule photovoltaïque

Figure (I.10) : Module photovoltaïque

Figure (I.11) : Câblage des cellules dans un module

Figure (I.12) : panneau solaire

Chapitre II

Figure(II.1) : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque complète

Figure (II.2) : Schéma de simulation du panneau PV BP solar 2150S

Figures(II.3) : Caractéristique Courant-Tension du panneau PV

Figure(II.4) : Caractéristique Puissance-Tension du panneau PV

Figure (II.5) : Comparaison entre la simulation et le constructeur

Figure (II.6) : bloc simulink de panneau photovoltaïque exposé à différent éclairements

Figure (II.7) : Résultats de simulation des caractéristiques $I=f(V)$ pour différentes éclairément et une température $T_c = 25^\circ\text{C}$

Figure (II.8) : Résultats de simulation des caractéristiques $P=f(V)$ pour différentes Eclairément et une température $T_c = 25^\circ$

Figure (II.9) : Résultats de simulation des caractéristiques $I= f(V)$ pour différentes Températures et un éclairément $G=1000\text{W/m}^2$

Figure (II.10) : Résultats de simulation des caractéristiques $P=f(V)$ pour différentes températures et un et un éclairément $G=1000\text{W/m}^2$

Figure (II.11) : Symbole d'un convertisseur DC-DC

Figure (II.12): Schéma électrique d'un hacheur buck

Figure(II.13): Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur buck

Figure (II.14): Schéma électrique d'un hacheur boost

Figure(II.15): Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost

Figure(II.16): Schéma électrique d'un hacheur buck- boost

Figure(II.17): Chronogrammes de courant et de tension d'un hacheur buck-boost

Figure (II.18): Ondulation du courant de l'inductance

Figure(II.19): Ondulation sur la tension de condensateur

Figure(II.20) : Schéma de simulation du hacheur boost

Figure (II.21) : Tension de sortie du hacheur boost

Figure (II.22) : Courant de sortie du hacheur boost

Figure (II.23) : Schéma synoptique du système PV

Figure(II.24) : Tension de sortie du système (panneau+hacheur)

Figure(II.25) : Courant de sortie du système (panneau+hacheur)

Figure(II.26) : Puissance de sortie (panneau+hacheur)

Figure(II.27) : Tension du panneau PV et la tension de sortie du convertisseur avec une variation de température de 25° c jusqu'à 5° c

Figure(II.28) : Puissance du panneau PV et la puissance de sortie du convertisseur avec une variation de température de 25° c jusqu'à 5° c

Chapitre III

Figure(III.1) : Système photovoltaïque avec une commande MPPT

Figure(III.2) : 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

Figure(III.3) : Signe de ΔP et ΔV à différentes positions de la courbe caractéristique de puissance

Figure(III.4) : Organigramme de la méthode P&O

Figure(III.5) : Schéma block de la commande MPPT (P&O)

Figure(III.6) : Modèle SIMULINK du panneau PV +hacheur avec une commande MPPT (P&O)

Figure(III.7) : Tension du panneau PV et la tension de sortie du convertisseur

Figure(III.8) : Puissance du panneau PV et la puissance de sortie du convertisseur

Figure(III.9) : Tension du panneau PV et la tension de sortie du convertisseur avec une variation de température de 25°c jusqu'a 5°c

Figure(III.10) : Puissance du panneau PV et la puissance de sortie du convertisseur avec une variation de température de 25°c jusqu'à 5°c

Liste des tableaux

Tableau (II.1) : Caractéristiques électriques du PB 2150S

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	15
CHAPITRE I : GENERALITE SUR LE SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE	19
I.1 Introduction	20
I.2 L'énergie solaire.....	20
I.3 Rayonnement solaire	21
I.3.1 Rayonnement direct.....	21
I.3.2 Rayonnement diffus.....	21
I.3.3 Rayonnement réfléchi.....	22
I.3.4 Rayonnement global.....	22
I.4 Effet photovoltaïque	22
I.5 Cellules photovoltaïques	23
I.5.1 Historique de la cellule photovoltaïque.....	23
I.5.2 Principe de fonctionnement.....	24
I.5.3 Les différents types des cellules photovoltaïques	25
I.6 Générateur photovoltaïque(GPV).....	28
I.7 Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV)	28
I.7.1 Association des cellules photovoltaïques en parallèle.....	28
I.7.2 Association des cellules photovoltaïques en série.....	29

I.8	Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque	30
I.9	Paramètres d'une cellule photovoltaïque.....	31
I.9.1	Courant de court-circuit (I_{cc})	31
I.9.2	Tension de circuit-ouvert (V_{co}).....	32
I.9.3	Rendement énergétique	33
I.9.4	Facteur de forme.....	33
I.10	Module photovoltaïque.....	33
I.11	Panneau solaire.....	35
I.12	Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque	35
I.13	Conclusion.....	36
CHAPITRE II : MODELISATION D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE		37
II.1	Introduction	38
II.2	Modélisation d'une cellule photovoltaïque.....	38
II.2.1	Modèle de cellule	38
II.2.2	Panneau photovoltaïque	41
II.3	Simulation du panneau photovoltaïque	42
II.3.1	Comparaison avec le module PB Solar 2150S.....	44
II.3.2	Influence de l'éclairement et la température sur les courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$	44
II.4	Généralités sur l'hacheur.....	48
II.4.1	Exigences de l'utilisateur	49

II.4.2 Les types d'hacheur.....	50
II.5 Choix du convertisseur DC-DC	55
II.6 Détermination des paramètres du hacheur Boost.....	55
II.7 Simulation de convertisseur boost	59
II.9 Simulation du système (panneau+hacheur)	60
II.10 Conclusion.....	65
CHAPITRE III : COMMANDE MPPT DE SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE	66
III.1 Introduction	67
III.2 Suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque	67
III.2.1 Introduction.....	67
III. 2.2 Principe du MPPT.....	67
III.3 Algorithmes de commande MPPT.....	70
III.3.1 Principe de la commande ‘‘Perturbation et Observation’’ (P&O)	70
III.3.2 Programme de simulation de l’algorithme perturbation et observation P&O	73
III.4 Simulation du système global	73
III.5 Conclusion	77
CONCLUSION GENERALE.....	79
BIBLIOGRAPHIE.....	81
ANNEXE.....	84

INTRODUCTION

GENERALE

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir en effet les besoins énergétique des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assuré à partir de ressources non renouvelables comme le charbon, le gaz naturel, le pétrole et l'uranium. La consommation mondiale d'électricité observée durant ces dernières décennies est fortement liée au développement de l'industrie, du transport et des moyens de communications. Les sources d'énergie du type fossile à une vitesse de régénération extrêmement lente à l'échelle humaine. Ce qui entrainera à plus ou moins courte échéance un risque d'épuisement de ces ressources.

D'autant plus que la demande ne cesse de croître se traduisant par exemple par une forte fluctuation du prix mondial du pétrole. Par énergie renouvelable, on entend des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée qui regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue. Chaque jour, la terre reçoit sous forme d'énergie solaire l'équivalent de la consommation électrique de 5.9 milliards de personnes pendant 27 ans.

Aujourd'hui l'énergie solaire fournit un rendement de conversion énergétique en cours d'amélioration, alors que le rendement d'une centrale thermique fondé sur la combustion d'un minerais fossile est au mieux de 30 à 35% [1]. Cette utilisation doit être encouragée par des mesures appropriées et une politique énergétique des états. Dans les pays industrialisés, les lois sur les énergies renouvelables ont permis de booster fortement le marché du photovoltaïque.

La technologie photovoltaïque permet de transformer une partie de cette énergie en électricité. Cette transformation s'effectue sans bruit, sans émission de gaz : elle est donc par nature totalement propre. Par ailleurs, l'absence de mise en mouvement de pièces mécaniques lui confère un niveau de fiabilité inégalable (durée de vie moyenne d'un module estimée à plus de 30ans).

Particulièrement disponible dans la plupart des pays situés entre l'équateur et le 45° parallèle. C'est une source d'énergie d'une fiabilité remarquable qui présente un bilan énergétique et environnemental tout à fait favorable. On peut utiliser cette énergie pour l'alimentation des régions isolées ou désertes soit pour l'éclairage, pour le pompage d'eau, pour la charge d'une batterie ou pour la connexion sur le réseau public électrique.

L'Algérie, pays du soleil et de l'espace, peut s'inspirer de ces programmes pour une exploitation à grande échelle de l'énergie solaire. Elle a les moyens humains et financiers à la mesure de ces programmes. L'enjeu est grand, et vital. L'Algérie est dans le monde l'un des pays de fort potentiel d'exportation de l'énergie électrique solaire. [2]

Une caractéristique importante des panneaux solaires est que la puissance maximale disponible est fournie seulement en un seul point de fonctionnement défini par une tension et un courant connus, appelé point de puissance maximale. En outre, la position de ce point n'est pas fixe mais elle se déplace en fonction de l'irradiation et de la température des cellules solaires ainsi que de la charge utilisée [3]. A cause du coût relativement onéreux de ce genre d'énergie, on doit extraire le maximum de puissance des panneaux solaires. Cela nécessite un mécanisme de poursuite de ce point afin que la puissance maximale soit générée en permanence ce qui est connu sous le nom de commande MPPT « The maximum power point tracking ». [1]

Nous nous intéressant dans ce mémoire à l'étude et la modélisation d'un panneau PV reliée à un hacheur élévateur commandé par la technique MPPT « The maximum power point tracking ».

Ce mémoire est divisé en trois chapitres, réparti comme suit:

Dans le premier chapitre, nous avons présenté une généralité sur les systèmes photovoltaïques, la constitution des cellules photovoltaïques, l'effet photovoltaïque, leurs principes de fonctionnement, et nous terminions avec leurs avantages et inconvénients.

Dans le deuxième chapitre, nous nous sommes intéressés plus à la modélisation de la cellule et l'analyse de ses caractéristiques, qui étaient conforme à ceux du constructeur puis pour adapter la source PV à la charge caractérisé par une tension continu nominale, nous allons utiliser un hacheur élévateur. Ce qui nécessite une étude préalable.

Dans le troisième, nous avons repris le modèle établi au chapitre précédent du système photovoltaïque, que nous lui avons appliqué la technique MPPT pour un meilleur rendement du système. Nous allons citer trois algorithmes réalisant le suivi du point à puissance maximal, puis nous allons nous intéresser à l'application de celle nommée perturb and observe.

CHAPITRE I : GENERALITE
SUR LE SYSTEME
PHOTOVOLTAÏQUE

1.1 Introduction

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, elle pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie. C'est pourquoi, L'homme cherche depuis long temps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser ce but en utilisant plusieurs types de procédés parmi eux le moyen dit cellule photovoltaïque. [4]

Dans ce chapitre nous allons étudier le fonctionnement d'une cellule PV et en déduire son modèle mathématique. Nous avons aussi cité les différents types de cellule PV ainsi que les modes de montage ce qui conduit au module PV, l'association de ce dernier permet de réaliser un panneau PV.

1.2 L'énergie solaire

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (KWc /m²) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année. L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés:

- **L'énergie solaire thermique:** qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux sombres. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.
- **L'énergie solaire photovoltaïque:** qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon. [5]

1.3 Rayonnement solaire :

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 tout les éléments chimiques connus depuis que Langevin et Perrin, 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. [6]

Sa lumière, à une vitesse de 300000 km/s, met environ 8 minutes pour parvenir à la terre, sa distribution spectrale de l'atmosphère est présenté un maximum pour une longueur d'onde d'environ 0.5 μ m, la température de corps noir à la surface du soleil est d'environ 5780°K [7] :

Diamètre de soleil $D_s = 1.39.10^9\text{m}$;

Diamètre de la terre $D_t = 1.27.10^7\text{m}$;

Distance moyenne soleil_ terre $L_{ts} = 1.5. 10^{11}\text{m}$.

1.3.1 Rayonnement direct

Flux solaire sous forme de rayons parallèles provenant du disque soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère. [8]

1.3.2 Rayonnement diffus

C'est la partie du rayonnement provenant du soleil, ayant subi multiples réflexions (dispersions), dans l'atmosphère. [8]

1.3.3 Rayonnement réfléchi

C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend directement de la nature du sol (nuage, sable...). Il se caractérise par un coefficient propre de la nature de lieu appelé Albédo(ϵ) $0 \leq \epsilon \leq 1$. [8]

1.3.4 Rayonnement global

Un plan reçoit de la part du sol un rayonnement global qui est le résultat de la superposition des trois compositions direct, diffus et réfléchi. [8]

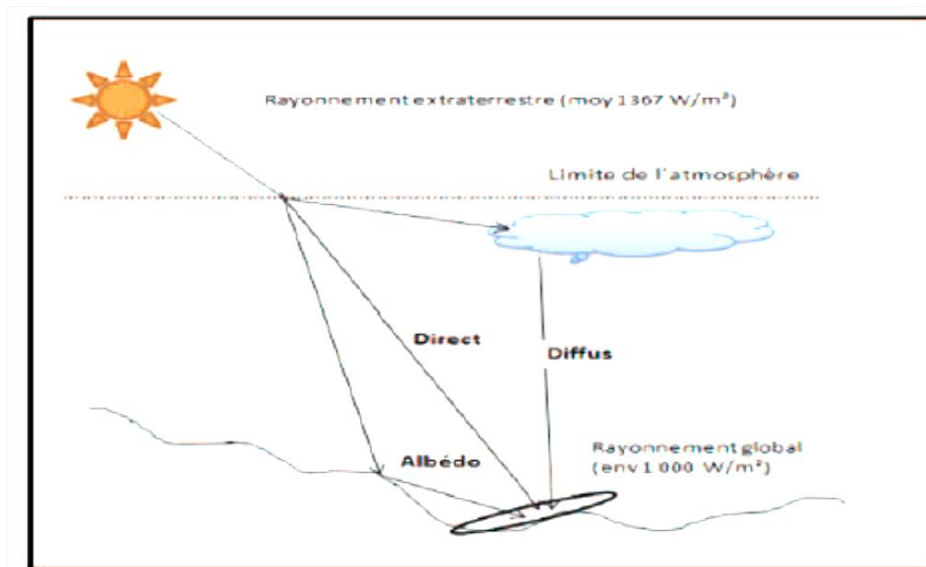


Figure (I.1) : Composantes du rayonnement solaire au sol

1.4 Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est un phénomène physique propre à certains matériaux Appelés "semi-conducteurs" qui exposés à la lumière, produisent de l'électricité. Le plus connu d'entre eux est le silicium cristallin qui est utilisé aujourd'hui dans 90% des panneaux solaires produits dans le monde. [9]

Cet effet est obtenu par absorption des photons dans un matériau semi-conducteur qui génère alors des paires électrons-trous (excitation d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction) créant une tension ou un courant électrique. Plusieurs types de composants peuvent être créés à partir de ce principe. Ils sont appelés photodiodes,

phototransistors ou des photopiles. Cet effet photovoltaïque est notamment utilisé dans les panneaux solaires photovoltaïques.

1.5 Cellules photovoltaïques

La cellule photovoltaïque (photopile) forme l'élément de base du générateur photovoltaïque, c'est une méthode optoélectronique de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Elle est réalisée à base de matériaux semi-conducteurs, généralement le silicium.



Figure (I.2) : cellule photovoltaïque

1.5.1 Historique de la cellule photovoltaïque

Le mot photovoltaïque vient de mot grec "photos" qui signifie la lumière et voltaïque du physicien italien "Alessandro volta".

En 1887 « Heinrich Rudolph Hertz » présenta pour la première fois l'effet photoélectrique dans un article de la revue scientifique « Annalen der Physik ». On appelle effet photoélectrique l'émission des électrons par un matériau soumis à un éclairage ou rayonnement électromagnétique d'intensité propre aux matériaux.

En 1875 « Wiener Von Siemens » expose devant l'Académie des sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs .Mais jusqu'à la seconde guerre mondiale .le phénomène reste encore une découverte anecdotique

En 1954 Les chercheurs américains "Gerald Pearson", "Darry chapin" et "Calvin Fuller" travaillent pour les laboratoires Bell mettent au point une cellule PV en silicium.

En 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. [4]

1.5.2 Principe de fonctionnement

Il existe différentes techniques permettant la conversion directe de la lumière solaire en électricité, la plus connue est la conversion photovoltaïque effectuée à l'aide de matériaux semi-conducteurs tel que le silicium (Si), le germanium (Ge) le sélénium (Se) ou les composés semi-conducteurs tel que l'arséniure de gallium (GaAs), le tellure de cadmium (CdTe). Les cellules solaires de type GaAs sont très coûteuses dans leur fabrication, leur utilisation est aujourd'hui essentiellement limitée aux applications spatiales. La majorité des cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir du silicium cristallin, car il possède la caractéristique d'être non toxique contrairement au cadmium ou au sélénium, en plus, il permet d'atteindre des efficacités de conversion remarquables, il constitue environ 28% de l'écorce terrestre sous forme de composés (silicates, silice), ce qui en fait une source quasi inépuisable.

La cellule solaire à semi-conducteur est un dispositif permettant de débiter un courant électrique dans une charge externe lorsque celui-ci est exposé à la lumière. Son principe de fonctionnement se résume comme suit:

Lorsque la cellule est exposée au rayonnement solaire, les photons d'énergie ($E_{ph} = h\nu$) pénétrant dans la cellule solaire transmettent leur énergie aux atomes de la jonction. Si cette énergie est suffisamment élevée, elle peut faire passer les électrons de la bande de valence à la bande de conduction du matériau semi-conducteur et créer ainsi des paires «électron- trou».

Les électrons (charges N) et les trous (charges P), sont alors maintenus séparés par un champ électrique qui constitue une barrière de potentiel.

Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone N rejoignent les trous de la zone P via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel et un courant électrique circule. Figure (I -3) [7].

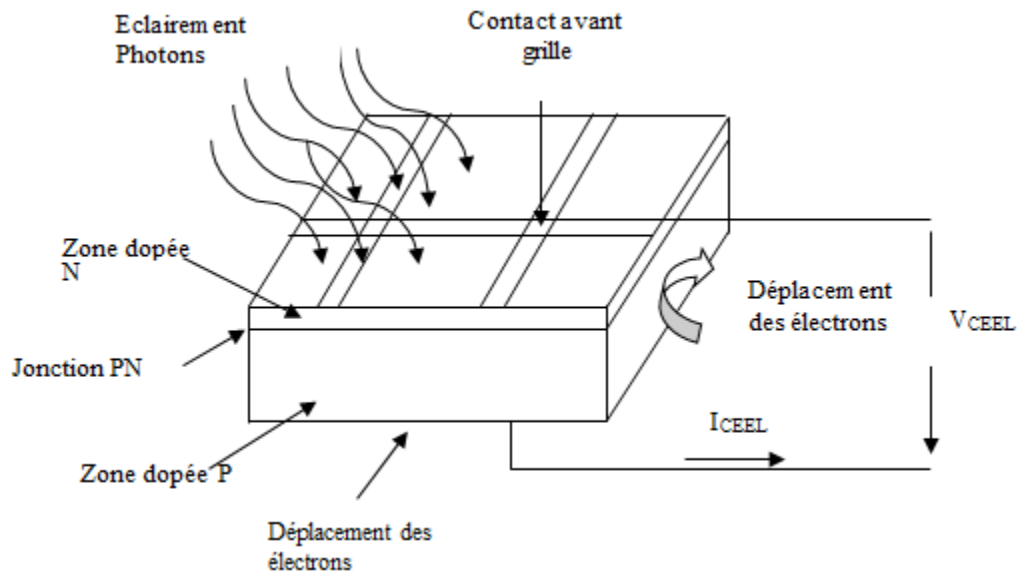


Figure (I.3) : Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire

Les cellules les plus répandus actuellement sont à base de silicium (différence de potentiel de 0.6 V) [7].

1.5.3 Les différents types des cellules photovoltaïques

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

Actuellement, il existe trois principaux types de cellules [10]:

- **Les cellules monocristallines**

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



Figure (I.4) : le type de cellule monocristalline

- **Les cellules polycristallines**

Leur conception est plus facile et leur coût de fabrication est moins important.

Cependant leur rendement est plus faible : de 11% à 15% jusqu'à 19.8% en laboratoire).



Figure (I.5) : le type de cellule poly cristalline

- **Les cellules amorphes**

Elles ont un faible rendement (5% à 8%, 13% en laboratoire), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé.

Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres.

L'avantage de ce dernier type est le fonctionnement avec un éclairage faible (Même par temps couvert ou à l'intérieur d'un bâtiment).



Figure (I.6) : le type de cellule amorphe

1.6 Générateur photovoltaïque(GPV)

Le générateur photovoltaïque est un ensemble d'équipements mis en place pour exploiter l'énergie photovoltaïque afin de satisfaire les besoins en charge. En fonction de la puissance désirée, les modules peuvent être assemblés en panneaux pour constituer un champ photovoltaïque. Relié au récepteur sans autres éléments, le panneau solaire fonctionne au fil du soleil, c'est-à-dire que la puissance électrique fournie au récepteur est fonction de la puissance d'ensoleillement. Elle est donc à son maximum lorsque le soleil est au zénith et est nulle la nuit.

Mais, très souvent, les besoins en électricité ne correspondent pas aux heures d'ensoleillement et nécessitent une intensité régulière (éclairage ou alimentation). On équipe alors le système de batteries qui permettent de stocker l'électricité et de la restituer en temps voulu.

Un régulateur est alors indispensable pour protéger les batteries contre les surcharges ou les décharges profondes nocives à sa durée de vie. [11]

1.7 Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV)

L'association de plusieurs cellules photovoltaïques en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque. Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur. D'une autre part, si les cellules se connectent en parallèle, c'est l'ampérage qui augmentera [12] :

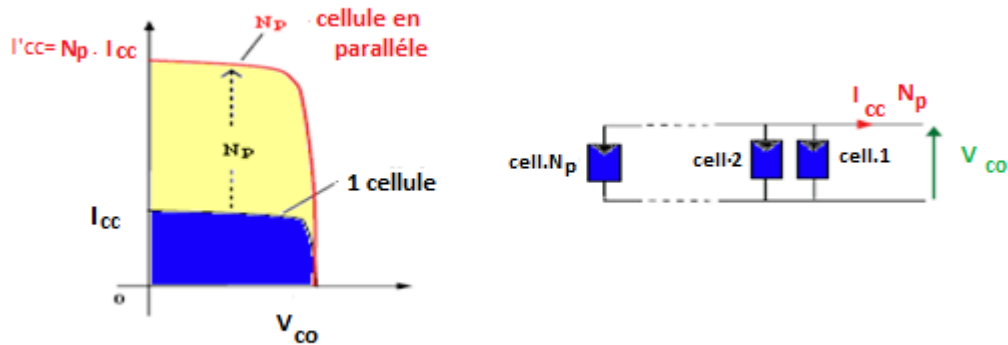
1.7.1 Association des cellules photovoltaïques en parallèle

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement des cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants. L'équation (I.1) résume les caractéristiques électriques d'une association parallèle de N_p cellules. La figure (I. 3) montre les caractéristiques résultantes d'un regroupement de N_p cellules en parallèle. [13]

$$I'_{CC} = N_p \cdot I_{CC} \quad [I.1]$$

avec :

I_{CC} : Courant de court circuit



Figure(I.7):Caractéristique résultantes d'un regroupement de N_p cellules en parallèle

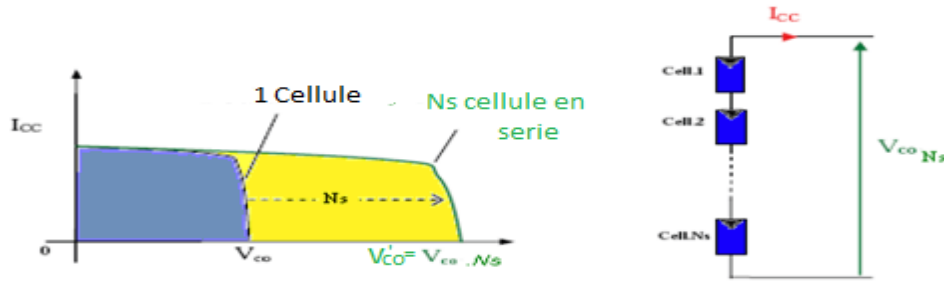
I.7.2 Association des cellules photovoltaïques en série

D'autre part un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions élémentaires. L'équation (I.2) résume les caractéristiques électriques d'une association série de N_s cellules. La figure (I.4) montre les caractéristiques résultantes d'un regroupement de N_p cellules en série. [13]

$$V'_{CO} = N_s \cdot V_{CO} \quad [I.2]$$

avec :

V_{CO} : La tension du circuit ouvert



Figure(I.8):Caractéristique résultantes d'un regroupement de N_s cellules en série

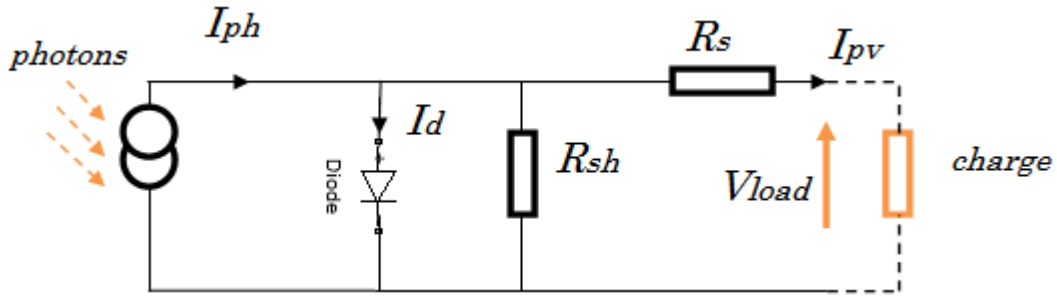
1.8 Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque

La figure (I.9) présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque sous éclairement. Il correspond à un générateur de courant I_{ph} monté en parallèle avec une diode. Deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma.

Ces résistances ont une certaine influence sur la caractéristique $I = f(V)$ de la cellule : [14]

La résistance série (R_s) est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles;

La résistance shunt (R_{sh}) est due à un courant de fuite au niveau de la jonction; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.



Figure(I.9) : Schéma équivalent de la cellule photovoltaïque.

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

$$I_{pv} = [I_{ph} - I_s (e^{\left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{AKT_{mod}} \right)} - 1) - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}}] \quad [I.3]$$

Où I_s est le courant de saturation, K est la constante de Boltzmann ($1,3854 \cdot 10^{-23} J/K$), T est la température effective des cellules en Kelvin(K), q est la charge de l'électron ($1,6 \cdot 10^{-19} C$), A est le facteur d'idéalité de la jonction ($1 < A < 3$), 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.[15]

I.9 Paramètres d'une cellule photovoltaïque

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique. Les plus usuels sont les suivantes [16]:

I.9.1 Courant de court-circuit (I_{cc})

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal (R_s nulle et R_{sh} infinie), ce courant se confond avec le photo-courant I_{ph} dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation (I.3), on obtient:

$$I_{cc} = I_{ph} - I_s \left[e^{\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{V_{th}}} - 1 \right] - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}} \quad [I.4]$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme

$I_s \left[e^{\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{V_{th}}} - 1 \right]$ devant I_{ph} . L'expression approchée du courant de court-circuit est alors:

$$I_{cc} \cong \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right)} \quad [I.5]$$

Quantitativement, il a la plus grande valeur du courant généré par la cellule (pratiquement $I_{cc} = I_{ph}$). [16]

I.9.2 Tension de circuit-ouvert (V_{co})

C'est la tension V_{co} pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque). [16]

$$0 = I_{cc} - I_s \left[e^{\frac{V_{pv}}{V_{th}}} - 1 \right] - \frac{V_{pv}}{R_{sh}} \quad [I.6]$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à :

$$V_{co} = V_{th} \ln \left[\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right] \quad [I.7]$$

1.9.3 Rendement énergétique

C'est le rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule $P_{\max}(I_{\text{opt}}, V_{\text{opt}})$ et la puissance solaire incidente. Il est donné par [16] :

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{inc}}} = \frac{I_{\text{opt}} V_{\text{opt}}}{P_{\text{inc}}} \quad [\text{I.8}]$$

Avec P_{inc} est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des photopiles. Ce paramètre reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

1.9.4 Facteur de forme

On appelle facteur de forme FF, dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage (fill factor), le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule $P_{\max}(I_{\text{opt}}, V_{\text{opt}})$ et le produit du courant de court-circuit I_{cc} par la tension de circuit-ouvert V_{co} (c'est-à-dire la puissance maximale d'une cellule idéale). Le facteur de forme indique la qualité de la cellule ; plus il s'approche de l'unité plus la cellule est performante, Il est de l'ordre de 0.7 pour les cellules performantes ; et diminue avec la température. Il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites R_s et R_{sh} . Il est défini par [16] :

$$\text{FF} = \frac{P_{\max}}{I_{\text{cc}} V_{\text{co}}} = \frac{I_{\text{opt}} V_{\text{opt}}}{I_{\text{cc}} V_{\text{co}}} \quad [\text{I.9}]$$

1.10 Module photovoltaïque

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance vis-à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés, délivre au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au volt (tension de jonction PN). Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un panneau photovoltaïque. En effet, les modules PV sont composés d'un ensemble de cellules mises en

CHAPITRE I : GENERALITE SUR LE SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

série, réalisant la conversion proprement dite de la lumière du soleil en électricité. Ils sont eux-mêmes associés en série et parallèle pour former un champ photovoltaïque d'une puissance crête définie selon des conditions spécifiques d'éclairement, de température et de spectre solaire. La plupart des modules commercialisés sont constitués de deux à quatre réseaux de cellules en silicium cristallins connectés en série. [8]

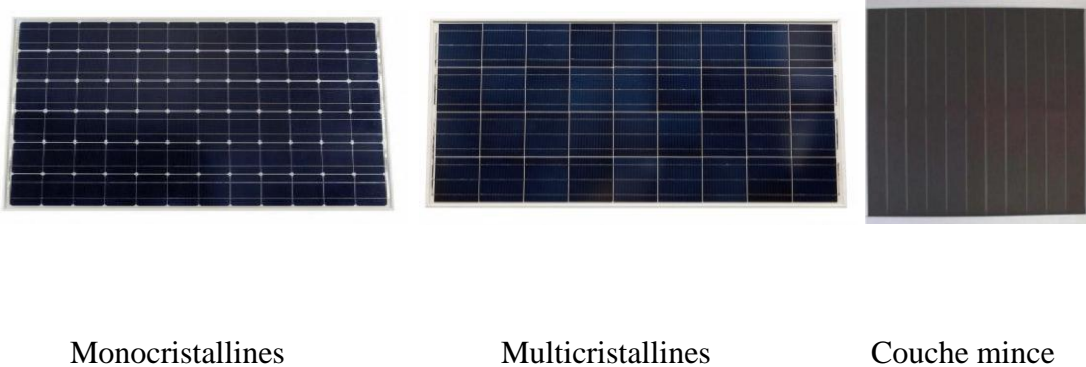


Figure (I.10) : Module photovoltaïque

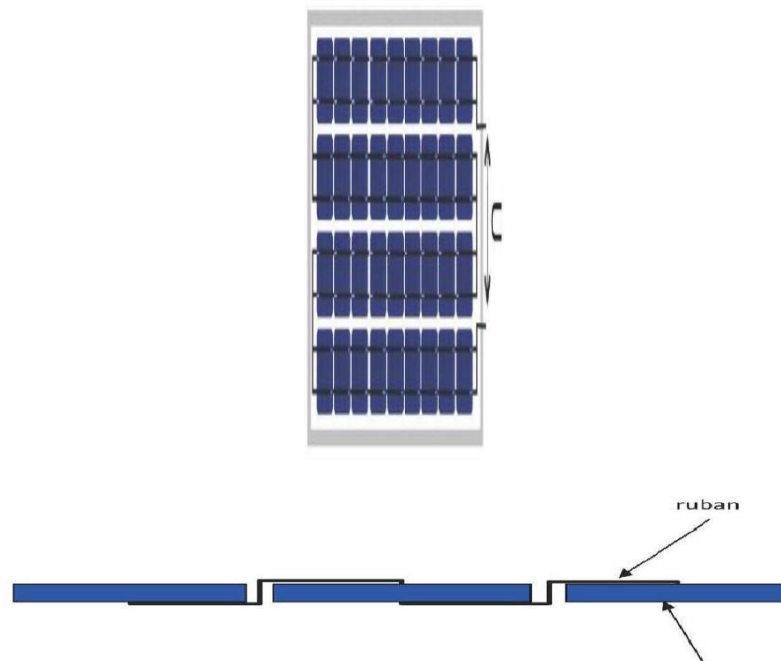


Figure (I.11) : Câblage des cellules dans un module

Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes :

- Protection des cellules contre les agents atmosphériques ;
- Protection mécanique et support ;
- Connexion électrique entre cellules et avec l'extérieur. [8]

1.11 Panneau solaire

Le panneau solaire ou (champ solaire) se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique. [17]



Figure (I.12) : panneau solaire

1.12 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

- **Avantage :**
 - L'énergie photovoltaïque offre de multiples avantages :
 - La production de cette électricité renouvelable est propre. Elle n'est pas toxique.
 - Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables.

- L'énergie photovoltaïque est particulièrement attractive pour les sites urbains, vu la petite taille des installations et leur fonctionnement silencieux.
- La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville.
- L'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée directement chez l'utilisateur.
- Les matériaux employés (verre, aluminium) résistent aux pires conditions climatiques.
- La durée de vie des panneaux photovoltaïques est très longue. Certains producteurs garantissent les panneaux solaires pour une durée de 25 ans. [18]

- **Inconvénients :**

- Le coût très élevé des investissements.
- Faible rendement de conversion.
- Dans le cas d'une installation photovoltaïques autonome, il faut inclure des batteries dont le coût reste très élevé.

Malgré ces inconvénients, le marché photovoltaïque ne cesse pas de trouver des applications et de s'agrandir. En plus la technologie photovoltaïque est dans un processus de maturation dans lequel les inconvénients pourraient se multiplier, notamment du côté des coûts de fabrication. [18]

1.13 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu des notions sur l'énergie solaire, rayonnements solaire et ses caractéristiques, ainsi la définition et le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque. En plus nous avons étudié le fonctionnement d'une cellule PV et en déduire son modèle mathématique. Nous avons aussi cité les différents types de cellule PV ainsi que les modes de montage ce qui conduit au module PV, l'association de ce dernier permet de réaliser un panneau PV.

CHAPITRE II :
MODELISATION D'UN
SYSTEME
PHOTOVOLTAÏQUE

II.1 Introduction

Les systèmes utilisés en électrotechnique permettent de transformer la nature de l'énergie électrique et de convertir l'énergie électrique en une autre forme d'énergie (mécanique, thermique, chimique, lumineuse...etc.). L'électronique, l'automatique et l'informatique s'intéressent essentiellement au traitement du signal (ou de l'information).

Les systèmes de l'électrotechnique traditionnelle (machines tournantes, éclairage, chauffage, climatisation,...) permettant la conversion de l'énergie électrique, ne peuvent pas toujours être reliés directement à une source électrique. Il faut alors avoir recours à un dispositif, jouant le rôle d'interface, permettant d'adapter (de transformer) les caractéristiques de la source afin d'assurer le bon fonctionnement (et d'introduire des moyens de réglage de transfert d'énergie).

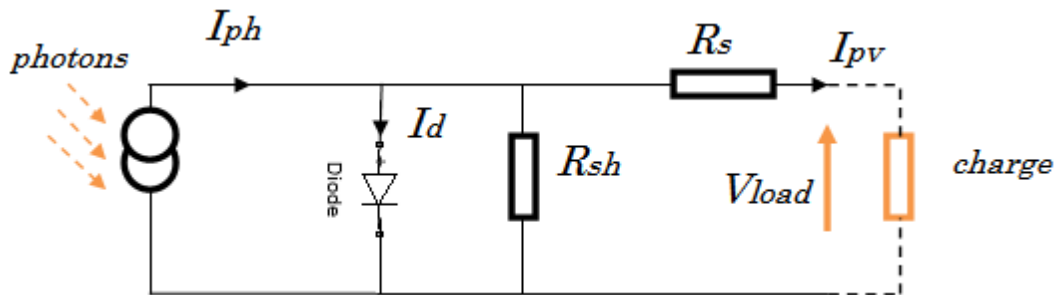
II.2 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

II.2.1 Modèle de cellule

Les solutions analytiques donnent une compréhension intuitive des cellules solaires et de leurs performances. Elles sont limitées dans leurs précisions en raison des nombreuses hypothèses simplificatrices effectuées. Il est plus direct de résoudre les équations sans la nécessité de faire autant d'hypothèses simplificatrices avec des codes de calcul utilisant la méthode des différences ou éléments finis pour résoudre les équations concernant des matériaux semi-conducteurs constitutifs des cellules solaires. La simulation numérique permet une analyse de la configuration et des conditions de fonctionnement pour laquelle des expressions analytiques simples ne sont pas adaptées. [8]

Une cellule photovoltaïque a un comportement équivalent à une source de courant shuntée par une diode figures (II.1). 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_{sh} qui provient des contacts métalliques et des résistances de fuite sur la périphérie de la cellule.

Il existe plusieurs schéma d'une cellule photovoltaïque et nous avons utilisé le modèle basé sur le schéma d'une cellule photovoltaïque complète vu sa simplicité.



Figure(II.1) : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque complète

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

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad [II.1]$$

I_{pv} : Courant générer par la cellule photovoltaïque ;

I_{ph} : Photo courant créé par la cellule ;

I_d : Le courant circulant dans la diode ;

I_{sh} : Le courant circulant dans la résistance R_{sh} ;

Le courant passant par la résistance R_{sh} est donné par :

$$I_{sh} = \frac{V_d}{R_{sh}} \quad [II.2]$$

V_d : Tension aux bornes de la diode;

R_{sh} : Résistance Parallèle.

Le courant de la jonction I_d est donné par :

$$I_d = I_s \left(e^{\frac{V_d}{V_{th}}} - 1 \right) \quad [II.3]$$

I_s : Courant de Saturation ;

V_{th} : Tension thermique.

$$\text{Avec : } V_{th} = \frac{A.K.T_{mod}}{q} \quad [\text{II.4}]$$

T_{mod} : Température de fonctionnement de la cellule ;

A : Facteur d'idéalité de la diode;

K : la constante de Boltzmann ($1,3854 \cdot 10^{-23}$ J/K) ;

q : Charge électrique élémentaire ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C).

$$T_{mod} = T_c + T_{ref} + G \left(\frac{NOCT-20}{800} \right) \quad [\text{II.5}]$$

T_c : Température ambiante;

T_{ref} : Température de référence [K];

G : Éclairement.

Le courant de saturation dépend de la température, son expression est sous la forme :

$$I_s = I_{os} \left(\frac{T_{mod}}{T_r} \right)^3 e^{\frac{q.E_g}{A.K} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_{mod}} \right)} \quad [\text{II.6}]$$

I_{os} : Le courant de court-circuit de la cellule ;

T_r : Température référence de la cellule;

E_g : Énergie de seuil.

Avec NOCT étant Condition de température nominale de fonctionnement de la cellule qui est donnée par le constructeur (Data-Sheet).

La tension V_d est donnée par :

$$V_d = V_{pv} + R_s I_{pv} \quad [\text{II.7}]$$

Le photon-courant est proportionnel à l'éclairement et dépend aussi de la température. Son expression est la suivante :

$$I_{ph} = [I_{cc} + K_i (T_{mod} - T_r)] \frac{G}{G_0} \quad [II.8]$$

I_{cc} : Courant de court de circuit ;

K_i : Coefficient de la température de I_{pv} ;

G_0 :Éclairement pour les STC.

En remplaçant dans (I.1) les équations (I.2), (I.3) et (I.8), nous obtenons :

$$I_{pv} = [I_{cc} + k_i (T_{mod} - T_r)] \frac{G}{G_0} - I_s \left(e^{\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{V_{th}}} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}} \quad [II.9]$$

II.2.2 Panneau photovoltaïque

Nous avons choisi Le BP Solar 2150S. Qui est un panneau photovoltaïque composé de 72 cellules monocristallines en série, ayant une puissance maximale de 150 W et considéré dans les conditions standards (STC : Standard Test Conditions) $G = 1000 \text{ W/m}^2$; $T_c = 25^\circ\text{C}$. Pour réaliser la modélisation de ce module, nous avons utilisé MATLAB comme outil de tests et de simulation.

Grandeurs	Valeurs
Puissance nominale	150 W
Tension au MPP (V_{pm})	34.0 V
Courant au MPP (I_{pm})	4.45 A
Courant de court-circuit (I_{cc})	4.75 A
Tension du circuit ouvert (V_{co})	42.8 V
Coefficient de température de (I_{cc})	$(0.065 \pm 0.015)\% / ^\circ\text{C}$
Coefficient de température de (V_{co})	$-(160 \pm 20) \text{ mV} / ^\circ\text{C}$
Coefficient de température de puissance	$-(0.5 \pm 0.05)\% / ^\circ\text{C}$
NOCT	$47 \pm 2^\circ\text{C}$

Tableau (II.1) : Caractéristiques électriques du PB 2150S

II.3 Simulation du panneau photovoltaïque

Pour l'analyse du fonctionnement du panneau photovoltaïque choisi, basé sur le modèle précédemment nous avons procédé à une série de simulations, ainsi les résultats obtenus sont présentés sur les figures suivantes :

Figure(II.3) : Présente la caractéristique Courant-Tension du panneau PV pour l'éclairement $G = 1000\text{W}/\text{m}^2$ et de température $T_c = 25^\circ\text{C}$

Figure(II.4) : Présente la caractéristique Puissance-Tension du panneau PV pour l'éclairement $G = 1000\text{W}/\text{m}^2$ et de température $T_c = 25^\circ\text{C}$

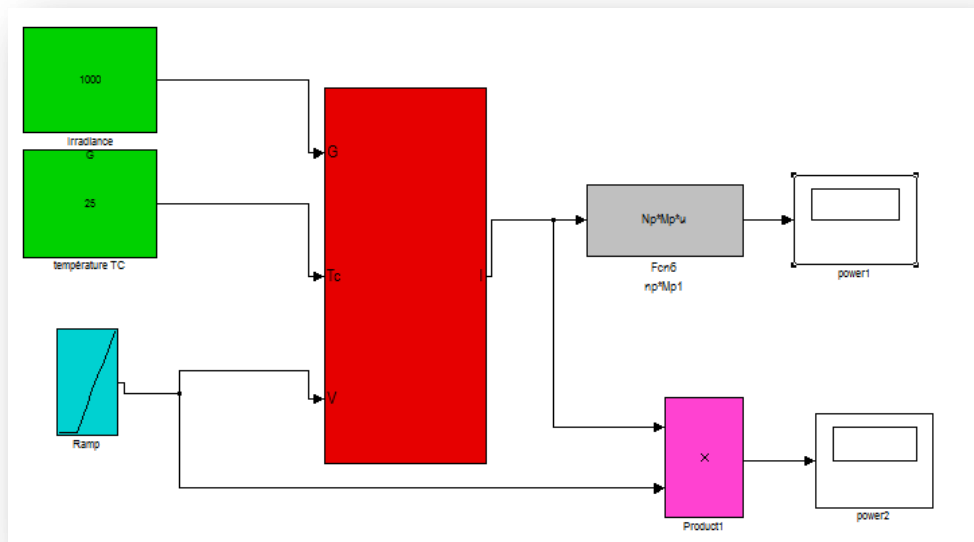
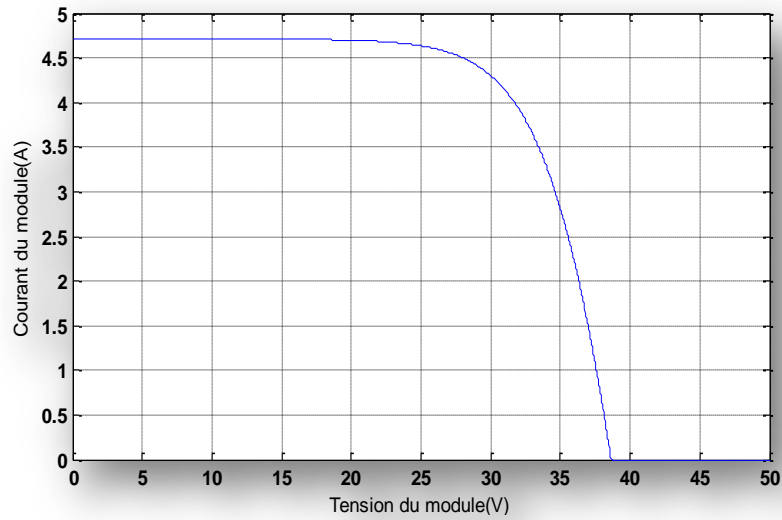
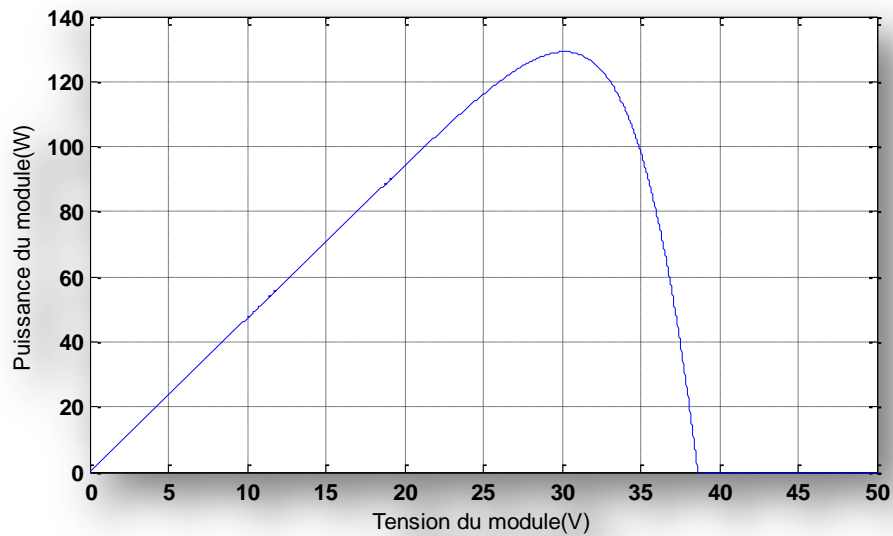


Figure (II.2) : Schéma de simulation du panneau PV BP solar 2150S



Figures(II.3) : Caractéristique Courant-Tension du panneau PV.



Figure(II.4) : Caractéristique Puissance-Tension du panneau PV

La figure(II.3) présente l'évolution du courant générée du module en fonction de la tension à température et éclairage fixe. On note que le courant reste constant jusqu'à $V=25V$ puis il diminue rapidement jusqu'à son annulation.

La figure(II.4) présente l'évolution de la puissance générée du module en fonction de la tension à température et éclairement fixe. On remarque que la puissance augmente linéairement jusqu'à la valeur maximal (129.1W) puis diminue rapidement.

II.3.1 Comparaison avec le module PB Solar 2150S

Avec l'association de 72 cellules en série nous avons pu faire la comparaison avec le module pratique PB Solar 2150S. La figure (II.5) montre les caractéristiques de l'association de ces 72 cellules.

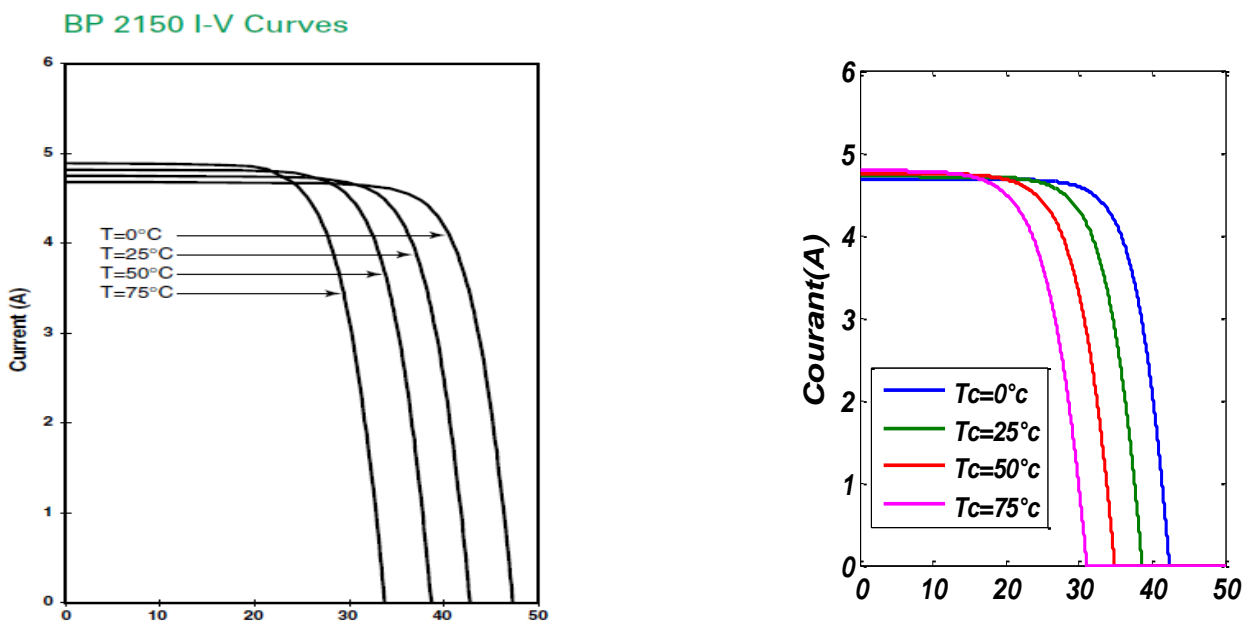


Figure (II.5) : Comparaison entre la simulation et le constructeur

On remarque le résultat de simulation est presque identique à celle du constructeur que nous avons choisis.

II.3.2 Influence de l'éclairement et la température sur les courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$

Les résultats de simulation du panneau photovoltaïque représentent par les figures (II.7) à (II.10). Ces figures représentent les caractéristiques Courant-Tension et Puissance-Tension pour différents éclairements et différents températures.

- Température fixe $T_c = 25^\circ\text{c}$ et pour différents éclairagements G

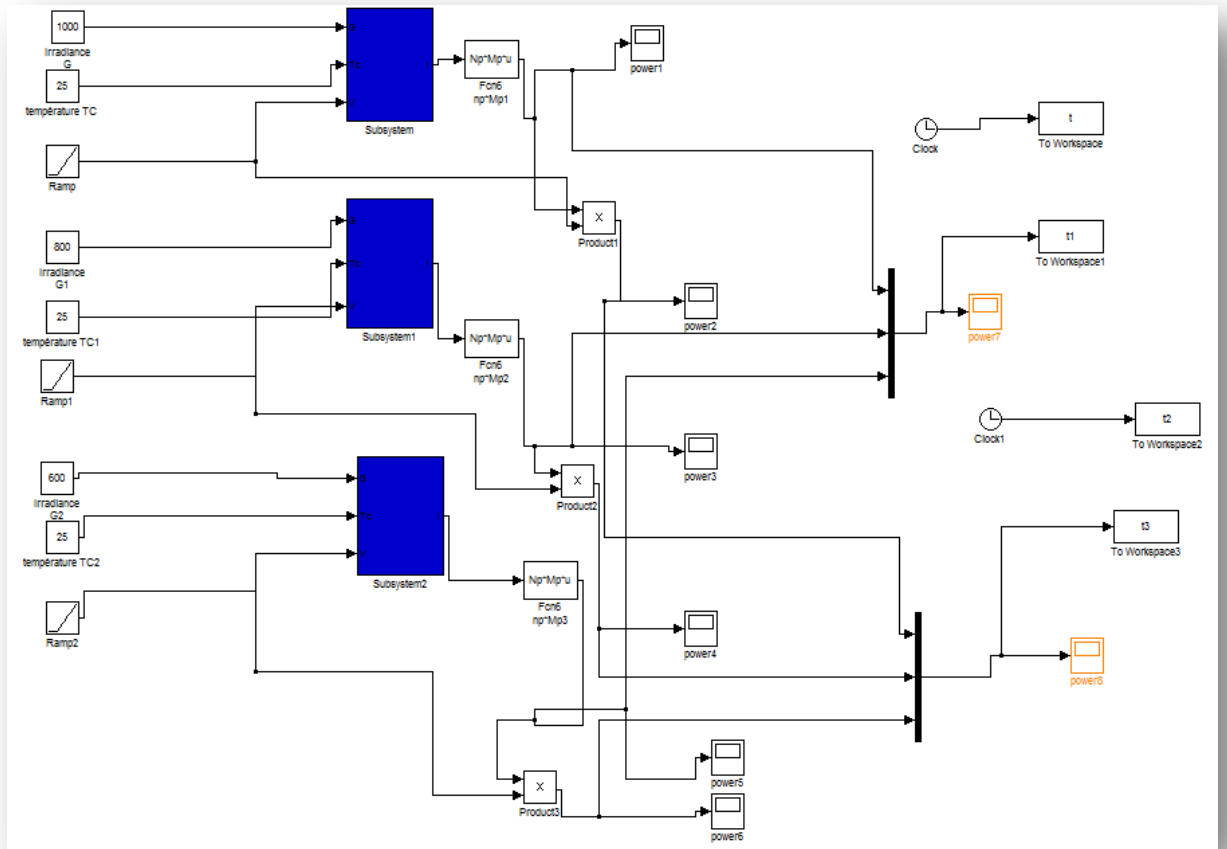


Figure (II.6) : Bloc Simulink de panneau photovoltaïque exposé à différents éclairagements

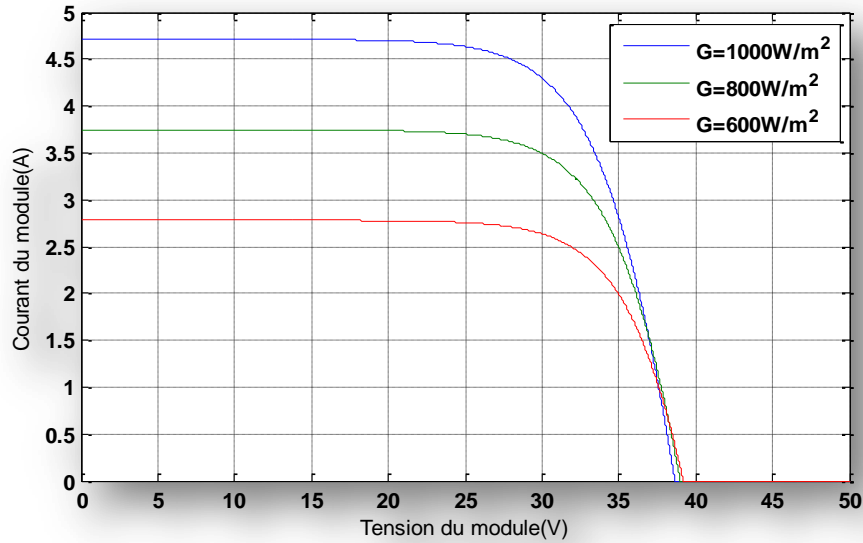


Figure (II.7) : Résultats de simulation des caractéristiques $I=f(V)$ pour différentes éclairement et une température $T_c = 25^\circ\text{C}$

La figure(II.7) présente l'évolution du courant généré du module en fonction de la tension (même plage de variation) de sortie à température fixe et éclairement variable, on constate que l'augmentation de l'éclairement entraîne une augmentation du courant.

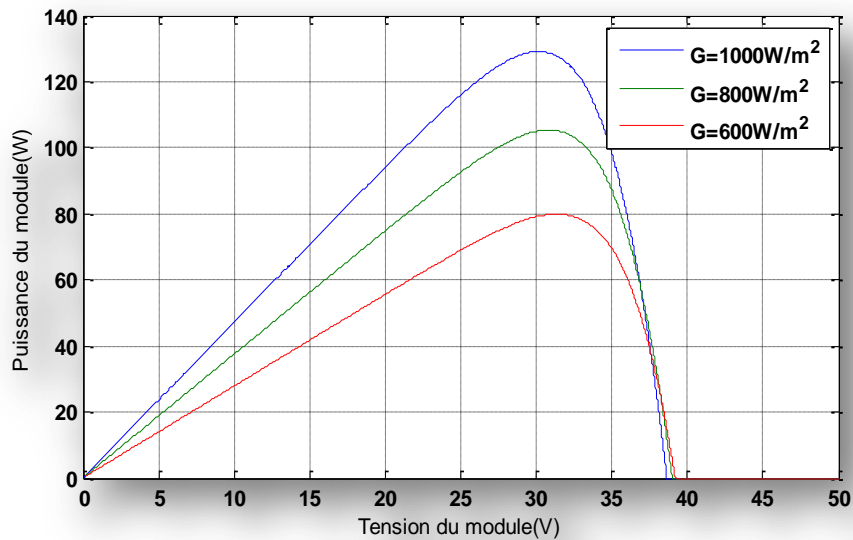


Figure (II.8) : Résultats de simulation des caractéristiques $P=f(V)$ pour différentes éclairement et une température $T_c = 25^\circ\text{C}$

La figure(II.8) présente l'évolution de la puissance du module en fonction de la tension à température fixe et éclairage variable, on constate que l'augmentation de l'éclairage entraîne une augmentation de la puissance.

- **Éclairage fixe $G = 1000\text{W/m}^2$ et pour des différentes températures**

Le même travail comme précédente, nous avons fixé éclairage pour différents températures.

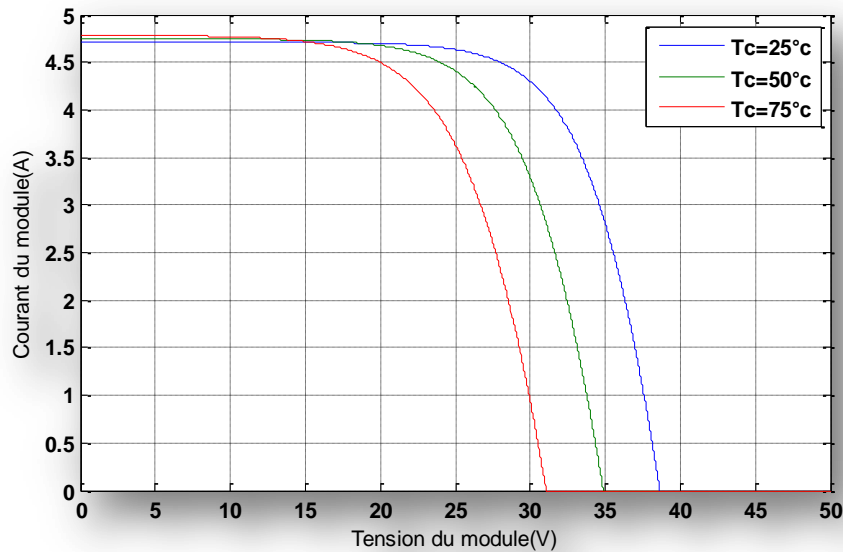


Figure (II.9) : Résultats de simulation des caractéristiques $I=f(V)$ pour différentes températures et un éclairement $G=1000\text{W/m}^2$

La figure(II.9) présente l'évolution du courant généré du module en fonction de la tension à éclairement fixe et température variable, on constate que l'augmentation de la température entraîne un courant relativement constant, on remarque aussi la tension maximale atteinte aux bornes du module diminue.

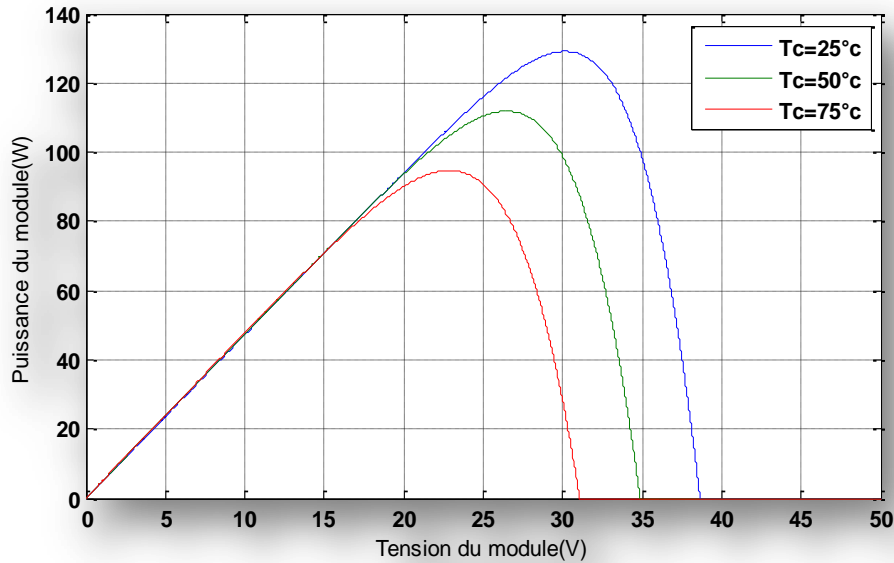


Figure (II.10) : Résultats de simulation des caractéristiques $P=f(V)$ pour différentes températures et un et un éclairement $G=1000W/m^2$

La figure(II.10) présente l'évolution de la puissance générée par le module en fonction de la tension à l'éclairement fixe et température variable, on constate que l'augmentation de la température entraîne une diminution de la puissance, on remarque aussi la tension maximal atteinte aux bornes du module diminue.

II.4 Généralités sur l'hacheur

L'hacheur est un convertisseur continu\continu permettant de convertir une énergie 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. [19]

Ils sont souvent utilisés comme une interface d'adaptation qui assure la poursuite du point de puissance maximale selon des stratégies de contrôle spécifiques. [9]

Les panneaux solaires et la charge peuvent être soit de nature capacitive (source de tension), soit de nature inductive (source de courant). La charge peut être de nature résistive aussi. [9]

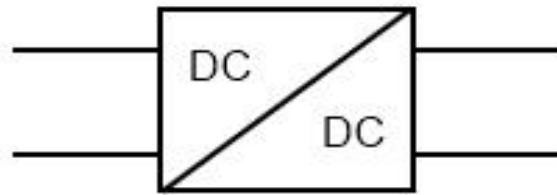


Figure (II.11) : Symbole d'un convertisseur DC-DC

II.4.1 Exigences de l'utilisateur

La fonction essentielle d'un convertisseur de puissance est double : d'une part adapter la forme de l'énergie aux besoins d'une charge (typiquement en transformant une tension en une tension continue et/ou en modifiant le niveau de la tension) et d'autre part stabiliser ce flux d'énergie en filtrant autant que possible les fluctuations de la source.

Dans le principe, assurer ces deux fonctions n'est pas excessivement complexe : fabriquer une alimentation élémentaire demande un nombre de composants relativement réduit.

Mais l'utilisateur privé ou professionnel a beaucoup d'autres exigences. Idéalement, un convertisseur doit en effet [20] :

1. Délivrer une ou souvent plusieurs tensions parfaitement continues, éventuellement ajustables et stables quel que soit le courant demandé ;
2. posséder un rendement élevé ;
3. Présenter un niveau de sécurité élevé, notamment en répondant aux normes d'isolation entre l'utilisateur et le réseau ;
4. Posséder une fiabilité élevée relativement à la durée de vie de l'application, en ce compris la résistance aux contraintes de l'environnement (vibrations, température, humidité, etc.) ;
5. Ne pas être une source de perturbations pour le réseau électrique amont ou les équipements environnants ni être trop sensible aux perturbations émanant de ceux-ci (compatibilité électromagnétique) ;
6. Etre la plus petite et la plus légère possible ;
7. Et bien entendu être de préférence peu coûteuse ...

II.4.2 Les types d'hacheur

Nous traitons dans cette partie des convertisseurs unidirectionnels en courant et en tension. Cela implique que la fluence d'énergie ne peut se faire, au sein du convertisseur, que dans un seul sens. Cela revient également à considérer [21]:

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

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

- hacheur abaisseur (ou buck),
- hacheur élévateur (ou boost),
- hacheur abaisseur-élévateur (buck-boost).

II.4.2.1 Hacheur Buck

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant. L'interrupteur K figure (II.12) 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). [22]

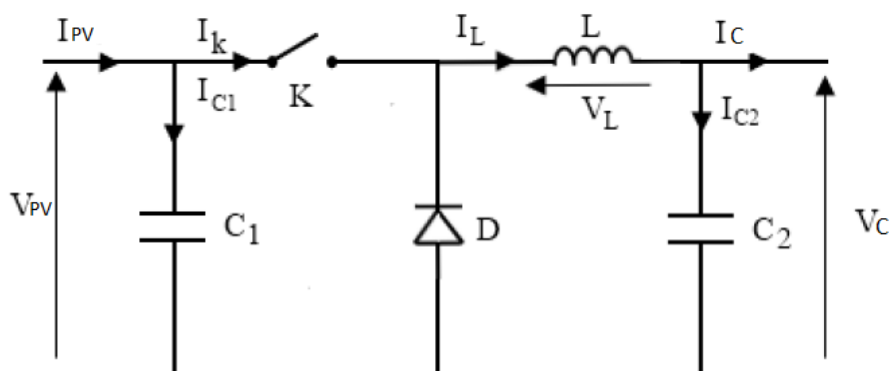


Figure (II.12): Schéma électrique d'un hacheur buck

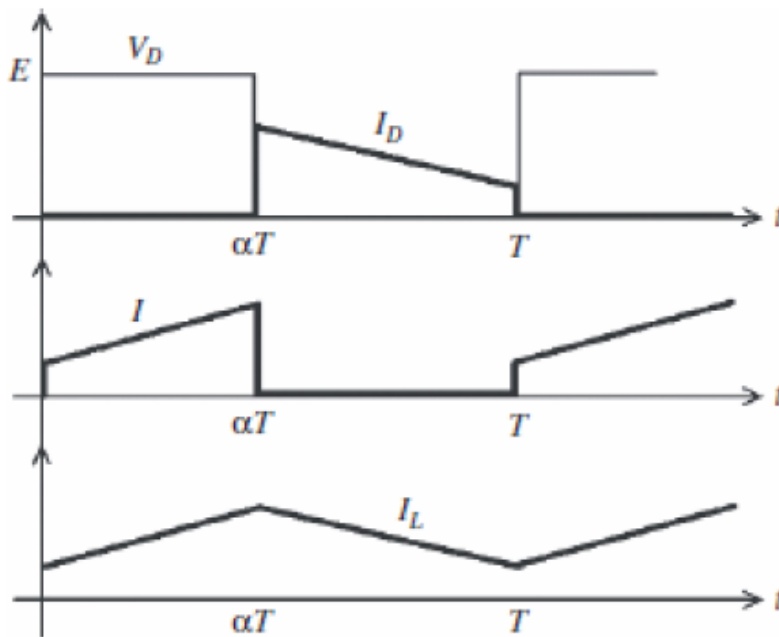
Fonctionnement :

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT , la tension V_{pv} appliquée aux bornes de la diode est l'interrupteur est commandé à la fréquence de découpage $f_e = \frac{1}{T}$.

La source V_{pv} fournit de l'énergie à la charge et à l'inductance. Pendant le temps $t \in [\alpha T, T]$ l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. La tension à ses bornes est donc nulle. [23]

Les chronogrammes (tracés dans le cas idéal) de la figure(II.13) sont tracés dans le cas d'une conduction continue, c'est-à-dire que le courant ne repasse jamais par zéro. Pour calculer la relation entre la tension d'entrée et celle de sortie, on exprime que la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle. [23]

$$V_c = \alpha \cdot V_{pv} \quad [\text{II.10}]$$



Figure(II.13) : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur buck

II.4.2.2 Hacheur boost

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K figure(II.14) 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). [22]

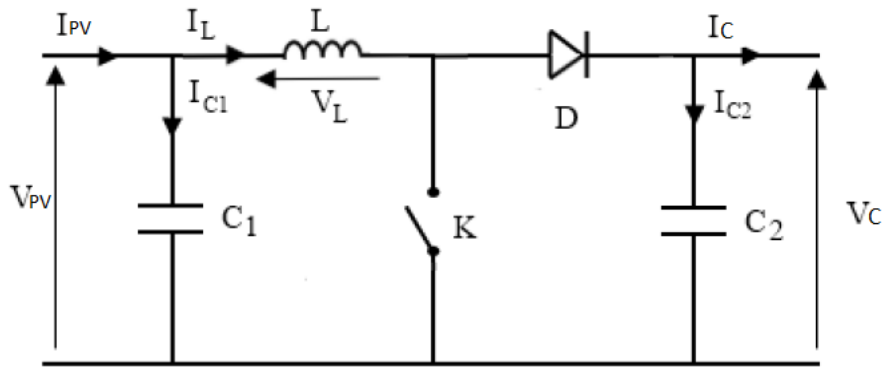


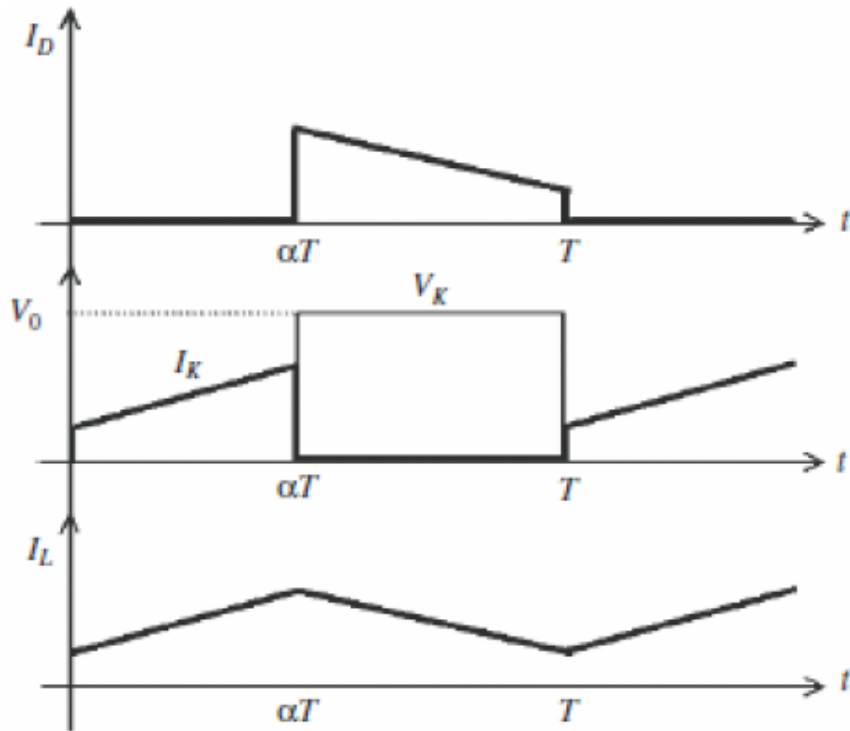
Figure (II.14) : Schéma électrique d'un hacheur boost

Fonctionnement :

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT , le courant dans l'inductance croît linéairement. La tension aux bornes de K est nulle. Pendant le temps $t \in [\alpha T, T]$, l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D.

On a alors $V_k = V_c$. En écrivant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on arrive à [23] :

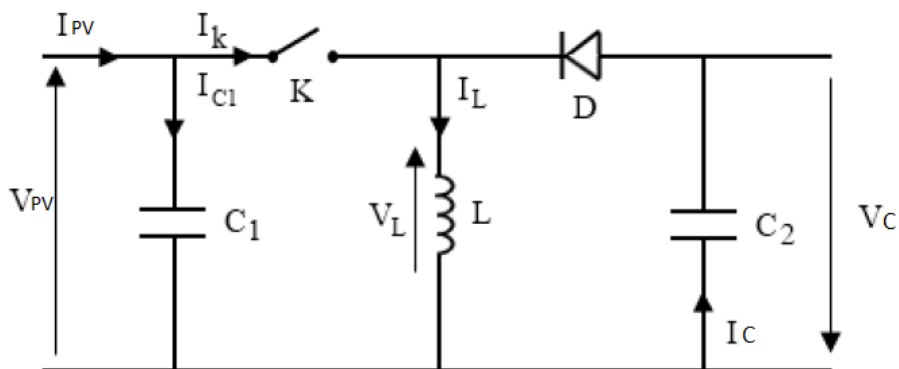
$$V_c(1 - \alpha) = V_{pv} \quad \text{[II.11]}$$



Figure(II.15) : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost

II.4.2.3 Hacheur Buck-Boost

Le hacheur buck-boost est un convertisseur indirect DC-DC à stockage inductif. La source d'entrée est de type tension continue (filtrage capacitif en parallèle avec une source de tension) et la charge de sortie continue de type source de tension (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K figure(II.16) 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). [22]



Figure(II.16) : Schéma électrique d'un hacheur buck- boost

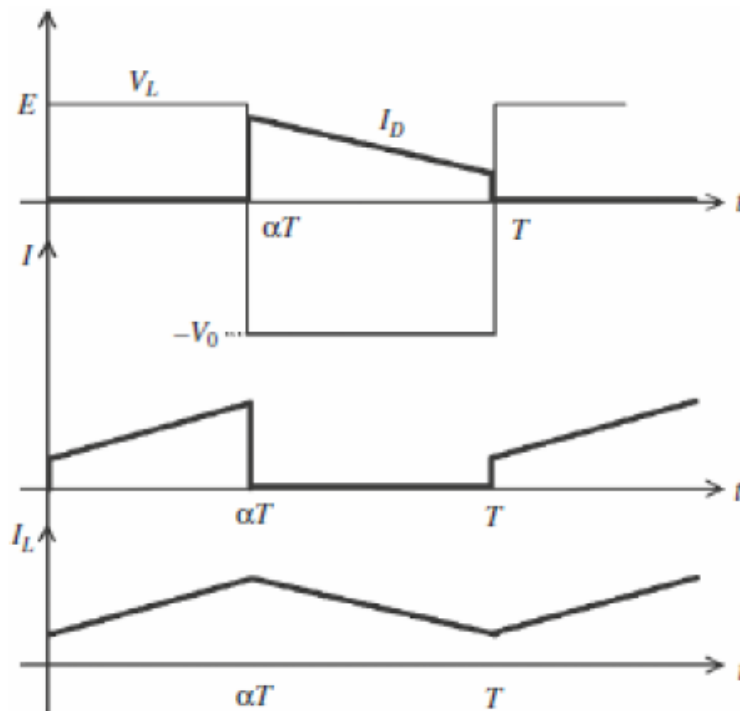
Fonctionnement :

Cette structure de convertisseur permet d'obtenir des tensions négatives à partir de tension positive. Le schéma de principe est présenté figure(II.17) Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT , le courant augmente linéairement. La tension est égale à V_{pv} .

À l'ouverture de K, la diode prend le relais et la tension V_l est égale à V_c . Par définition la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle, Il en résulte que [23] :

$$V_{pv} \cdot \alpha \cdot T = V_c \cdot (1 - \alpha) T \quad [\text{II. 12}]$$

Quand le rapport cyclique $\alpha > 0.5$ le hacheur buck-boost fonction comme un hacheur boost et si le rapport cyclique $\alpha < 0.5$ le hacheur buck-boost fonction comme un hacheur buck.



Figure(II.17) : Chronogrammes de courant et de tension d'un hacheur buck-boost

II.5 Choix du convertisseur DC-DC

Le générateur PV fournit une tension faible que nous devons adapter à la tension nominale de la charge, ce qui sera réalisé par l'hacheur élévateur. Ceci est la condition sur le choix du convertisseur. En plus, il est essentiel que le rendement soit maintenu élevé pour éviter la dissipation de la puissance et pour éviter les échauffements excessifs dans les composants électroniques. Pour cette raison toute la conversion de puissance échangée doit être réalisée autour des composants de stockage d'énergie (inductance et condensateurs) et les commutateurs. Les commutateurs de puissance utilisés dépendent du niveau de la puissance à convertir ou à commander

Le convertisseur Boost est le plus adapté pour ce type de conversion, car il a une structure simple, et un gain en tension plus élevé que les autres pour un rapport cyclique donné. Pour cette raison nous allons utiliser dans notre système un hacheur élévateur(Boost).

II.6 Détermination des paramètres du hacheur Boost

Les calculs des paramètres du hacheur Boost se font à l'aide des formules ci-dessous :

- Le rapport cyclique (α) :

$$V_{pv} = V_c \frac{1}{1-\alpha} \rightarrow \alpha = 1 - \frac{V_{pv}}{V_c} \quad [\text{II.13}]$$

- Résistance (R) :

$$P_c = \frac{V_c^2}{R} \rightarrow R = \frac{V_c^2}{P_c} \quad [\text{II.14}]$$

- L'inductance (L) :

Sachant que le courant aux bornes de l'inductance est représenté par la figure suivante :

Nous aurons ainsi :

$$\Delta i_L = \frac{1}{2} (i_L(\alpha T_s) - i_L(0)) \quad [\text{II.15}]$$

Ainsi l'inductance (L) peut être calculée comme suit :

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} \rightarrow V_{pv} = L \frac{di_L}{dt} \quad [\text{II.16}]$$

En utilisant $V_L(t) = V_{pv}$ dans le premier sous-intervalle. Le courant i_L à la fin de la première période est donné par :

$$i_L(\alpha T_s) = i_L(0) + \frac{V_{pv}}{L} (\alpha T_s) \quad [\text{II.17}]$$

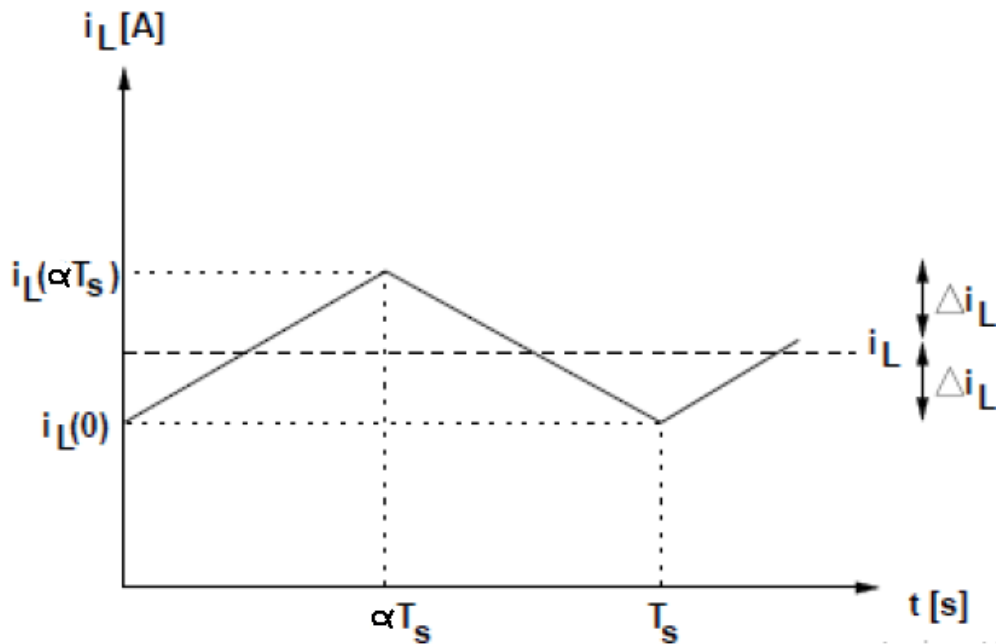


Figure (II.18) : Ondulation du courant de l'inductance

Si on remplace ce dernier dans la première équation on obtient :

$$\Delta i_L = \frac{1}{2} \frac{V_{pv}}{L} (\alpha T_s) \quad [\text{II.18}]$$

Et on en déduit la formule utilisée pour calculer la valeur de l'inductance L :

$$L = \frac{V_{pv}}{2\Delta i_L F_s} \alpha \quad [\text{II.19}]$$

Avec
$$F_s = \frac{1}{T_s}$$

- Capacité (C) :

Sachant que la tension aux bornes du condensateur est représentée par la figure suivante :

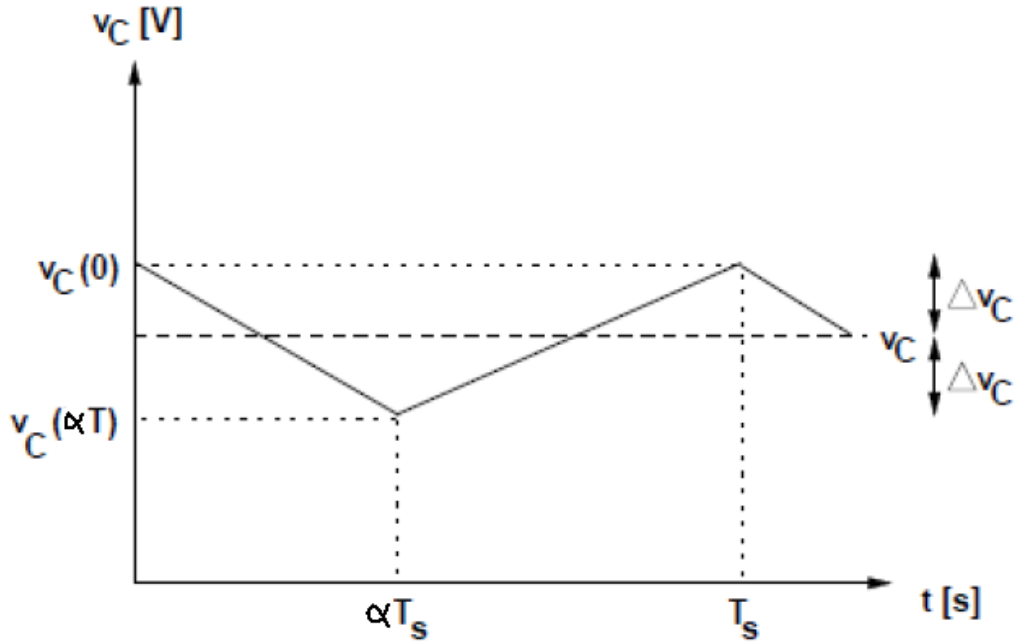
Nous aurons ainsi :

$$i_c = C \frac{dV_c}{dt} \quad [\text{II.20}]$$

$$\int_{-\Delta V_c}^{\Delta V_c} V_c = \frac{1}{c} \int_0^{\alpha T_s} i_c dt$$

$$-2\Delta V_c = -\frac{1}{c} \frac{V_s}{R} \alpha T_s$$

$$C = \frac{V_c}{2\Delta V_c R F_s} \alpha \quad [\text{II.21}]$$



Figure(II.19) : Ondulation sur la tension de condensateur

Application numérique :

Pour une tension d'entrée ($V_e = V_{pv} = 34$ v) et une tension de sortie ($V_s = V_c = 400$ v), et à partir des équations précédentes on obtient :

$$\text{D'après l'équation [II.13]} : \alpha = 1 - \frac{34}{400} = 0.915$$

$$\text{D'après l'équation [II.14]} : R = \frac{400^2}{100} = 1600 \Omega$$

$$i_L = \frac{400}{1600} * \frac{1}{1-0.915} = 2.94 \text{ A}$$

$$\Delta i_L = 0.1 * i_L = 0.294 \text{ A}$$

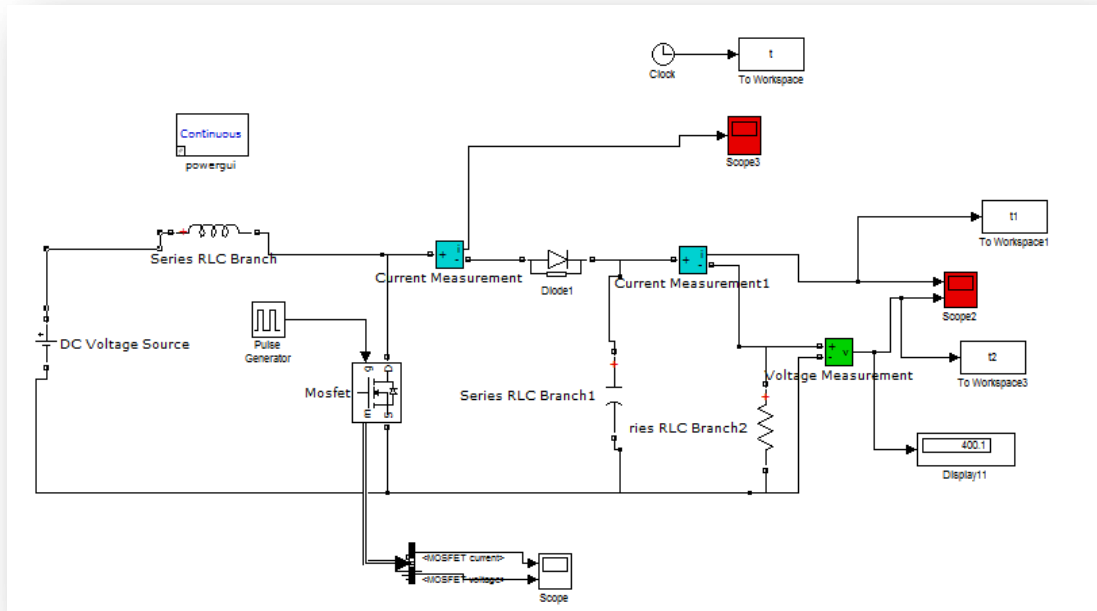
$$\text{D'après l'équation [II.19]} : L = \frac{34}{2 * 0.294 * 16 * 10^3} * 0.915 = 3.31 \text{ mH}$$

$$\Delta V_c = 1 \% * 400 = 4 \text{ v}$$

$$\text{D'après l'équation [II.21]} : C = \frac{400}{2 * 4 * 1600 * 16 * 10^3} * 0.915 = 1.79 \mu\text{F}$$

II.7 Simulation de convertisseur boost

Pour simuler le fonctionnement de l'hacheur élévateur, nous avons utilisé Matlab/simpower system pour nous rapprocher du fonctionnement réel, ce qui est présenté par la figure (II.20).



Figure(II.20) : Schéma de simulation du hacheur boost

Les résultats de simulation de l'hacheur élévateur (boost) sont présentés sur les figures (II.21) et (II.22). Ces figures représentent la tension et le courant de sortie de l'hacheur. Ces résultats montrent que la tension de sortie d'hacheur élévateur (boost) est supérieure à celle d'entrée. Donc l'hacheur élévateur (boost) effectue correctement son rôle. Le courant et la tension de sortie subie un régime transitoire oscillant puis se stabilise en régime permanent.

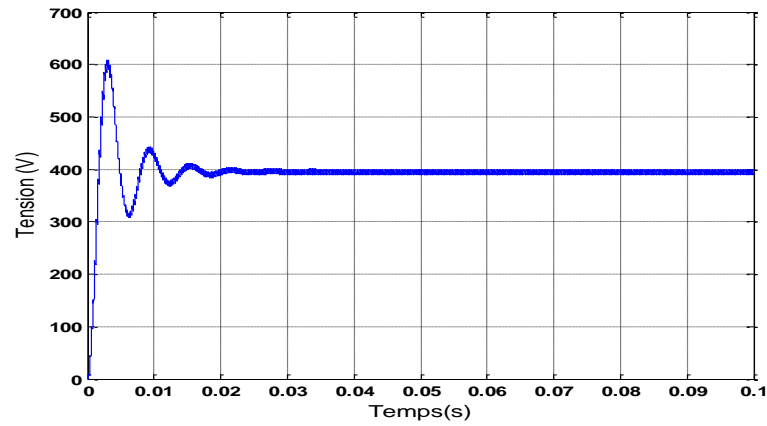


Figure (II.21) : Tension de sortie du hacheur boost

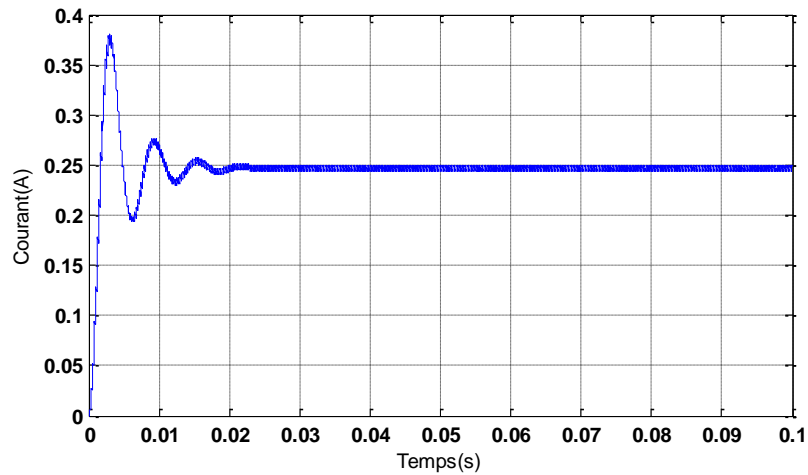
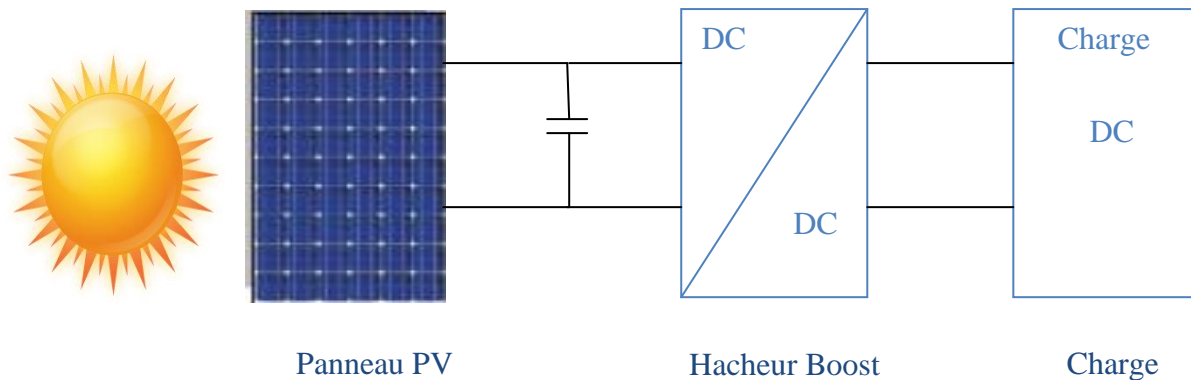


Figure (II.22) : Courant de sortie du hacheur boost

II.9 Simulation du système (panneau+hacheur)

Nous allons simuler le fonctionnement du système photovoltaïque constitué d'un panneau PV relié à un hacheur alimentant une charge résistive. Qui est présenté sur la figure suivante :



Figure(II.23) : Schéma de structure du système PV

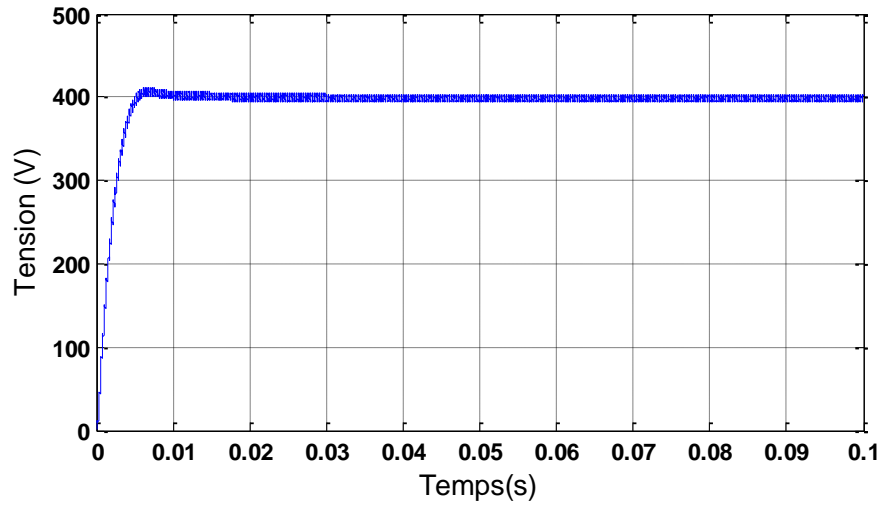
Nous avons simulé le fonctionnement du système avec éclairement et température fixe puis nous simulé le cas avec une variation de température. Les résultats de simulation présentent l'évolution du courant, tension et puissance au niveau de la charge.

Cas température fixe :

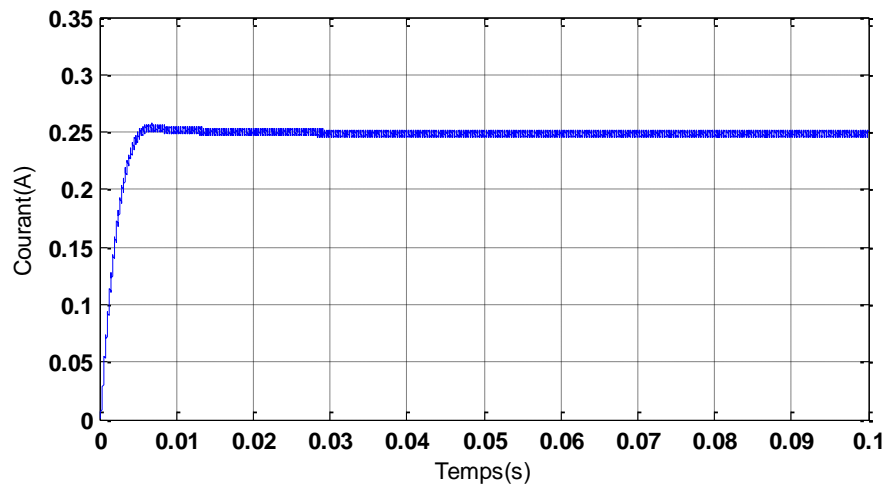
La figure(II.24) montre un établissement de la tension faiblement oscillant qui devient constant au régime permanent.

La figure(II.25) montre l'établissement du courant faiblement oscillant qui devient constant au régime permanent.

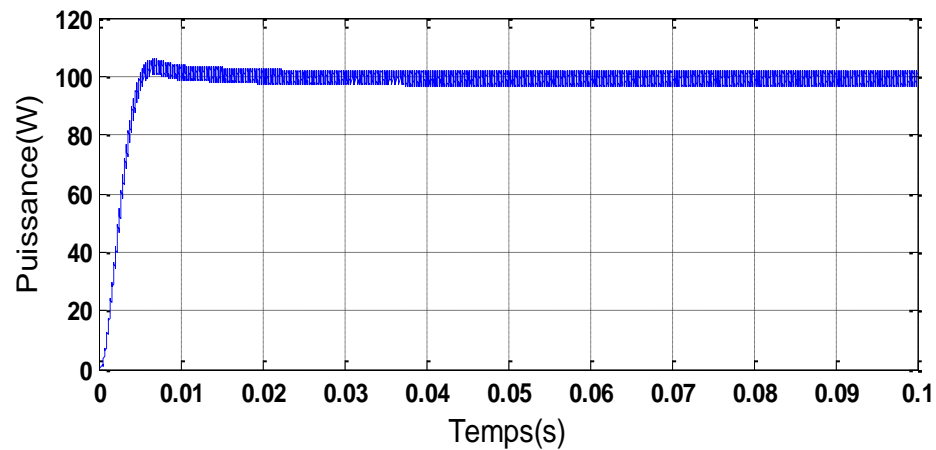
La figure(II.26) montre l'évolution de la puissance consommée par la charge. On note qu'elle est légèrement inférieure à celle générée par le panneau PV, aussi elle présente de faible oscillation et elle est constante au régime permanent.



Figure(II.24) : Tension de sortie du système (panneau+hacheur)



Figure(II.25) : Courant de sortie du système (panneau+hacheur)

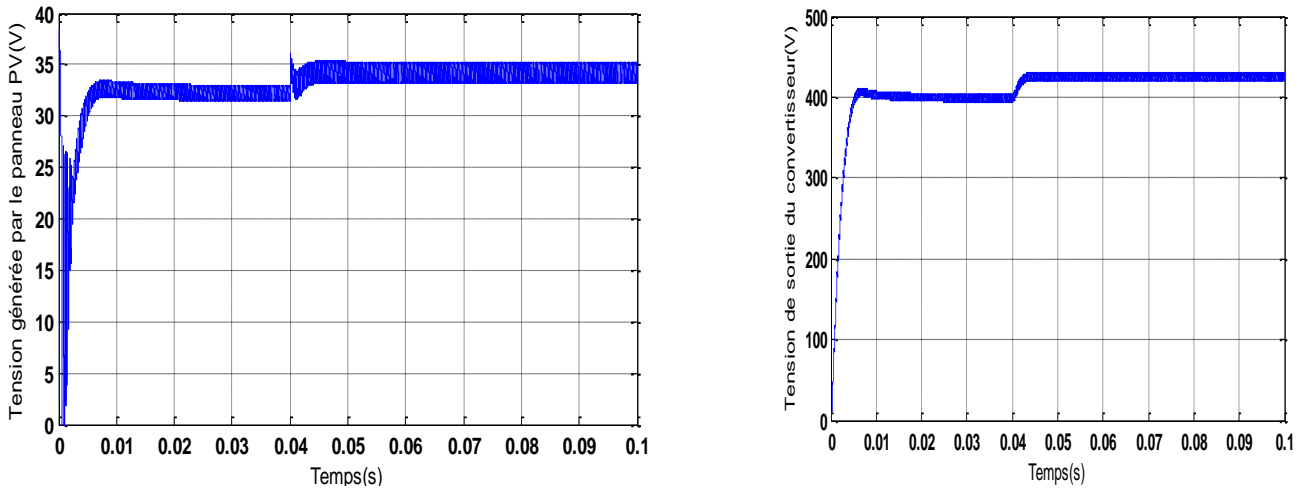


Figure(II.26) : Puissance de sortie (panneau+hacheur)

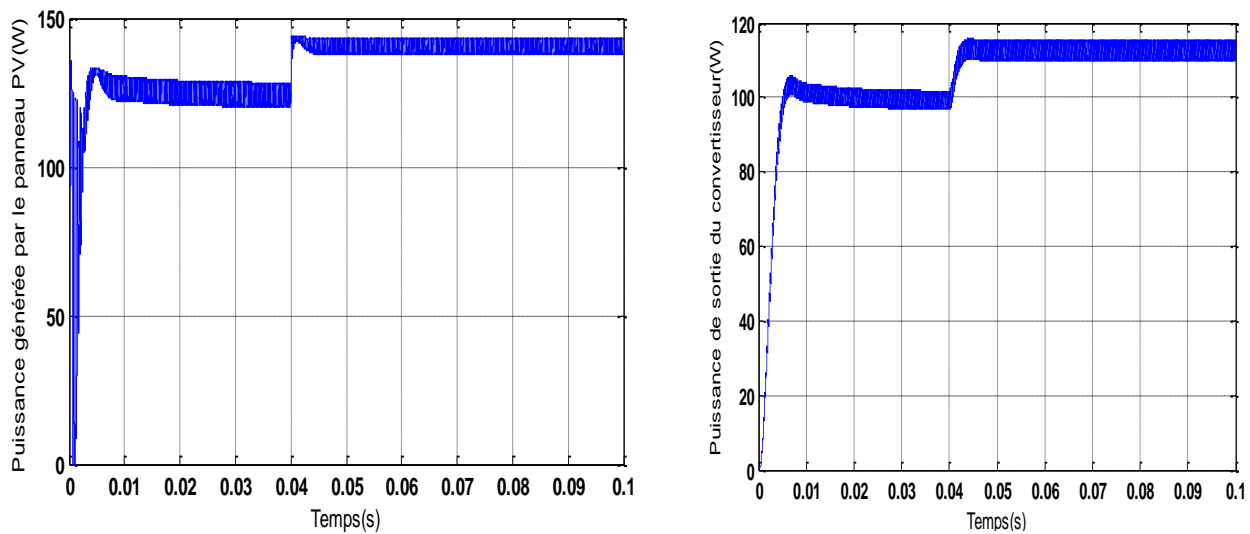
Cas de variation de la température

La figure (II .27) présente l'évolution de la tension générée par le panneau PV et celle de la charge. On note que la tension augmente avec la diminution de la température (25°C jusqu'à 5°C).

La figure (II.28) présente l'évolution de la puissance par le panneau PV et celle de la charge. On note que la puissance augmente avec la diminution de la température (25°C jusqu'à 5°C).



Figure(II.27) : Tension du panneau PV et la tension de sortie du convertisseur avec une variation de température de 25°C jusqu'à 5°C



Figure(II.28) : Puissance du panneau PV et la Puissance de sortie du convertisseur avec une variation de température de 25°C jusqu'à 5°C

II.10 Conclusion

La première partie de ce chapitre a été consacrée à la modélisation de la cellule photovoltaïque. Après les avoir modélisés, nous avons comparé le modèle de notre simulation sous Matlab Simulink avec le modèle PB Solar 2150S donné par le constructeur. De cette comparaison, il ressort que les deux courbes de la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ sont identiques à ceux du constructeur. Ensuite nous avons étudié les effets des différents changements climatiques (éclairage et température) sur les caractéristiques de la cellule photovoltaïque.

Dans la deuxième partie nous avons présenté quelques types de convertisseurs DC-DC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Pour adapter la source PV à la charge caractérisée par une tension continue nominale nous avons utilisé l'hacheur élévateur (dit Boost).

CHAPITRE III :
COMMANDE MPPT DE
SYSTEME
PHOTOVOLTAÏQUE

III.1 Introduction :

La théorie relative à la maximisation de la puissance produite d'un panneau solaire grâce aux grandeurs physiques agissant sur la caractéristique électrique courant tension ($I-V$), nous permet de créer une technique d'utilisation plus performante, et plus efficace pour extraire un point de puissance maximale d'une manière permanente sans perte dans l'énergie transférée du panneau photovoltaïque vers la charge. Pour obtenir ce résultat on utilise un système d'adaptation basé sur la commande MPPT. Plusieurs techniques nous permettent d'atteindre cet objectif, parmi eux la technique P&O. ce chapitre sera consacré à la définition de cette technique et son application à notre système photovoltaïque.

III.2 Suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque

III.2.1 Introduction

La poursuite du point maximum de la puissance (MPPT) est une partie essentielle dans les systèmes photovoltaïques. Plusieurs techniques sont développées depuis 1968 date de publication de la première loi de commande de ce type adaptées à une source d'énergie renouvelable de type PV. Ces techniques se différencient entre elles par leur complexité, nombre de capteurs requis, la vitesse de convergence, coût, rendement et domaine d'application. [12]

III. 2.2 Principe du MPPT

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quels que soient les conditions météorologiques (température et l'éclairement), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (V_{mpp} , I_{mpp}). [12]

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

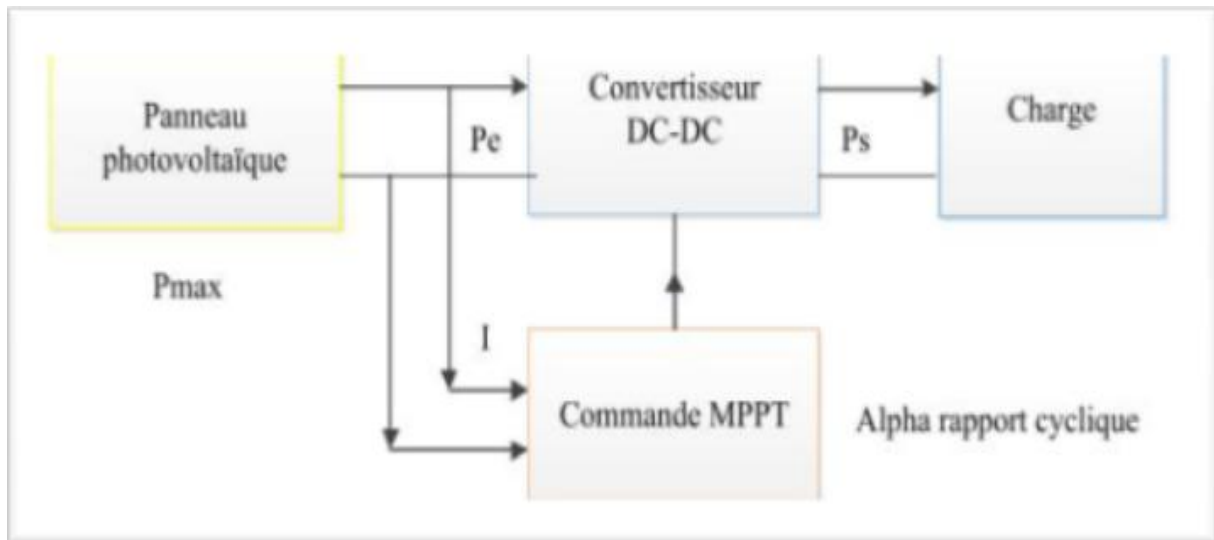


Figure (III.1) : Système photovoltaïque avec une commande MPPT

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

La figure (III.2) illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM_1 vers un nouveau point P_1 de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum.

Pour une variation d'ensoleillement (cas a), il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM_2 .

Pour une variation de charge (cas b), on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande.

Dans une moindre mesure, un dernier cas de variation de point de fonctionnement peut se produire lié aux variations de température de fonctionnement du GPV (cas c). Bien qu'il faut également agir au niveau de la commande, cette dernière n'a pas les mêmes contraintes temporelles que les deux cas précédents.

En résumé, le suivi du PPM est réalisé au moyen d'une commande spécifique nommée MPPT qui agit essentiellement sur le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) pour rechercher et atteindre le PPM du GPV. [24]

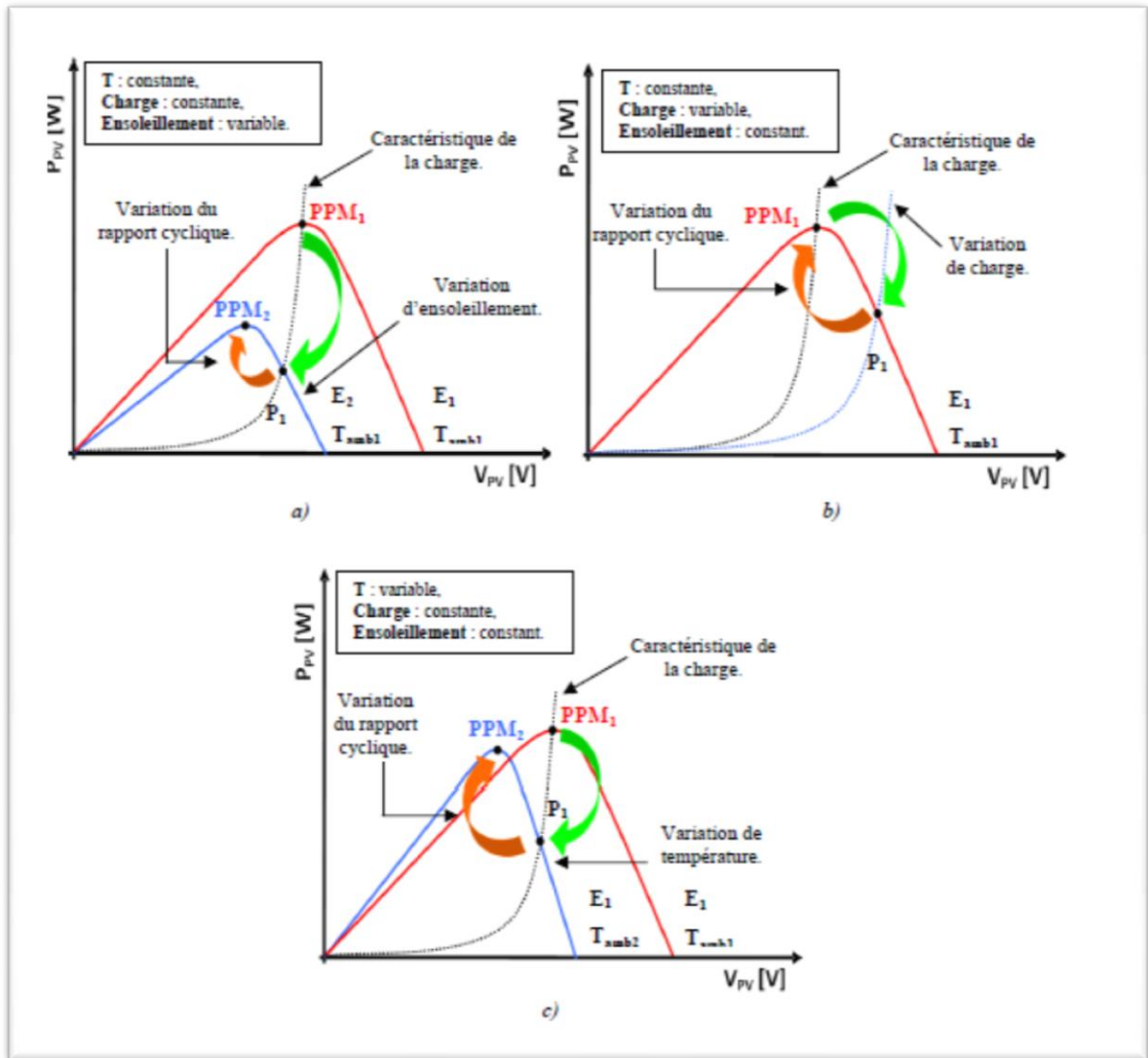


Figure (III.2) : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale a) suite à une variation d'éclairement, b) suite à une variation de charge, c) suite à une variation de température

III.3 Algorithmes de commande MPPT

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 (INC).

Dans notre travail on se limite à la méthode de perturbation et observation (P&O) qui est très simple à implanter et de bon rendement. Pour une meilleure compréhension de cette commande, nous rappelons brièvement son principe dans le paragraphe suivant.

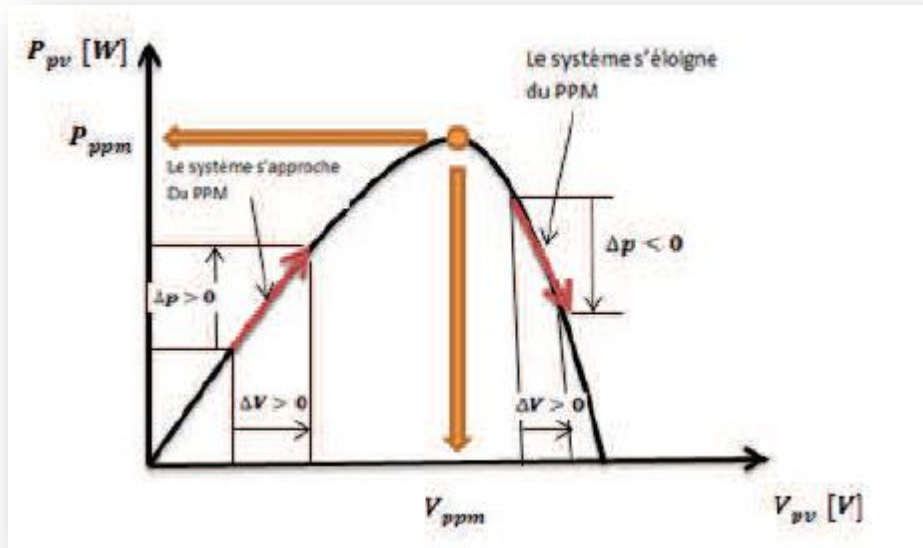
III.3.1 Principe de la commande "Perturbation et Observation" (P&O)

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Comme son nom l'indique, cette méthode fonctionne en observant la variation de la puissance à la sortie du panneau photovoltaïque. Sur la figure(III.3) on voit que si la tension de fonctionnement varie dans une direction donnée ce qui implique que la puissance augmente ($\Delta P > 0$), la variation doit alors se déplacer vers le point de fonctionnement (PPM). L'algorithme P&O continuera à observer la variation de la tension dans la même direction.

Par contre, si la puissance diminue ($\Delta P < 0$), alors la variation est éloignée du point de fonctionnement du PPM. L'algorithme inversera alors la direction de la variation suivante.

Cet algorithme est résumé sur la figure (III.3) et l'organigramme descriptif est donné par la figure(III.4). Le processus est répété périodiquement jusqu'à ce que le PPM soit atteint. Le système oscille alors autour du PPM, ce qui provoque des pertes de puissance.

L'oscillation peut être minimisée en diminuant la taille de la variation. Cependant, une taille de variation trop petite ralentit considérablement la poursuite du PPM. Il existe alors un compromis entre précision et rapidité. [25]



Figure(III.3): Signe de ΔP et ΔV à différentes positions de la courbe caractéristique de puissance

L'algorithme qui décrit le fonctionnement de la méthode P&O est illustre dans la figure (III.4) suivante :

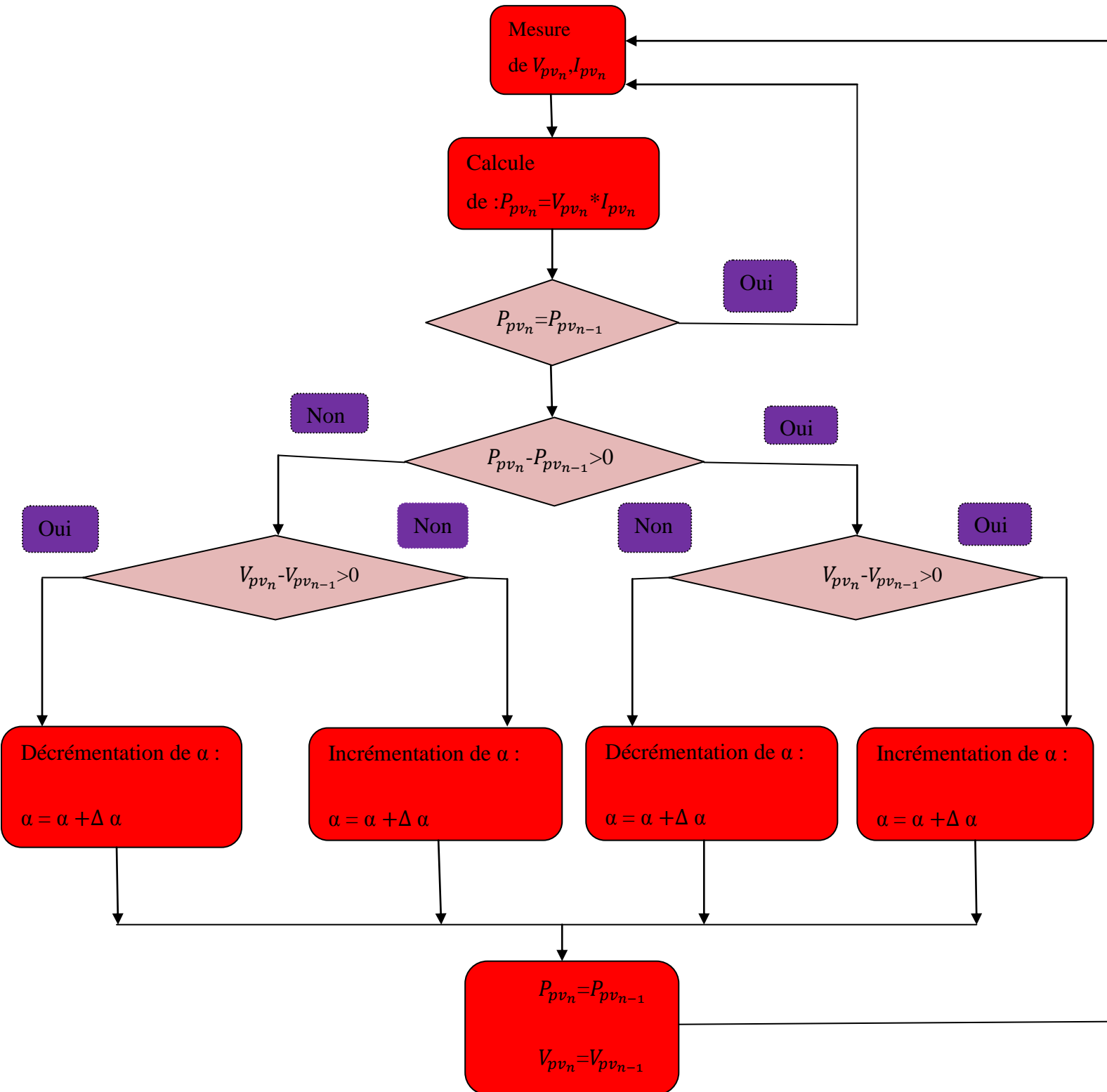


Figure (III .4) : Organigramme de la méthode P&O

III.3.2 Programme de simulation de l'algorithme perturbation et observation P&O

La figure III.5 présente le schéma Matlab/Simulink assurant la commande MPPT du type P&O.

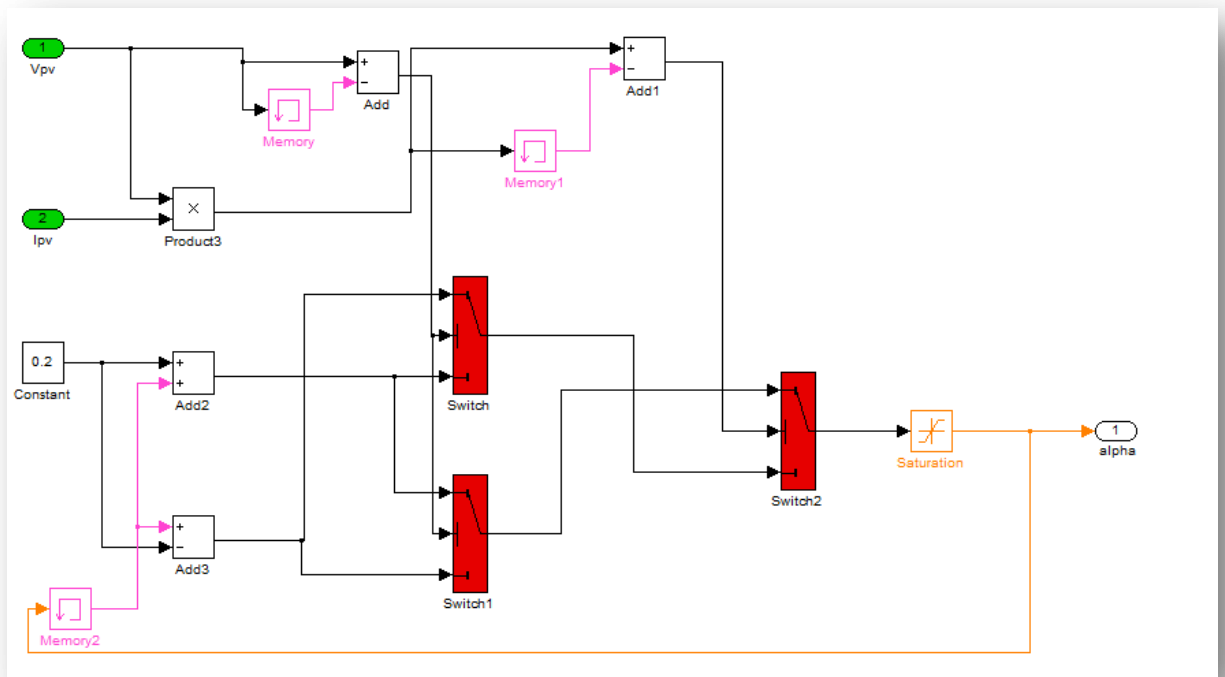


Figure (III.5) : Schéma block de la commande MPPT (P&O)

III.4 Simulation du système global

Pour une évaluation des performances du système photovoltaïque menu de la commande MPPT du type P&O, nous allons simuler le fonctionnement de l'ensemble (panneau-hacheur-charge et MPPT) avec une variation de la température du milieu, pour un éclairement constant.

La charge utilisée sur le côté (DC) est une résistance idéal ($R=1600\Omega$)

La figure (III.6) illustre le bloc schématique de SIMULINK du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT « perturbation et observation »:

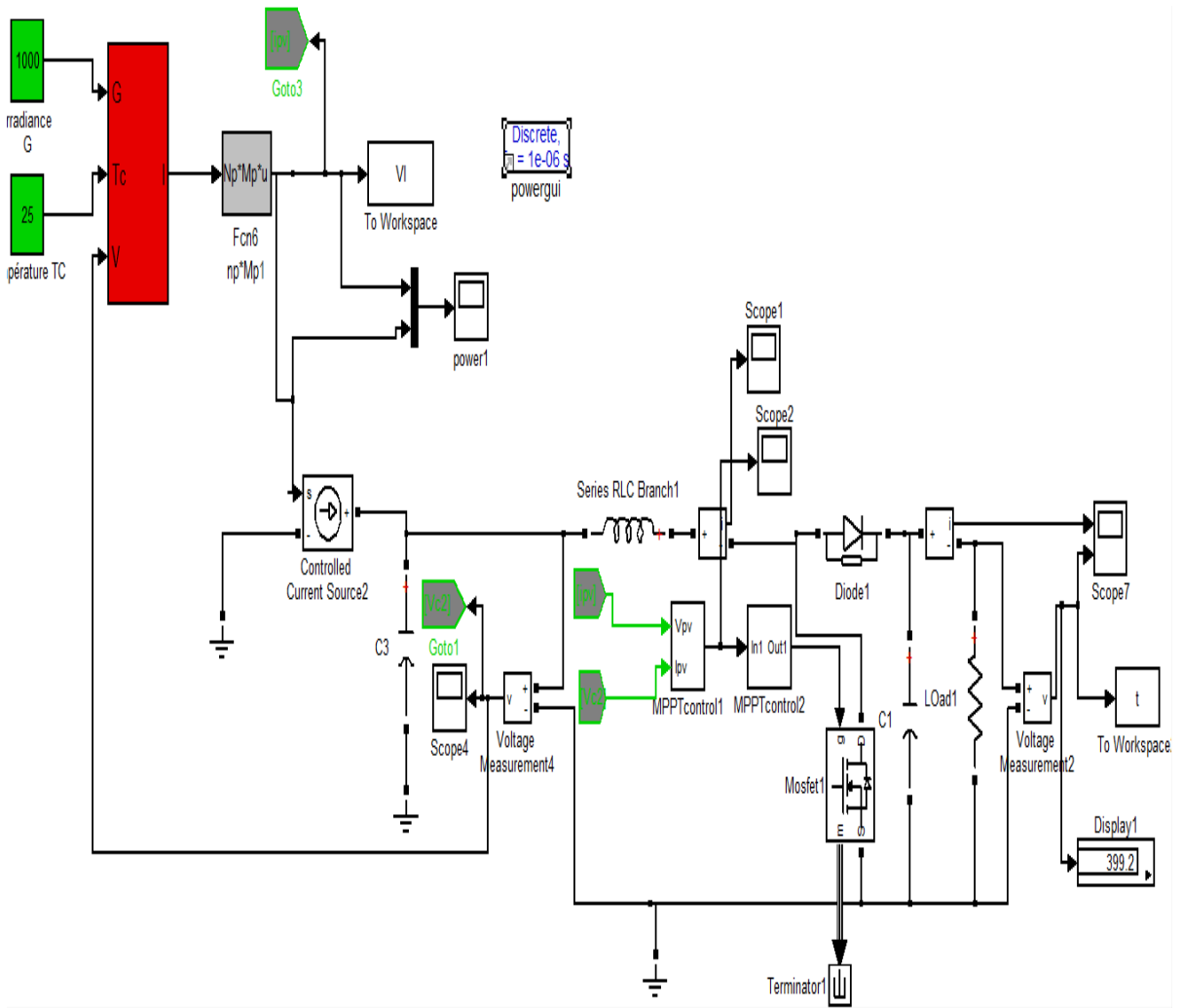
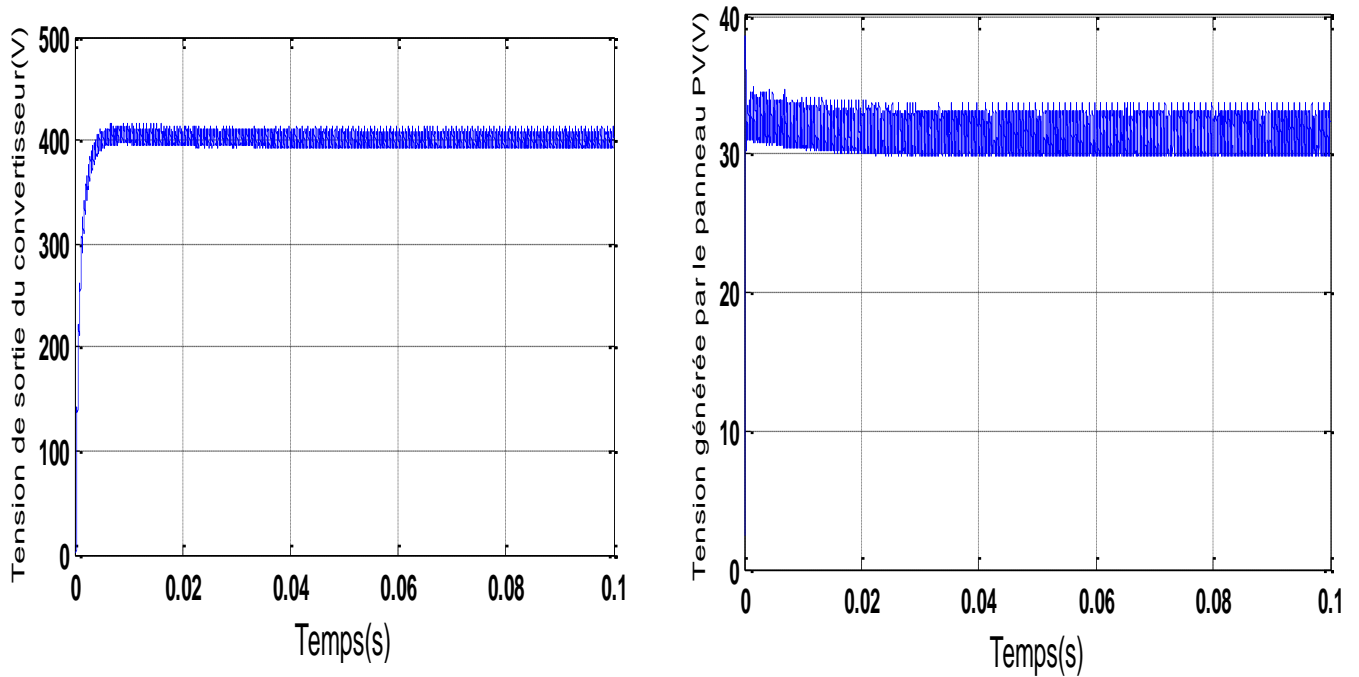


Figure (III.6) : Modèle SIMPOWER du panneau PV +hacheur avec une commande MPPT (P&O)

Les résultats de simulation du fonctionnement du système photovoltaïque menu de la commande MPPT « perturbation et observation » sont représenté par les figures suivantes

Ces résultats montrent que l’hacheur élévateur et la commande MPPT « perturbation et observation » effectuent correctement leurs rôles à travers l’évolution des grandeurs tensions et puissance.

L’hacheur élévateur fournit une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le panneau photovoltaïque. Et la commande MPPT adapte le panneau PV à la charge donc le transfert de la puissance maximale fournie par le panneau PV.



Figure(III.7) : tension de sortie du convertisseur et la tension du panneau PV

Figure(III.7) présente l'évolution de la tension sortie du convertisseur et la tension générée par le panneau PV pour un éclairement et température fixe. On note la présence d'oscillations au niveau de la tension source et la tension de la charge.

La figure(III.8) représente la puissance de sortie du convertisseur et la puissance générée par le panneau PV. On note une légère diminution de l'amplitude de la puissance entre la source et la charge et présence d'oscillation due à la source.

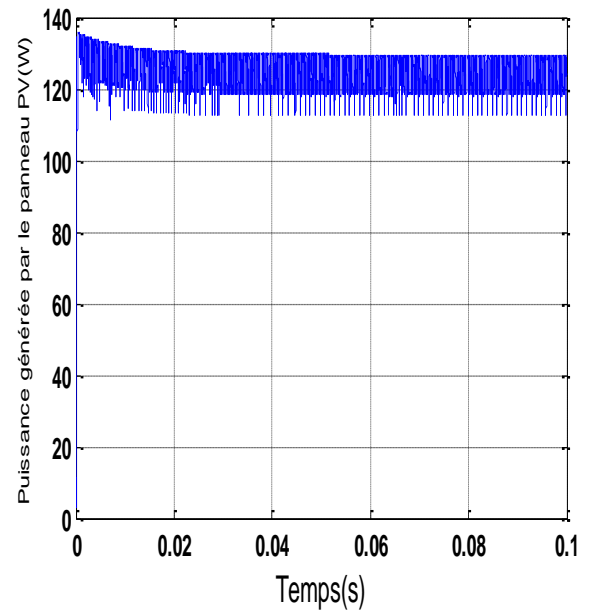
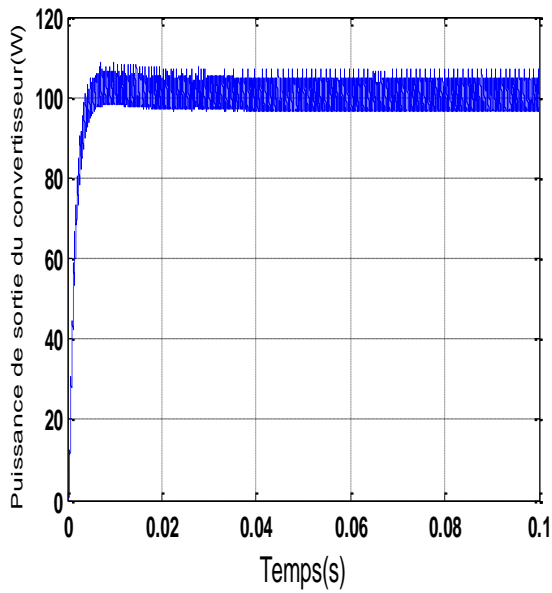
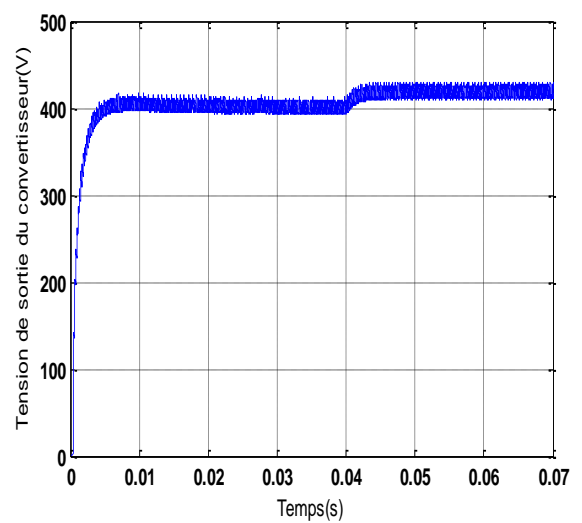
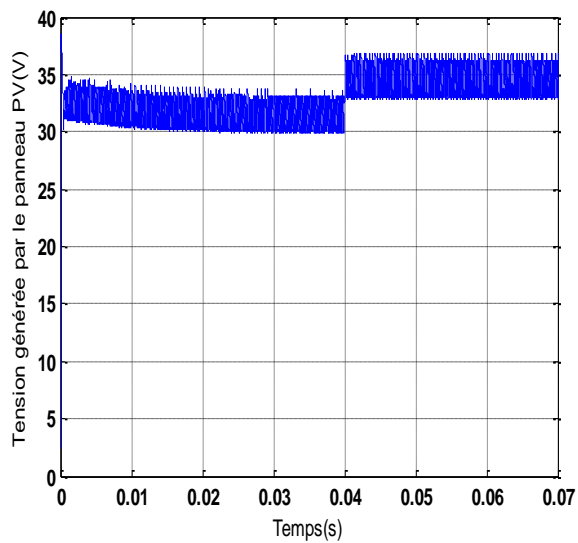
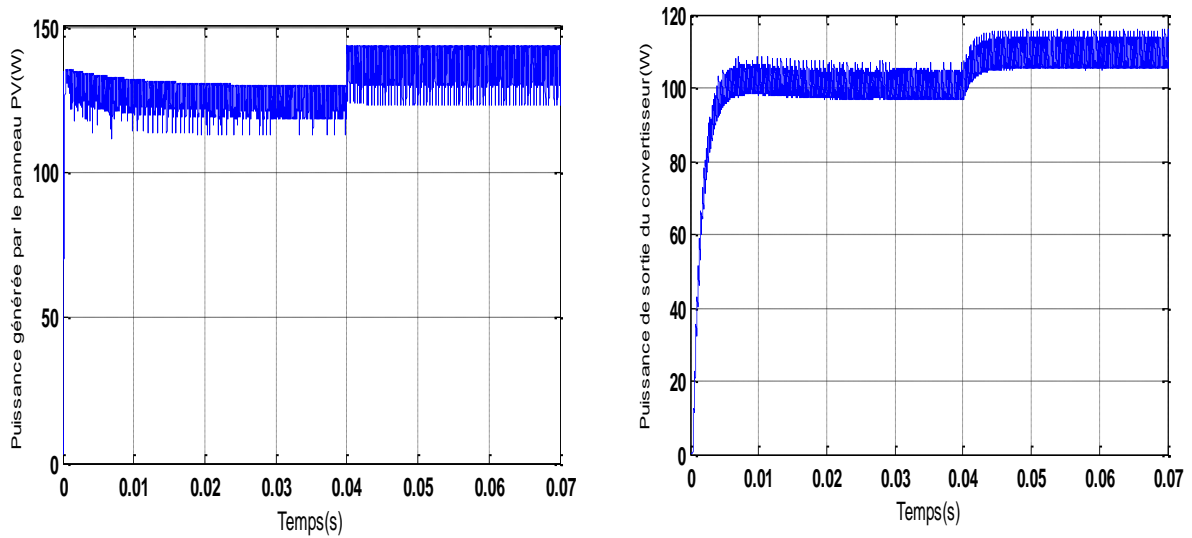


Figure (III.8):Puissance de sortie du convertisseur et la puissance du panneau PV



Figure(III.9) : Tension du panneau PV et la tension de sortie du convertisseur avec une variation de température de 25°C jusqu'à 5°C



Figure(III.10) : Puissance du panneau PV et la puissance de sortie du convertisseur avec une variation de température de 25°C jusqu'à 5°C

Nous procédons à un essai du système PV, panneau avec hacheur menu de la commande MPPT, pour une variation de la température à l'instant 0.04s. Après un régime transitoire, la commande MPPT fait osciller le point de fonctionnement autour du point du PPM. La commande MPPT adapte la puissance générée par le panneau PV à la charge, ce qui assure un transfert d'énergie à puissance maximale.

On remarque bien l'influence de la température sur les caractéristiques plus la température diminue plus la tension délivrée augmente cela implique que même la puissance délivrée augmente avec la diminution de température.

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié la commande MPPT, son principe, quelque méthode de mise en œuvre en particulier nous avons développé la méthode dite perturbé et observe cette commande MPPT numérique utilise directement la tension et le courant du panneau photovoltaïque pour chercher le point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale. Puis nous avons fait une application de la commande MPPT choisie sur le système

CHAPITRE III : COMMANDE MPPT DE SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE

PV associant panneau PV – hacheur – charge pour une variation de la température. Les résultats de simulation montre un fonctionnement satisfaisant malgré les faibles oscillations sur la tension et la puissance générée et au niveau de la charge.

CONCLUSION GENERALE

Le travail qu'on a présenté porte sur l'étude par simulation du fonctionnement d'un système photovoltaïque (PV) muni d'une commande MPPT assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le panneau photovoltaïque. Dans un premier temps, on a donné des généralités sur les systèmes PV, notions sur l'énergie et rayonnements solaire et ses caractéristiques ainsi l'effet PV, cellule PV et principe de fonctionnement.

On a étudié, ensuite dans le deuxième chapitre la modélisation de la cellule photovoltaïque, nous avons comparé le modèle de notre simulation sous Matlab Simulink avec le modèle PB Solar 2150S donné par le constructeur. De cette comparaison, il ressort que les deux courbes de la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ sont identiques. En suite nous avons étudié les effets des différents changements climatiques (éclairage et température) sur les caractéristiques de la cellule photovoltaïque. Ainsi quelques types de convertisseurs DC-DC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Pour adapter la source PV à la charge caractérisé par une tension continue nominale nous avons utilisé l'hacheur élévateur (dit Boost).

Finalement, dans le troisième chapitre, nous avons étudié la commande MPPT, son principe, quelque méthode de mise en œuvre en particulier nous avons développé la méthode dite perturbé et observe, cette commande MPPT numérique utilise directement la tension et le courant du panneau photovoltaïque pour chercher le point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale. Puis nous avons fait une application de la commande MPPT choisie sur le système PV associant panneau PV – hacheur – charge pour une variation de la température. Les résultats de simulation montre un fonctionnement satisfaisant malgré les faibles oscillations sur la tension et la puissance générée et au niveau de la charge.

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

- Les performances du panneau PV se dégradent avec l'augmentation de la température et la diminution de l'intensité d'éclairage. Les performances du générateur PV sont évaluées à partir des conditions standards (CST) : éclairage 1000W/m^2 , température 25°C

- Le convertisseur DC-DC et la commande MPPT effectuent correctement leurs rôles. Le convertisseur fournit dans les conditions optimales une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le panneau PV. La commande MPPT adapte le panneau PV à la charge, donc un transfert de la puissance maximale.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [1] : **R. Jimmy et al.** Le pompage photovoltaïque, Édition Multi mondes, 1999.
- [2] : **B. Flèche & D. Delagnes**, Energie solaire photovoltaïque, juin 2007.
- [3] : **A. Fortin**, Analyse numérique pour ingénieurs, 2^{ème} édition, Presses internationales polytechnique, 1996.
- [4] **N.Benhaddouche** .La commande d'un système photovoltaïque d'un satellite .Mémoire de Master, Université Abou-Baker Bel kaïd-Tlemcen, 2014.
- [5] **S.Belakehal**, "Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables", thèse de Doctorat, université de Constantine, 2010
- [6] **R.P. Mukund**, « Wind and solar Power Systems », Ph.D, P.e U.S merchant Marine Academy,Kings Point, New York, CRC Press LLC 1999.
- [7] **F.Hananou et AI.Rouabah**. Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque .Mémoire de Master Académique, Université KASDI MERBAH OUARGLA, 2014.
- [8] **M.N.Mechalikh et CH.E.Hamada**. Modélisation et simulation d'un système Photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau. Mémoire de Master Académique, Université KASDI MERBAH OUARGLA, 2013.
- [9] **KH. Ayache**. Modélisation et simulation d'un générateur photovoltaïque couplé à un réseau électrique. Mémoire de Magister, Université Mohamed Chérif Messaâdia de Souk-Ahras, 2014.
- [10] **M. Lakhdar Louazen**. Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site d'Ouargla. Mémoire de Magister, Université EL HADJ LAKHDAR – BATNA, 2008
- [11] **S.Djeriou**. Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone. Mémoire de Magister, Université FERHAT ABBAS DE SETIF, 2011.
- [12] **M.S.Fateh**. Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique. Mémoire de Magister, Université FERHAT ABBAS DE SETIF, 2011.

- [13] **S.Petibon**. Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques, Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, Janvier 2009.
- [14] **Antonio Luque and Steven Hegedus** Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, John Wiley & Sons Ltd, 2003.
- [15] **M. Adouane**, «Etude et conception d'une stratégie de commande d'un onduleur connecté au réseau électrique», Mémoire de magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2008.
- [16] **W.Bensaci**. Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT, Mémoire de Master, Université KASDI MERBAH OUARGLA, 2012.
- [17] **M. Belhadj**, "Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome", Mémoire de Magister, université de Bechar, 2008.
- [18] **W.Xiao**. A Modified Adaptive Hill Climbing Maximum Power Point Tracking (MPPT) Control Method for Photovoltaic Power Systems, the University of British Columbia, 2003.
- [19] **M.Chaabene**. Cour Gestion énergétique des panneaux photovoltaïque, UNIVERSITE DE SFAX, 2008.
- [20] **Abouchabana Nabil**, "Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT". Mémoire de Magister, Université de Laghouat, 2009
- [21] **Philippe Barrade**. L'électronique de puissance méthodologie et convertisseurs élémentaires. Press polytechnique et universitaires, 1ère édition, 2006.
- [22] **Lequeu Thierry**, "Cours d'électronique de puissance", IUT GEII 2ième année, Option EEP, 2005.
- [23] **Bogdan Grabowski, Christian Ripoll**, " Aide-mémoire Électronique", Dunod, 5^e édition, 2008.
- [24] **Cédric Cabal**. Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque. Thèse de doctorat, Université de TOULOUSE. 15 /12/2008
- [25] Trishan Esum, Student Member, IEEE, and Patrick L. Chapman, Senior member,IEEE.Compariason of Photovoltaic array maximum power point tracking techniques Techniques", IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, 2006.

ANNEXE

Le panneau PV PB Solar 2150 S



bp solar

BP 2150S

150-Watt Monocrystalline Photovoltaic Module

The BP 2150S PV module is part of BP Solar's new series of 72-cell modules designed specifically for large PV systems. With the strongest frame in the industry, time-tested monocrystalline silicon solar cells, integral bypass diodes, and installation-speeding polarized connectors, it provides cost-effective power for DC loads or, with an inverter, AC loads. Its 72-cell series string charges 24V batteries (or multiples of 24V) efficiently in virtually any climate. With 150 watts of nominal maximum power, the BP 2150S is primarily used in utility grid-supplemental systems, telecommunication systems, pumping and irrigation, cathodic protection, remote villages and homes, and land-based navigation aids.

Proven Materials and Construction

BP Solar's quarter-century of field experience shows, in every aspect of this module's construction and materials:

- 72 monocrystalline silicon solar cells in series;
- cells are laminated between sheets of ethylene vinyl acetate (EVA) and high-transmissivity, low-iron 3mm tempered glass;
- Weatherproof DC-rated plug-and-socket connectors provide reliable, low-resistance connections and eliminate wiring errors;
- Asymmetrical cables enable side-by-side or end-to-end module placement in arrays;
- Frame strength exceeds requirements of certifying agencies.



Clear Anodized Universal Frame

Limited Warranties

- Power output for 25 years;
- Freedom from defects in materials and workmanship for 2 years.

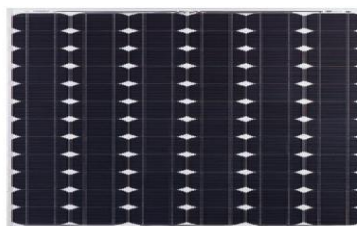
See Our Website or your local representative for full terms of these warranties.



Weatherproof Connectors

Quality and Safety

- Manufactured in ISO 9001-certified factories;
- Conforms to Directives 89/336/EEC, 73/23/EEC and 93/68/EEC of the European Community;
- Listed by Underwriter's Laboratories for electrical and fire safety (Class C fire rating);
- Certified by TÜV Rheinland as Class II equipment;
- Complies with the requirements of IEC 61215, including:
 - repetitive cycling between 40°C and 85°C at 85% relative humidity;
 - simulated impact of 20mm (one-inch) hail at terminal velocity;
 - 2200 VDC frame/cell string isolation test, front and back, at 2400 pascals (50 psf) from loading (e.g., snow) of 5400 pascals (115 psf).



BP 2150S



©2002 BP Solar Global Marketing

01-3001-2A 5/02

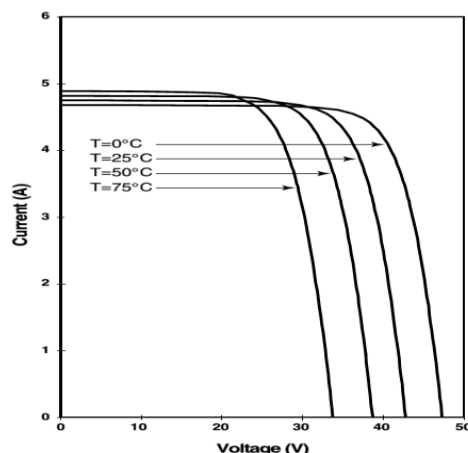
Electrical Characteristics¹

	BP 2150S	BP 2140S ⁴
Maximum power (P_{max}) ²	150W	140W
Voltage at P_{max} (V_{mp})	34.0V	34.0V
Current at P_{max} (I_{mp})	4.45A	4.16A
Minimum P_{max}	140W	130W
Short-circuit current (I_{sc})	4.75A	4.48A
Open-circuit voltage (V_{oc})	42.8V	42.8V
Temperature coefficient of I_{sc}	(0.065±0.015)%/°C	
Temperature coefficient of voltage	-(160±20)mV/°C	
Temperature coefficient of power	-(0.5±0.05)%/°C	
NOCT ³	47±2°C	
Maximum series fuse rating	15A	
Maximum system voltage	600V (U.S. NEC rating) 1000V (TÜV Rheinland rating)	

Notes

- These data represent the performance of typical BP 2140S and BP 2150S modules as measured at their output connectors. The data are based on measurements made in accordance with ASTM E1036 corrected to SRC (Standard Reporting Conditions, also known as STC or Standard Test Conditions), which are:
 - illumination of 1 kW/m² (1 sun) at spectral distribution of AM 1.5 (ASTM E892 global spectral irradiance);
 - cell temperature of 25°C.
- During the stabilization process which occurs during the first few months of deployment, module power may decrease approximately 3% from typical P_{max} .
- The cells in an illuminated module operate hotter than the ambient temperature. NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) is an indicator of this temperature differential, and is the cell temperature under Standard Operating Conditions: ambient temperature of 20°C, solar irradiation of 0.8 kW/m², and wind speed of 1m/s.
- The power of solar cells varies in the normal course of production; the BP 2140S is assembled using cells of slightly lower power than the BP 2150S.

BP 2150 I-V Curves



محاكاة تشغيل نظام الضوئية مع قائمة تحكم MPPT

ملخص

هذا العمل يتكون من الوصف ونمذجة نظام الضوئية ، وتتكون من مولد الضوئية المرتبطة مع مكبر للصوت المروحية متصلة الحمل. سمة هامة من الألواح الشمسية هي أن يتم توفير أقصى قدر من السلطة المتاحة نقطة التشغيل فقط في واحدة يحددها الجهد المعروفة وتيار، ودعا نقطة الطاقة القصوى. وبالإضافة إلى ذلك ليست ثابتة موقف هذه النقطة ولكن التحركات وفقا للإشعاع ودرجة حرارة الخلايا الشمسية وحشو المستخدمة لاستخراج الطاقة القصوى من الألواح الشمسية، لدينا لاستخدام هذه الآلية تتبع النقطة حتى أن الطاقة القصوى يتم إنشاء باستمرار ما يعرف باسم اسم الأمر "الحد الأقصى تتبع باور بوينت" لهذا الغرض استخدمنا تقنية تعرف يعطل ويلاحظ أن أعطى نتائج جيدة

كلمات البحث: النظام الكهروضوئي , المحول الرفع الية التحكم MPPT التصميم المحاكاة

Etude par simulation du fonctionnement d'un système photovoltaïque menu d'une commande MPPT

Résumé

Ce travail consiste en la description et la modélisation d'un système photovoltaïque, il est constitué d'un générateur (PV) associé à un hacheur élévateur relié à une charge. Une caractéristique importante des panneaux solaires est que la puissance maximale disponible est fournie seulement en un seul point de fonctionnement défini par une tension et un courant connus, appelé point de puissance maximale. En outre, la position de ce point n'est pas fixe mais elle se déplace en fonction de l'irradiation et de la température des cellules solaires ainsi que de la charge utilisée. Pour extraire le maximum de puissance des panneaux solaires, nous devons utiliser un mécanisme de poursuite de ce point afin que la puissance maximale soit générée en permanence ce qui est connu sous le nom de commande MPPT « The maximum power point tracking », pour cet objectif, nous avons utilisé la technique dite perturbe et observe qui a donné de bon résultat.

Mots clés : Photovoltaïque, Convertisseur boost, Commande MPPT, Modélisation, Simulation.

Simulating the operation of a photovoltaic system with a MPPT control menu

Abstract

This work consists of the description and modeling of a photovoltaic system, it consists of a generator (PV) associated with a chopper amplifier connected to a load. An important feature of the solar panels is that the maximum available power is provided only in one operating point defined by a known voltage and a current, called the maximum power point. In addition, the position of this point is not fixed but moves according to the irradiation and the temperature of the solar cells and the load used. To extract the maximum power from solar panels, we have to use tracking mechanism so that maximum power is continuously generated what is known as the command name MPPT "The maximum power point tracking " for this purpose we used the technique known perturb and observes that gave good results.

Keywords: Photovoltaic, boost converter, MPPT control, Modelling, Simulation.

محاكاة تشغيل نظام الضوئية مع قائمة تحكم MPPT

ملخص

هذا العمل يتكون من الوصف ونمذجة نظام الضوئية ، وتتكون من مولد الضوئية المرتبطة مع مكبر للصوت المروحية متصلة الحمل. سمة هامة من الألواح الشمسية هي أن يتم توفير أقصى قدر من السلطة المتاحة نقطة التشغيل فقط في واحدة يحددها الجهد المعروفة وتيار، ودعا نقطة الطاقة القصوى. وبالإضافة إلى ذلك ليست ثابتة موقف هذه النقطة ولكن التحركات وفقا للإشعاع ودرجة حرارة الخلايا الشمسية وحشو المستخدمة لاستخراج الطاقة القصوى من الألواح الشمسية، لدينا لاستخدام هذه الآلية تتبع النقطة حتى أن الطاقة القصوى يتم إنشاء باستمرار ما يعرف باسم اسم الأمر "الحد الأقصى تتبع باور بوينت" لهذا الغرض استخدمنا تقنية تعرف يعطل ويلاحظ أن أعطى نتائج جيدة

كلمات البحث: النظام الكهروضوئي , المحول الرفع الية التحكم MPPT التصميم المحاكاة

Etude par simulation du fonctionnement d'un système photovoltaïque menu d'une commande MPPT

Résumé

Ce travail consiste en la description et la modélisation d'un système photovoltaïque, il est constitué d'un générateur (PV) associé à un hacheur élévateur relié à une charge. Une caractéristique importante des panneaux solaires est que la puissance maximale disponible est fournie seulement en un seul point de fonctionnement défini par une tension et un courant connus, appelé point de puissance maximale. En outre, la position de ce point n'est pas fixe mais elle se déplace en fonction de l'irradiation et de la température des cellules solaires ainsi que de la charge utilisée. Pour extraire le maximum de puissance des panneaux solaires, nous devons utiliser un mécanisme de poursuite de ce point afin que la puissance maximale soit générée en permanence ce qui est connu sous le nom de commande MPPT « The maximum power point tracking », pour cet objectif, nous avons utilisé la technique dite perturbe et observe qui a donné de bon résultat.

Mots clés : Photovoltaïque, Convertisseur boost, Commande MPPT, Modélisation, Simulation.

Simulating the operation of a photovoltaic system with a MPPT control menu

Abstract

This work consists of the description and modeling of a photovoltaic system, it consists of a generator (PV) associated with a chopper amplifier connected to a load. An important feature of the solar panels is that the maximum available power is provided only in one operating point defined by a known voltage and a current, called the maximum power point. In addition, the position of this point is not fixed but moves according to the irradiation and the temperature of the solar cells and the load used. To extract the maximum power from solar panels, we have to use tracking mechanism so that maximum power is continuously generated what is known as the command name MPPT "The maximum power point tracking " for this purpose we used the technique known perturb and observes that gave good results.

Keywords: Photovoltaic, boost converter, MPPT control, Modelling, Simulation.