

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE
N° : 2017 / IMI 03 / 97 / 482



DOMAINE : SCIENCES ET
TECHNOLOGIES
FILIERE : ELECTRONIQUE
OPTION : INSTRUMENTATION ET
MAINTENANCE INDUSTRIELLE

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique**

Par : Zahar soria

Makhlouf cheymaa

Intitulé

**Etude et Simulation d'un Générateur
Photovoltaïque Muni d'un Convertisseur MPPT
pour une Meilleur Gestion Energétique**

Soutenu devant le jury composé de :

Dr.Sohil Kouda	Université de M'sila	Président
Dr.Houcine Oudira	Université de M'sila	Rapporteur
MAA. Fayçal Saad khelkhal	Université de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2016 /2017

REMERCEMENT

Nous remercions en premier lieu Dieu qui nous avons donnés ce bien là et pour que nous venons ce jour et la force et la patience pour terminer ce travail.

Nous tenons à exprimer nos remerciements à notre encadreur Monsieur Hocine . Oudira qui a proposé et a dirigé ce travail. Nous remercions monsieur le président de jury, ainsi que les membres de jury d'avoir accepté de juger ce travail.

Nous tenons à remercier les responsables et tout le personnel du département d'Electronique de M'sila pour les facilités qu'ils n'ont accordés pour terminer ce travail.

Le travail de mémoire que nous avons effectué doit beaucoup à certaines personnes que nous tenons à les remercier sincèrement.

Enfin, nous remercions toutes les personnes, qui ont contribué de près ou de loin, directement ou indirectement à l'aboutissement de ce travail.

Dédicaces

A mes très chers parents NASSIRA et TAHER. Que Dieu les protèges.

*A mes frères ABDO, ALAA et Mes sœurs AZZIZA, MONA, FATMA,
HAFIDA.*

A toute la famille MAKHLOUF.

Et à tous mes amis.

À Tous ceux qui me sont chers.

شكراً



Dédicaces

A mes très chers parents FATIMA et AMMAR. Que Dieu les protège.

Et ma grande ma mère.

*A mes frères BACHIR, ABDELKARIM, MOHAMED, MOUHSSIN et Mes
sœurs SAMIHA, HAYET.*

A toute la famille ZAHAR.

Et à tous mes amis.

À Tous ceux qui me sont chers.

SORSA

Liste des abréviations

PV	Photovoltaïque.
GPV	Générateur photovoltaïque.
I-V	Courant-Tension
MPPT	Poursuite du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking).
DC-DC	Continue-Continue.
T	Température.
DS	Diamètre de soleil.
Dt	Diamètre de la terre
Lts	Distance moyenne soleil- terre.
E	Énergie du photon.
H	Constante de Planck.
C	Vitesse de propagation.
V	Longueur d'onde
UV	Ultraviolet.
IR	Infrarouge.
CuO	Oxyde cuivreux
Se	Sélénium.
Si	Silicium.
GaAs	Arséniure de gallium
N	Couche avec porteurs des charges libres négatives.
P	Couche avec porteurs des charges libres positives.
K	Couche conductrice.
E_g	Énergie du «bonde gap».
eV	Électron-volt
c - Si	Silicium cristallin
a -Si	Silicium amorphe
P	Phosphore.
Br	Bore.
BV	Bande de valence.
BC	Bande de conduction
η	Rendement.
P_m	Puissance maximale.
S	Surface du module photovoltaïque
E	Éclairement.
N_s	Nombre des cellules en série.
N_p	Nombre des cellules en parallèle
FF	Facteur de forme
I_{cc}	Courant de court-circuit.
V_{oc}	Tension de circuit ouvert.
R_s	Résistance série.
R_{sh}	Résistance shunt
I_{ph}	Photo-courant.

I₀	Courant de saturation
A	Facteur d'idéalité de la jonction
I_{cell}	Courant délivré par la photopile
I_d	Courant de diode
I_{Rsh}	Courant shunt
K_i	Courant de court-circuit divisé par le coefficient de température du panneau.
G	Irradiation sur la surface de la cellule
T_{ref}	Température de référence
G_{ref}	Irradiation de référence (1000 W/m ²).
I_{Rs}	Courant de fuite.
q	Charge de l'électron
K	Constante de Boltzmann
I_{pv}	Courant du panneau
CST	Conditions de Test Standard
P-V	Puissance -Tension
PPM	point de puissance maximale
MOSFET	Métal Oxide Silicon Field Effect Transistor
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
FS	Fréquence de commutation
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
α	Rapport cyclique des impulsions qui commandent l'interrupteur
T_e	Période des impulsions
f_e	Fréquence de découpage
V_{Lmoy}	Valeurs moyennes de tension.
I_{cmoy}	Valeurs moyennes du courant
V_{mpp}	Tension qui correspond à la puissance maximale (V).
I_{mpp}	Courant qui correspond à la puissance maximale (A).
P&O	Perturbation et Observation
P_{PV}	Puissance du panneau
V_{PV}	Tension du panneau
V_{o(t)}	Tension de sortie
V_{0moy}	Tension moyenne
V_{DS}	Tension en dents de scie
S	Interrupteur
T_{ON}	Temps en État ON

Liste des figures

Figure	Titre	Page
CHAPITRE I : Généralité sur les Systèmes Photovoltaïques		
Figure(I.1)	Composante du rayonnement global sur un plan horizontal	6
Figure(I.2)	Le spectre du rayonnement solaire	8
Figure(I.3)	La cellule solaire	9
Figure(I.4)	La structure de la cellule photovoltaïque	10
Figure(I.5)	Principe de la conversion photovoltaïque	12
Figure(I.6)	Dopage de type N	13
Figure(I.7)	Dopage de type P	14
Figure(I.8)	Génération de la paire électron-trou	14
Figure(I.9)	La jonction PN.	15
Figure(I.10)	cellule monocristallines.	15
Figure(I.11)	cellule poly cristalline.	16
Figure(I.12)	Composantes d'un générateur de modules photovoltaïques	17
Figure(I.13)	Les différentes zones de la caractéristique I (V), T=25°C	18
Figure(I.14)	Caractéristique résultante du regroupement de Ns cellules en série	19
Figure(I.15)	Caractéristique résultante du regroupement de Np cellules en parallèle	20
Figure(I.16)	Association mixte des modules solaires	20
CHAPITRE II : Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque		
Figure (II.1)	Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque	23
Figure (II.2)	Caractéristique I(V) d'une cellule (T=25°C, G=1000W/m ²).	27
Figure (II.3)	Caractéristique P(V) d'une cellule(T=25°C, G=1000W/m ²).	27
Figure (II.4)	Caractéristique I(V) pour différentes températures (G=1000W/m ²).	28
Figure (II.5)	Caractéristique P(V) pour différentes températures (G=1000W/m ²).	29
Figure (II.6)	Caractéristique I(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C).	30
Figure (II.7)	Caractéristique P(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C).	30
Figure (II.8)	Caractéristique I(V) d'une générateur PV(T=25°C, G=1000W/m ²).	31
Figure (II.9)	Caractéristique P(V) d'une générateur PV(T=25°C, G=1000W/m ²).	31
Figure (II.10)	Caractéristique I(V) pour différentes nombre de cellule en série.	32
Figure (II.11)	Caractéristique P(V) pour différentes nombre de cellule en série.	33
Figure (II.12)	Caractéristique I(V) pour différentes nombre de cellule en parallèle.	33
Figure (II.13)	Caractéristique P(V) pour différentes nombre de cellule en parallèle.	34
Figure (II.14)	Caractéristique I(V) pour différentes nombre de cellule en série / parallèle.	34
Figure (II.15)	Caractéristique P(V) pour différentes nombre de cellule en série / parallèle.	35
Figure (II.16)	Caractéristique I(V) d'un générateur pour différentes températures (G=1000W/m ²)	35
Figure (II.17)	Caractéristique P(V) d'un générateur pour différentes températures (G=1000W/m ²)	36
Figure (II.18)	Caractéristique I(V) pour différentes niveaux d'éclairement (T=25°C).	36
Figure (II.19)	Caractéristique P(V) pour différentes niveaux d'éclairement (T=25°C).	37

Figure (II.20)	Bloc Simulink représentant la cellule photovoltaïque	37
Figure (II.21)	Schéma bloc de la cellule PV en MATLAB-SIMULINK.	38
Figure (II.22)	Caractéristique I(V) d'une cellule (T=25°C, G=1000W/m ²).	38
Figure (II.23)	Caractéristique P(V) d'une cellule (T=25°C, G=1000W/m ²).	39
Figure (II.24)	Caractéristique I(V) pour différentes températures (G=1000W/m ²).	39
Figure (II.25)	Caractéristique P(V) pour différentes températures (G=1000W/m ²).	40
Figure (II.26)	Caractéristique I(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C).	40
Figure (II.27)	Caractéristique P(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C).	41
Figure (II.28)	Schéma bloc de la générateur PV en MATLAB-SIMULINK.	41
Figure (II.29)	Caractéristique I(V) d'une générateur PV (T=25°C, G=1000W/m ²).	42
Figure (II.30)	Caractéristique P(V) d'une générateur PV (T=25°C, G=1000W/m ²).	42
Figure (II.31)	Caractéristique I(V) d'un générateur pour différentes températures (G=1000W/m ²).	43
Figure (II.32)	Caractéristique P(V) d'un générateur pour différentes températures (G=1000W/m ²).	43
Figure (II.33)	Caractéristique I(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C).	44
Figure (II.34)	Caractéristique P(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C).	44
CHAPITRE III : Simulation du Hacheur Commandé par MPPT		
Figure (III.1)	Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.	47
Figure (III.2)	Circuit idéal du hacheur série.	49
Figure (III.3)	Schéma électrique d'un hacheur Buck fermé.	50
Figure (III.4)	Schéma électrique d'un hacheur Buck ouvert.	50
Figure (III.5)	Caractéristique P(V) d'un panneau solaire.	53
Figure (III.6)	Algorithme MPPT perturbation et observation (P&O)	53
Figure (III.7)	Principe du MLI (DC/DC)	54
Figure (III.8)	Modèle de simulation du convertisseur Buck	55
Figure (III.9)	Système permettant la simulation du convertisseur Buck	55
Figure(III.10)	Tension de source	55
Figure (III.11)	Tension de charge (résistif)	56
Figure (III.12)	courant de charge (résistif)	56
Figure (III.13)	Puissance de charge (résistif)	57
Figure (III.14)	Tension de diode	57
Figure (III.15)	Modèle SIMULINK pour l'algorithme MPPT (P&O)	58
Figure (III.16)	Modèle SIMULINK pour la génération du signal PWM	58
Figure (III.17)	Schéma MATLAB SIMULINK d'un système photovoltaïque avec une commande MPPT (P&O) et un convertisseur (DC/DC) type Buck.	59
Figure (III.18)	Tension de sortie de pour un pas 0.1.	60
Figure (III.19)	Courant de sortie pour un pas 0.1.	60
Figure (III.20)	Puissance de sortie pour un pas 0.1.	61
Figure (III.21)	Variation de l'irradiation (W/m ²)	61
Figure (III.22)	Effet de changement d'éclairement et le pas de perturbation sur la puissance.	62
Figure (III.23)		62

Liste des tableaux		
Tableau	Titre	page
CHAPITRE I : Généralité sur les Systèmes Photovoltaïques		
Tableau (I.1)	Potentiel solaire en Algérie	5
CHAPITRE II : Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque		
Tableau (II.1)	Caractéristique électrique de la cellule dans les conditions standards <CST> T=25°C, G=1000W /m²	26

Sommaire

Introduction générale -----	01
Chapitre I: Généralité sur les Systèmes Photovoltaïques	
I.1 Introduction-----	04
I.2 Énergie renouvelable en Algérie -----	04
I.3 Potentiel solaire en Algérie -----	04
I.4 Généralité sur le soleil -----	05
I.4.1 Rayonnement solaire-----	05
I.4.1.1 Rayonnement direct -----	06
I.4.1.2 Rayonnement diffus -----	06
I.4.1.3 Rayonnement solaire réfléchi -----	06
I.4.1.4 Rayonnement global-----	06
I.4.2 Energie solaire-----	07
I.4.3 Spectre du rayonnement-----	07
I.5 Cellule photovoltaïque -----	08
I.5.1 Cellule solaire -----	08
I.5.2 Historique des cellules photovoltaïques -----	09
I.5.3 Structure de la cellule photovoltaïque-----	10
I.5.4 Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques -----	10
I.5.4.1 Avantages -----	10
I.5.4.2 Inconvénients-----	11
I.5.5 Effet photovoltaïque -----	11
I.5.6 Rappel sur les Propriétés des Semi-conducteurs -----	12
I.5.6.1 Semi-conducteur -----	12
I.5.6.2 Dopage du silicium -----	13

I.5.6.2.1 Dopage de type N -----	13
I.5.6.2.2 Dopage de type P -----	14
I.5.6.3 Formation de la jonction PN -----	14
I.5.7 Différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïque) -----	15
I.5.7.1 Cellules monocristallines -----	15
I.5.7.2 Cellules poly cristallines -----	16
I.5.7.3 Cellules amorphes -----	16
I.5.8 Rendement d'une cellule -----	17
I.6 Générateur photovoltaïque -----	17
I.6.1 Zones de fonctionnement du module solaire -----	18
I.6.2 Association des modules photovoltaïques -----	18
I.6.2.1 Association en série -----	19
I.6.2.2 Association en parallèle -----	20
I.6.2.3 Association série-parallèle -----	20
I.6.3 Facteur de forme -----	21
I.7 Conclusion -----	21
 Chapitre II: Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque	
II.1 Introduction -----	23
II.2 Modélisation d'une cellule photovoltaïque -----	23
II.3 Simulation d'une cellule photovoltaïque -----	26
II.3.1 Caractéristiques I(V) et P(V) -----	26
II.3.2 Effets climatiques sur la cellule PV -----	28
II.3.2.1 Influence de la température sur la cellule -----	28
II.3.2.1.1 Caractéristique (I-V) -----	28
II.3.2.1.2 Caractéristique (P-V) -----	29

II.3.2.2 Influence de l'éclairement sur la cellule-----	29
II.3.2.2.1 Caractéristique (I-V) -----	30
II.3.2.2.1 Caractéristique (P-V)-----	30
II.4 Simulation du générateur photovoltaïque -----	31
II.4.1 Caractéristique (I-V)-----	31
II.4.2 Caractéristique (P-V) -----	31
II.4.3 Influence de l'association des cellules PV sur le GPV -----	32
II.4.3.1 Influence de l'association série des cellules PV-----	32
II.4.3.2 Influence de l'association parallèle des cellules PV -----	33
II.4.3.3 Influence de l'association série / parallèle des cellules PV -----	34
II.4.4 Effets climatiques sur le générateur PV -----	35
II.4.4.1 Influence de la température sur le générateur PV -----	35
II.4.4.2 Influence de l'éclairement sur le générateur PV -----	36
II.5 Simulation d'une cellule photovoltaïque par Matlab-Simulink-----	37
II.5.1 Caractéristique (I-V) -----	38
II.5.2 Caractéristique (P-V)-----	39
II.5.3 Influence de la température sur la cellule-----	39
II.5.4 Influence de l'éclairement sur la cellule -----	40
II.6 Simulation d'un générateur PV sous Matlab-Simulink -----	41
II.6.1 Caractéristique (I-V) -----	42
II.6.2 Caractéristique (P-V) -----	42
II.6.3 Influence de la température sur le générateur-----	43
II.6.4 Influence de l'éclairement sur le générateur -----	44
II.7 Conclusion-----	45

Chapitre III: Simulation du Hacheur Commandé par MPPT	
III.1 Introduction-----	47
III.2 Étage d'adaptation entre un Générateur PV et une charge -----	47
III.3 Convertisseurs DC-DC (Les Hacheurs)-----	48
III.3.1 Type de convertisseurs -----	48
III.3.2 Hacheur dévolteur « Buck »-----	49
III.3.3 Principe de conversion -----	49
III.3.3.1 Fonctionnement -----	49
III.3.3.2 Modèle mathématique équivalent -----	50
III.4 commande MPPT-----	51
III.4.1 Principe du MPPT -----	51
III.4.2 Classification des commandes MPPT selon le type de recherche -----	51
III.4.2.1 MPPT Indirect-----	51
III.4.2.2 MPPT directs-----	52
III.5 Principe de la technique “Perturb and Observe” (P&O)-----	52
III.6 Principe du MLI (PWM) -----	54
III.7 Simulation d'un hacheur série (Buck)-----	54
III.8 Simulation du schéma global -----	59
III.9 résultats de simulation -----	60
III.10 Effet de changement d'éclairement et le pas de perturbation sur la puissance du sortie à la température fixe (T=25°C)-----	61
III.11 Discussions des résultats de la simulation -----	63
III.12 Conclusion -----	63
Conclusion générale-----	64

Introduction générale

Introduction générale

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé dans la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donnent lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire présentant un point de puissance maximale [1].

Dans la plupart des systèmes de production d'énergie photovoltaïque, on trouve une technique ou un algorithme particulier nommé « Maximum Power Point Tracking » (MPPT) qui se traduit par, poursuite du point de puissance maximale. Cette technique, comme son nom l'indique, traque le MPP dans le temps et permet de tirer le maximum de puissance que le panneau est apte à fournir. Le MPPT vise à améliorer et à optimiser l'exploitation des systèmes photovoltaïques. Il permet de faire un gain qui peut atteindre 25% d'où son importance. Techniquement, le MPPT fait appel à une interface entre le panneau et la charge qui est généralement un dispositif de conversion de puissance [2].

Dans ce contexte, l'objectif de ce travail est de donner les détails de conception de la commande du convertisseur DC-DC adaptée par la technique P&O (Perturb and Observe). Ce convertisseur permettra d'améliorer la commande de l'interface de puissance et aussi d'optimiser le transfert de l'énergie dans un système photovoltaïque.

En plus d'une introduction générale et une conclusion générale, qui résume notre étude, le présent travail est subdivisé en trois chapitres organisés comme suit :

Dans le premier chapitre nous avons vu des notions sur l'énergie et principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque au silicium ainsi que les différents types de Cellule, Ensuite, nous avons abordé les différents groupements possibles des cellules. (GPV) et défini son rendement et le Facteur de forme.

Dans le deuxième chapitre nous avons présenté la modélisation mathématique de la cellule et le générateur photovoltaïque , Ensuite Nous avons utilisé le logiciel MATLAB pour étudier dans un premier temps le comportement d'une cellule photovoltaïque puis un générateur photovoltaïque (composé de 46 cellules connectées en série) dans les conditions standard ($G=1000 \text{ W/m}^2$ $T=25^\circ\text{C}$). Nous avons étudié aussi l'influence de la température et de

l'éclairage sur l'énergie produite par la cellule PV, ainsi que l'influence de l'association de cellule (série, parallèle et série / parallèle) sur l'énergie produite.

L'étude des convertisseurs DC-DC (hacheurs séries) et leurs commande MPPT pour chercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale sera l'objet du dernier chapitre.

CHAPITRE I

Généralité sur les Systèmes Photovoltaïques

I.1 Introduction

On considère qu'une énergie est renouvelable, toute source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable (d'où son nom) c'est-à-dire, sa vitesse de formation doit être plus grande que sa vitesse d'utilisation, Les énergies renouvelables sont issues des phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués principalement par le Soleil (l'énergie solaire mais aussi hydraulique, éolienne et biomasse...), la Lune (énergie marémotrice, certains courants : énergie hydrolienne...) et la Terre (géothermique profonde...), à l'échelle de la durée de vie de l'humanité. Ce n'est pas le cas pour les combustibles fossiles et nucléaires [3].

I.2 Énergie renouvelable en Algérie

Les réalisations algériennes dans le domaine des énergies renouvelables sont très limitées en comparaison avec l'actuelle évolution du parc d'énergie renouvelable mondial ou européen, qui a atteint des stades très avancés.

L'utilisation des énergies renouvelables en Algérie n'a pas dépassé le seuil d'expérience durant cinq décennies d'indépendance, malgré la position géographique stratégique du pays qui dispose de l'un des gisements solaires les plus importants au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures par an, et peut atteindre les 3900 heures sur les hauts plateaux et le Sahara. L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m^2 est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de $1700\text{kWh}/\text{m}^2/\text{an}$ au Nord et $2263\text{kWh}/\text{m}^2/\text{an}$ au Sud [4-5].

I.3 Potentiel solaire en Algérie

Au sud algérien les premières expériences ont été effectuées au début des années quatre vingt, où la première station d'énergie solaire a été installée à Melouka par une société du Royaume de Belgique, la station est aujourd'hui à l'arrêt, le recours aux énergies renouvelables au sud algérien est indispensable et prioritaire dans tout développement durable de la région, les distances existantes entre les localités, la dispersion de la population dans le sud rend le raccordement au réseau électrique très coûteux [4-5].

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie	4%	10%	86%
Durée moyenne D'ensoleillement (Heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m ² /an)	1700	1900	2650

Tableau (I.1) : Potentiel solaire en Algérie [5-6].

I.4 Généralité sur le soleil

I.4.1 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 tous 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 Sa lumière, à une vitesse de 300000km/s, met environ 8 minutes pour parvenir à la terre. Sa distribution spectrale de l'atmosphère présente 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 [7-8] :

- ✚ Diamètre de soleil $D_S = 1.39 \cdot 10^9 \text{ m}$
- ✚ Diamètre de la terre $D_t = 1.27 \cdot 10^7 \text{ m}$
- ✚ Distance moyenne soleil- terre $L_{ts} = 1.5 \cdot 10^{11} \text{ m}$

Le rayonnement solaire est la matière première de l'énergie solaire. C'est une propagation d'une onde de longueur qui varie entre 0.2 et 4.10⁻⁶m .sans la nécessité d'un support physique

pour se déplacer, il arrive au sol après la perte d'une grande partie de son intensité, à cause d'une partie de l'ultraviolet, qui s'absorbent [3].

1.4.1.1 Rayonnement direct

C'est la partie reçue directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs. Il peut être mesuré par un pyrhéliomètre [3].

1.4.1.2 Rayonnement diffus

Il est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). La diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. Dans le ciel, ce sont à la fois les molécules d'air, les gouttelettes d'eau (nuages) et les poussières qui produisent cet éclatement des rayons du soleil. Cela dépend donc avant tout des conditions météorologiques [3].

1.4.1.3 Rayonnement solaire réfléchi

C'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige) [3].

1.4.1.4 Rayonnement global

Le rayonnement global est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyranomètre ou un solarimètre sans écran. Les stations météorologiques généralement mesurent le rayonnement global horizontal par un Pyranomètre placé horizontalement à l'endroit requis [3].

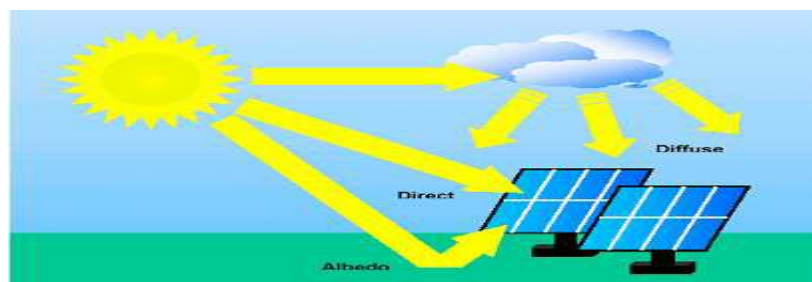


Figure (I.1) : Composante du rayonnement global sur un plan horizontal [3].

I.4.2 Energie 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 [1] [9].

I.4.3 Spectre du rayonnement

Le rayonnement électromagnétique est composé de «grains» de lumière appelés photons.

L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde.

L'énergie de chaque photon est donnée par la formule suivante :

$$E = h\nu = hc/\lambda$$

$h = 6,62 * 10^{-34}$ JS⁻¹ la constante de Planck.

$C = 3 * 10^8$ mS⁻¹ étant la vitesse de propagation.

Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à 5800° K. Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom d'AM0. Sa distribution en énergie est répartie en [8] [10] :

- ✚ Ultraviolet UV **0.20 < λ < 0.38 μm 6.4%**
- ✚ Visible **0.38 < λ < 0.78 μm 48.0%**
- ✚ Infrarouge IR **0.78 < λ < 10 μm 45.6%**

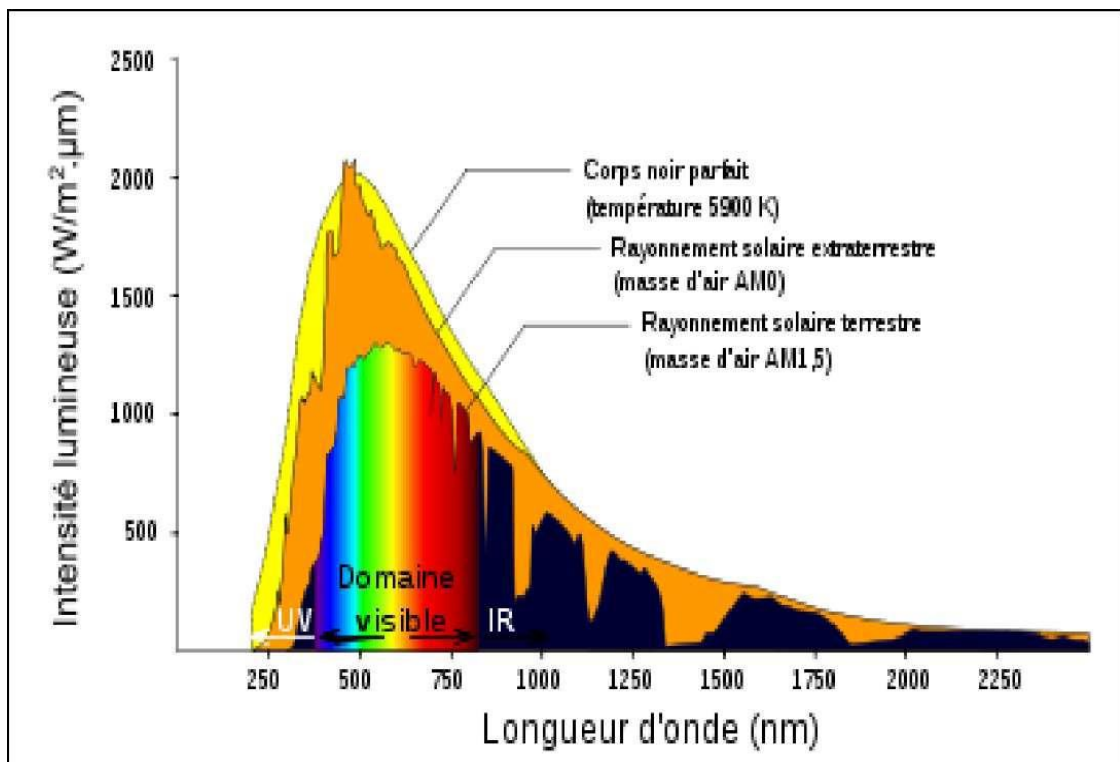


Figure (I.2) : Le spectre du rayonnement solaire [11].

I.5 Cellule photovoltaïque

I.5.1 Cellule solaire

Les cellules solaires sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé effet photovoltaïque. Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants.

L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque [12].



Figure (I.3) : La cellule solaire.

I.5.2 Historique des cellules photovoltaïques

Plusieurs types de matériaux sont susceptibles d'être utilisés dans les capteurs PV, soit seuls, ou associés sous forme de multicouches afin de mieux couvrir la totalité du spectre solaire. C'est en 1930 que les premières cellules PV à oxyde cuivreux (CuO) ont été créées, suivies de cellules en sélénium (Se).

Pendant des années, l'effet photovoltaïque n'était en somme qu'une curiosité de laboratoire. En 1954, les premières cellules au silicium (Si) ont été réalisées dans les laboratoires de la compagnie Bell Téléphone aux Etats-Unis. Depuis, les cellules PV ont commencé à faire l'objet de recherches plus intenses et se sont développées à l'échelle Industrielle. Plusieurs raisons en sont à l'origine, principalement liées aux ressources faibles et à l'environnement.

Pour les applications spatiales, répondant à des normes de poids et de durées de vie sévères, les cellules PV sont rapidement devenues des cellules multicouches basées sur divers matériaux, dont l'une des couches est souvent en GaAs . Elles présentent des rendements très élevés, une bonne fiabilité et une faible détérioration de leurs caractéristiques au cours du temps (sur au moins 20 ans). Les plus récentes sont formées de quatre couches de matériaux différents. Certaines recherches tendent même vers cinq couches.

Bien que leurs performances soient meilleures que celles en Si , ces dernières ne se développent pas pour des applications terrestres en raison de leur prix, 50 à 100 fois plus élevé [13-14].

I.5.3 Structure de la cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est constituée de plusieurs couches. On trouve au centre de cette cellule, une couche avec porteurs de charges libres négative (N) en contact avec une autre couche avec porteurs de charges libres positives (P). De part et d'autre du cœur de la cellule, on a une couche conductrice (K) autrement dit une grille métallique, puisqu'il faut que cette couche soit conductrice et ne subisse pas des phénomènes de corrosion. On a donc une couche qui sert de cathode (pôle +) recouvrant la couche semi-conductrice dopée N et une couche qui joue le rôle de l'anode (pôle -) en dessous la couche semi-conductrice P. Aussi le silicium est très réflecteur, on place donc un revêtement anti-réflexion sur le dessus de la cellule. Enfin on trouve une couche de verre qui protège la cellule. Ces couvertures de protections sont indispensables car la cellule est très fragile. L'épaisseur totale de la cellule est de l'ordre du millimètre. Pour finir, on relie les cellules entre elles, constituant alors le panneau solaire, afin d'obtenir une puissance suffisante [15]. Comme le montre la figure (I.4)

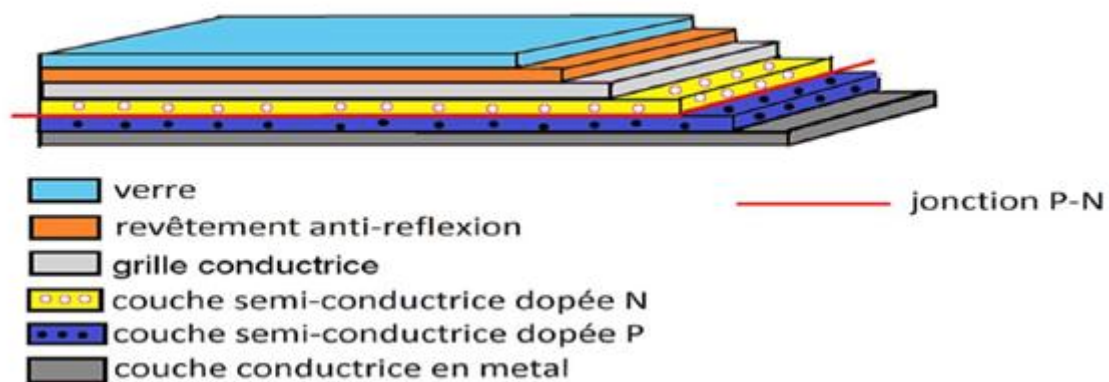


Figure (I.4) : La structure de la cellule photovoltaïque.

I.5.4 Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques

I.5.4.1 Avantages

- Sa gratuité.
- Pas de pollution.
- Sa fiabilité et la longue vie de l'installation.
- Sa structure fixe.
- Son coup de maintenance bas.

- Sa flexibilité (dimensionnement selon les besoins, modularité).
- L'installation ne produit aucun bruit
- Son potentiel illimité. 5% de la surface des déserts sucrerait pour alimenter la planète entière.

1.5.4.2 Inconvénients

- Le coût élevé de l'installation.
- Le rendement relativement bas de l'effet photovoltaïque.
- La puissance est réduite lorsque les conditions climatiques sont défavorables (nuages).
- Le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire pour une installation autonome.

Même si l'électricité produite par une installation photovoltaïque est sans pollution, la fabrication, l'installation et l'élimination des panneaux ont un impact sur l'environnement [2][16-17].

1.5.5 Effet photovoltaïque

Le terme photovoltaïque est formé à partir de deux mots :

- « Phots », qui signifient lumière.

- « Volta », du nom du physicien Alessandro Volta (1745-1827), inventeur de la pile électrique) [1].

La photopile ou la cellule photovoltaïque est fabriquée à partir de semi-conducteurs de différents types, elle constitue l'élément de base d'un générateur photovoltaïque. Son rôle est de transformer de manière directe l'énergie reçue par le soleil en énergie électrique avec un certain rendement qui est caractéristique du semi-conducteur utilisé dans la fabrication.

La photopile utilise deux couches de semi-conducteur, une dopée de type N qui est excédentaire en électrons et l'autre dopée P qui est excédentaire en trous. Ces deux couches sont comprises entre deux électrodes métalliques (+) et (-) pour collecter le courant.

L'énergie du photon absorbée par le semi-conducteur va servir à arracher des électrons qui vont passer à un état d'énergie supérieur créant un déséquilibre électrique se traduisant par une paire électron-trou. Lorsque les deux couches entrent en contact, les électrons libérés se

déplacent de la zone dopée N vers la zone dopée P, de même pour les trous qui se déplacent de la zone P vers la zone N, ceci va créer une jonction P-N et donc un champ électrique.

Le champ permet de déplacer les électrons de la zone N vers la surface négative où ils deviennent disponibles pour le circuit électrique. En même temps les trous se déplacent dans la direction opposée, vers la surface positive où ils attendent les électrons entrants.

Quand les trous et les électrons rejoignent la jonction P-N, une tension est générée, elle peut varier entre 0,3V et 0,7 V en fonction du matériau utilisé, de la température et du vieillissement de la cellule [18-19].

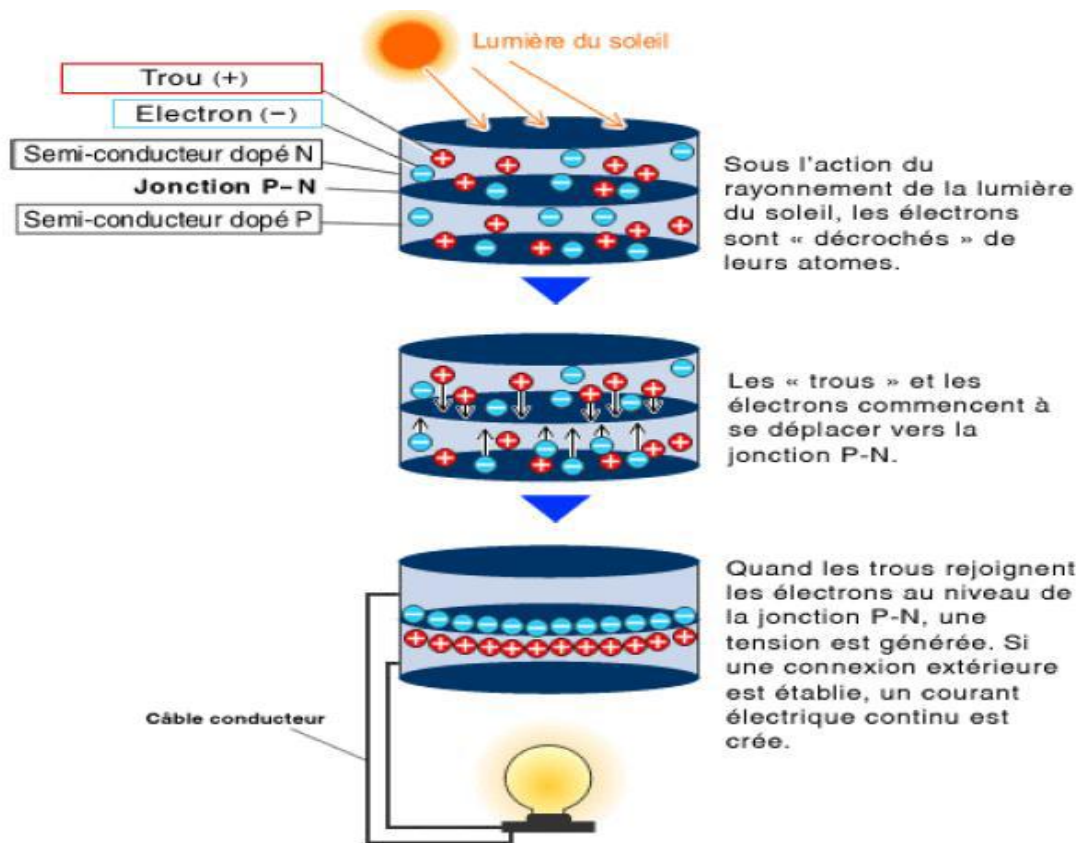


Figure (I.5) : Principe de la conversion photovoltaïque.

I.5.6 Rappel sur les Propriétés des Semi-conducteurs

I.5.6.1 Semi-conducteur

Un semi-conducteur est un matériau dont la concentration en charge libre est très faible par rapport aux métaux. Pour qu'un électron lié à son atome (bande de valence)

devienne libre dans un semi-conducteur et participe à la conduction du courant, il faut lui fournir une énergie minimum pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (bande de conduction).

C'est l'énergie du «bande gap», E_g en électron-volt (eV). Cette valeur seuil est propre à chaque matériau semi-conducteur et va de 1.0 à 1.8 eV pour les applications photovoltaïques. Elle est de 1.1 eV pour le silicium cristallin ($c - Si$), et 1.7 eV pour le silicium amorphe ($a - Si$). Le spectre du rayonnement solaire est la distribution des photons particules de lumière en fonction de leur énergie (inversement proportionnelle à la longueur d'onde). Le rayonnement arrivant sur la cellule solaire sera en partie réfléchi, une autre partie sera absorbée et le reste passera à travers l'épaisseur de la cellule [20].

Les photons absorbés dont l'énergie est supérieure à l'énergie de la bande gap vont libérer un électron négatif, laissant un 'trou' positif derrière lui. Pour séparer cette paire de charges électriques de signes opposés (positive et négative) et recueillir un Courant électrique, il faut introduire un champ électrique e , de part et d'autre de la cellule [21].

1.5.6.2 Dopage du silicium

Les atomes de Si ont quatre électrons de valence, chacun étant lié à un atome Si voisin par une liaison covalente [2].

1.5.6.2.1 Dopage de type N

Si un atome ayant cinq électrons de valence (le phosphore (P)), est incorporé dans le réseau cristallin, alors cet atome présentera quatre liaisons covalentes et un électron libre. Cet électron faiblement lié à l'atome peut être facilement excité vers la bande de conduction. Dans ce genre de matériau, le nombre d'électrons dépasse le nombre de trous.

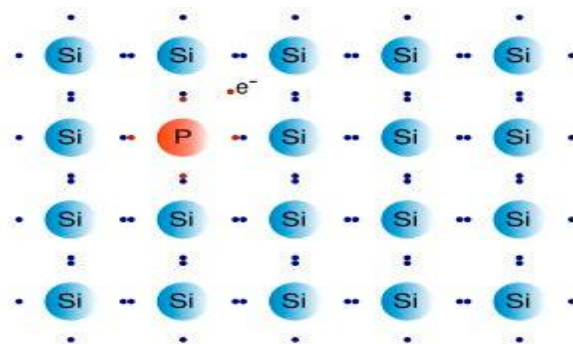


Figure (I.6) : Dopage de type N [22].

I.5.6.2.2 Dopage de type P

Si un atome trivalent (bore (Br)) est substitué à un atome de silicium dans le réseau cristallin, alors il manquera un électron pour l'une des quatre liaisons covalentes des atomes de silicium adjacents et l'atome trivalent peut accepter un électron pour compléter cette quatrième liaison, formant ainsi un trou. Quand le dopage est suffisant, le nombre de trous dépasse le nombre d'électrons.

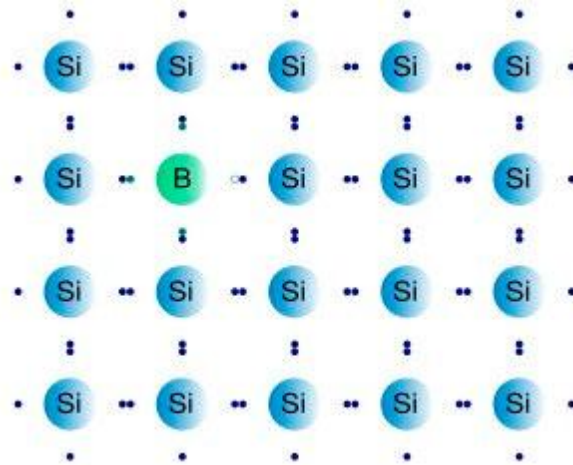


Figure (I.7) : Dopage de type P [22].

I.5.6.3 Formation de la jonction PN

Le silicium, comme tous les semi-conducteurs, a une bande de valence pleine et une bande de conduction vide. Mais grâce à un apport énergétique suffisant, il est possible de faire passer des électrons de la bande de valence (BV) à la bande de conduction (BC), d'où la génération d'électrons libres [23], figure (I.8).

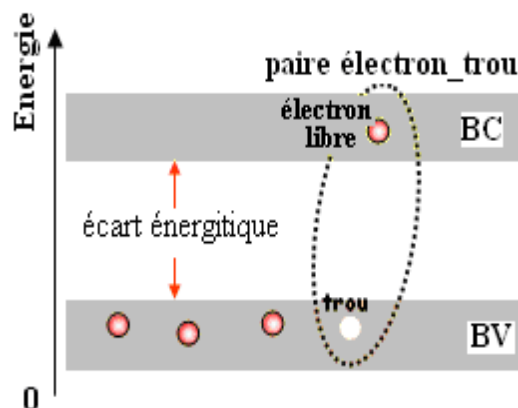


Figure (I.8) : Génération de la paire électron-trou.

La présence d'électrons libres dans la bande de conduction d'un matériau n'est pas suffisante pour générer un courant : il est nécessaire de créer une différence de potentiel aux bornes du photo- générateur afin d'entraîner les charges positives d'un côté et les charges négatives de l'autre. Cette opération est possible par dopage du Silicium. Une jonction PN est créée par l'assemblage de deux barreaux de Silicium de type N et P.

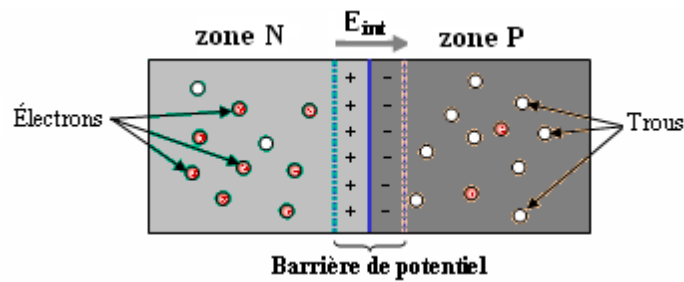


Figure (1.9) : La jonction PN.

I.5.7 Différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïque)

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 [1].

Actuellement, il existe trois principaux types de cellules [24] :

1.5.7.1 Cellules monocristallines

Elles ont le meilleur rendement (de 12 à 18% voir jusqu'24% en laboratoire) Cependant, elles coûtent trop chers dues à leur fabrication complexe.



Figure (I.10) : cellule monocristallines.

1.5.7.2 Cellules poly cristallines

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



Figure (I.11) : cellule poly cristalline.

1.5.7.3 Cellules amorphes

Elles ont un faible rendement (de 5% à 8% voir jusqu'à 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 tels que des calculatrices solaires ou encore des montres.

L'avantage de ce dernier type est qu'elles fonctionnent avec un éclairage faible (même par temps couvert ou à l'intérieur d'un bâtiment). On distingue les trois catégories principales qui se disputent le marché. Elles ont des caractéristiques, des durées de vie, et des sensibilités différentes.



Figure (I.12) : cellule amorphes.

I.5.8 Rendement d'une cellule

Le rendement énergétique est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale produite et la puissance du rayonnement solaire parvenant au module. Soit S la surface du module et E l'éclairement en W/m^2 , ce rendement a pour formule [25] :

$$\eta = \frac{P_m}{S \times E} \dots \dots \dots (I.1)$$

I.6 Générateur photovoltaïque

L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un GPV. 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 [26].

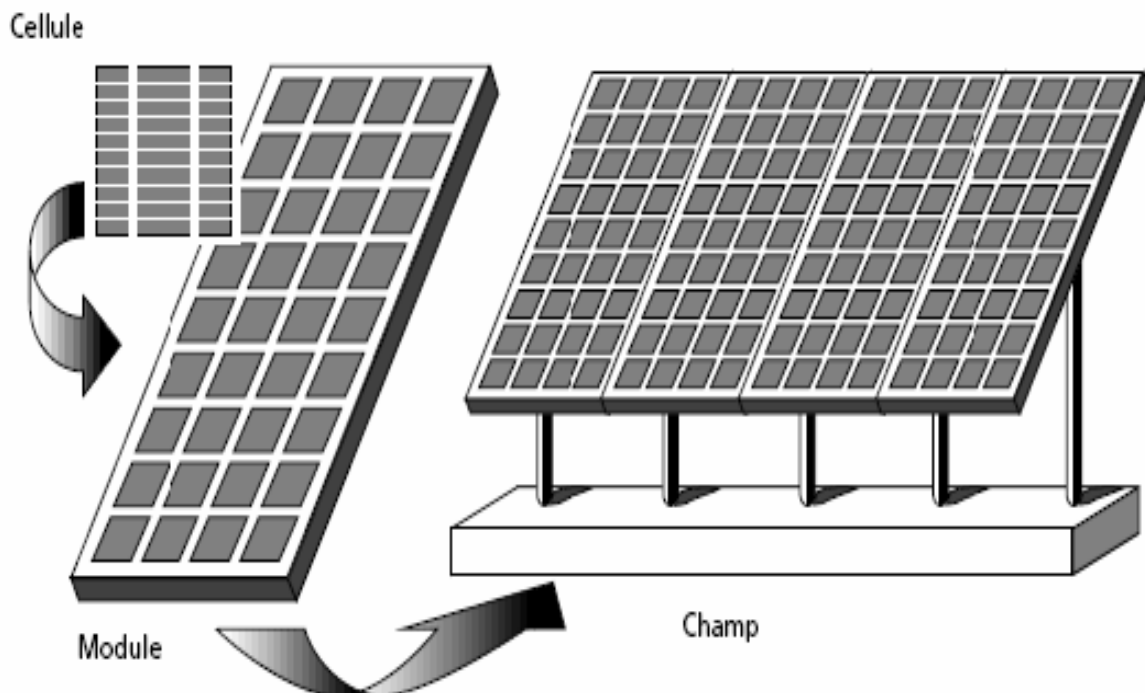


Figure (I.13) : Composantes d'un générateur de modules photovoltaïques [21].

I.6.1 Zones de fonctionnement du module solaire

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque donnée pour un éclairement et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement ; seule la courbe $I(V)$ est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque. La figure (I.14) représente trois zones essentielles :

- **La zone (I)** : où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.
- **La zone (II)** : correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.
- **La zone (III)** : qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension [27].

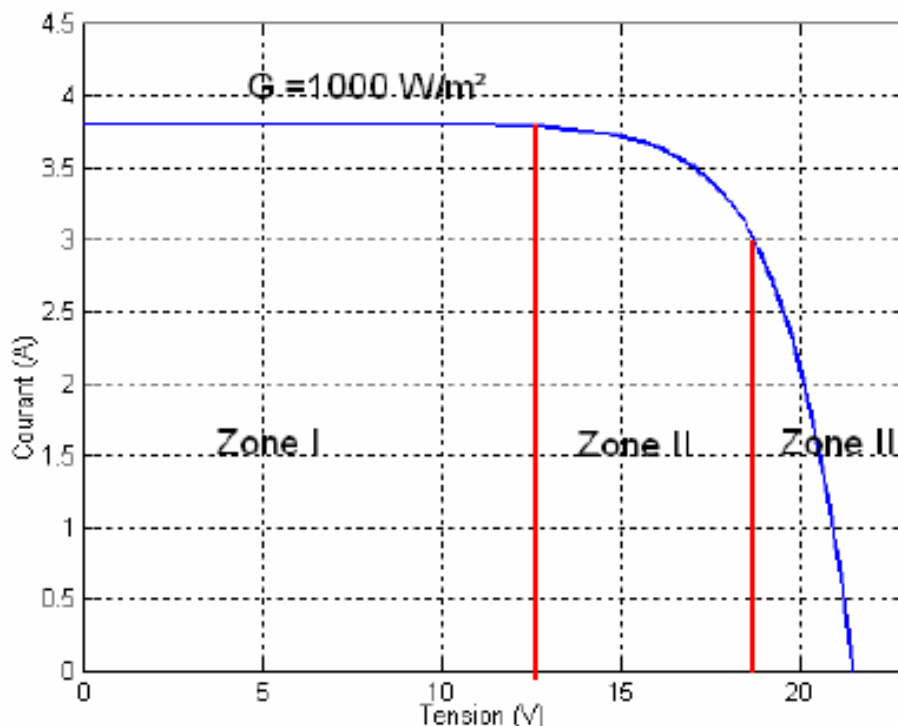


Figure (I.14) : Les différentes zones de la caractéristique $I(V)$, $T=25^\circ\text{C}$.

I.6.2 Association des modules photovoltaïques

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité du courant d'utilisation. Toutefois, il importe de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces ou l'occlusion d'une ou

plusieurs cellules (dus à de l'ombrage, de la poussière, etc...) peuvent en dommage les cellules de façon permanente.

I.6.2.1 Association en série

La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 0.5 W avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau).

L'association en série des cellules délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule [28].

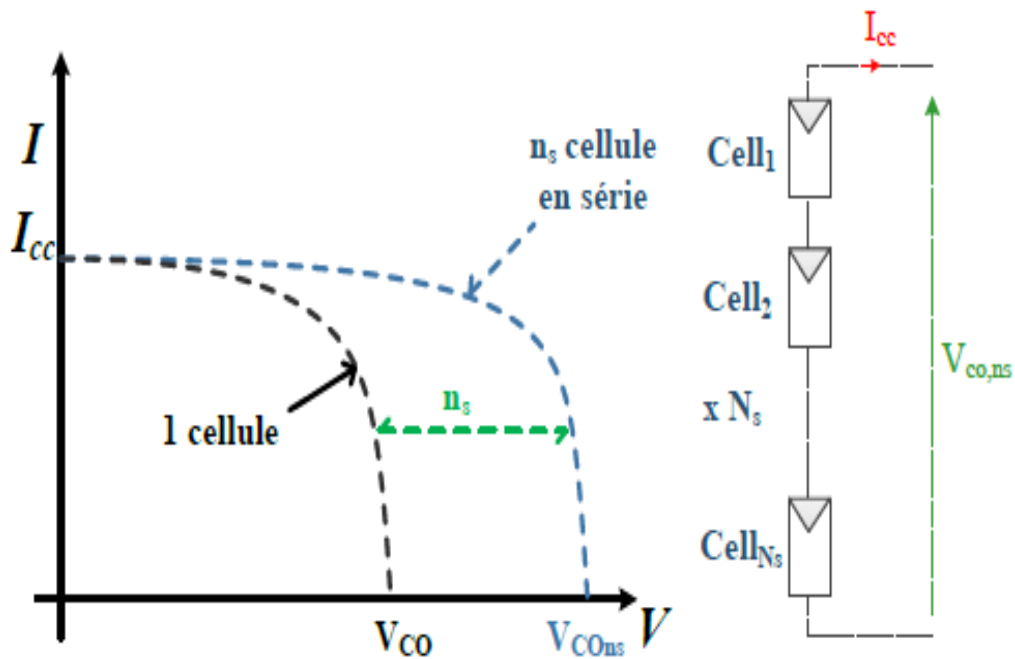


Figure (I.15) : Caractéristique résultante du regroupement de N_s cellules en série [19].

I.6.2.2 Association en parallèle

En additionnant des modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche [29].

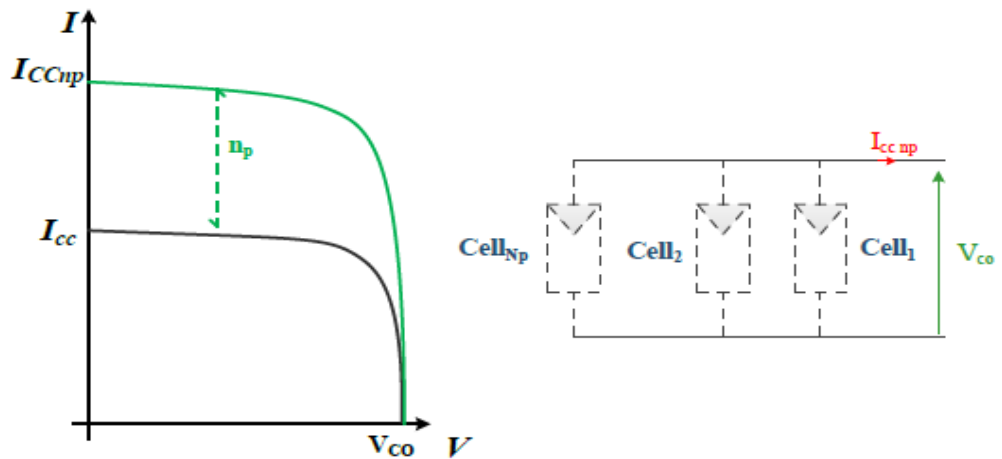


Figure (I.16) : Caractéristique résultante du regroupement de N_p cellules en parallèle [19].

I.6.2.3 Association série-parallèle

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est à dire Série-Parallèle [30].

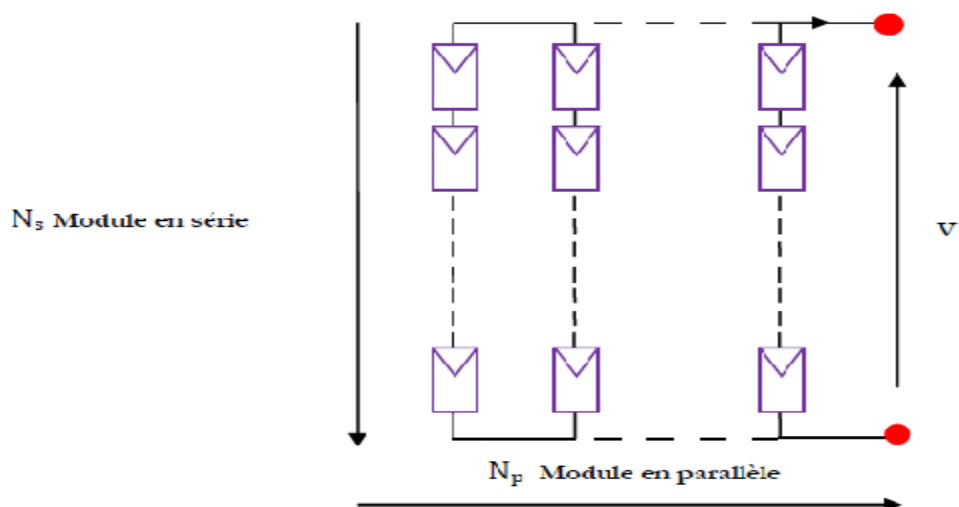


Figure (I.17) : Association mixte des modules solaires [27].

I.6.3 Facteur de forme

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique $I(V)$ pour qualifier la qualité d'une cellule d'un générateur PV : c'est le facteur de remplissage ou «fill factor» (FF). Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{max} et la puissance formée par le rectangle $I_{cc} \cdot V_{oc}$. Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également. Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de compromis technologique pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales, IL est défini par la relation suivante [31] :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \cdot V_{oc}} \dots \dots \dots (I.2)$$

I.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu des notions sur l'énergie solaire, le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque au silicium ainsi que le générateur (GPV), Ensuite, nous avons abordé les différents groupements possibles des cellules et défini son rendement et le Facteur de forme.

Le travail que nous avons présenté nous a permis de constater que nous pouvons améliorer le rendement du système, en choisissant d'une manière optimale le nombre des cellules et l'angle d'inclinaison mensuel. Dans ce contexte, nous allons présenterons dans le chapitre suivant la modélisation de la cellule photovoltaïque ainsi que du générateur photovoltaïque, en étudiant aussi l'influence de la température, l'éclairement et l'association des cellules sur le rendement.

CHAPITRE II

Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons étudier la modélisation de la cellule et le générateur photovoltaïque (composé de 46 cellules connectées en série) dans les conditions standard ($E=1000\text{W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$), nous allons traiter l'effet de la température et l'éclairement sur l'énergie de la cellule PV, et l'effet de regroupement de cellule (série, parallèle, série – parallèle) sur l'énergie produite, et on utilise l'outil MATLAB -SIMULINK pour faire la simulation de comportement de la cellule et du générateur PV.

II.2 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

La photopile présentée comporte en réalité une résistance série (R_s) et une résistance Shunt (R_{sh}). Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique $I=f(V)$:

- **La résistance série** : elle représente 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 [19] [32].

- **La résistance shunt** : elle est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée [19] [32].

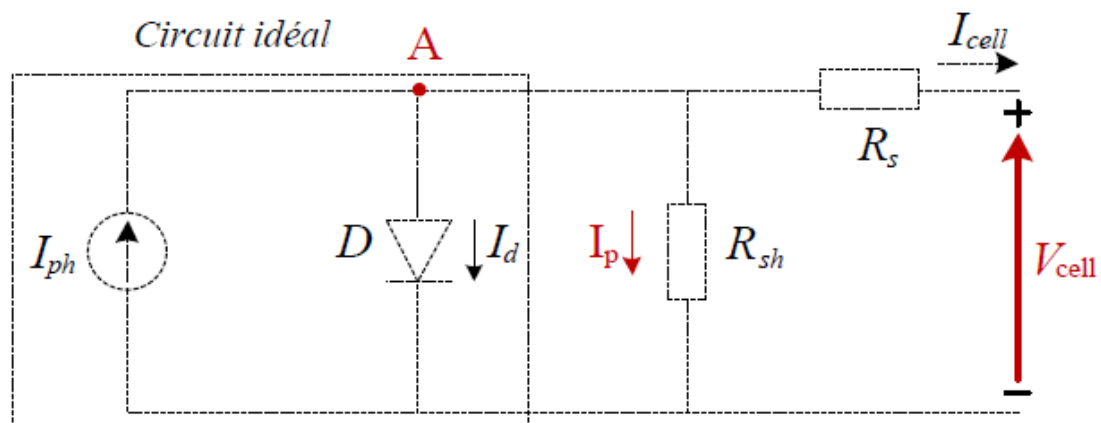


Figure (II. 1) : Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque [32].

Ce modèle fait intervenir un générateur de courant pour modéliser le flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule et deux résistances (série et shunt) pour les pertes [19] [33].

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

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

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

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

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

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

Avec :

I_{cell} : Courant délivré par la photopile.

I_{ph} : Photo courant.

I_d : Courant de la diode.

I_{Rsh} : Courant shunt.

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

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

a. Le photo-courant

C'est le courant généré par une cellule, il est proportionnel à l'irradiation solaire et est légèrement influencé par la température selon l'équation suivante :

Avec :

$$I_{ph} = [I_{cc} + K_i(T - T_{ref})] * \frac{G}{G_{ref}} \dots\dots\dots (II.3)$$

I_{cc} [A] : Courant de court-circuit du panneau (donné par le constructeur).

K_i [A/K] : Courant de court-circuit divisé par le coefficient de température du panneau.

T [K] : Température ambiante.

G [W/m²] : Irradiation sur la surface de la cellule.

T_{ref} [K] : Température de référence (298 K).

Gref [W/m²] : Irradiation de référence (1000 W/m²).

b. Le courant de saturation I₀

Ce courant varie avec la température et est donné par :

$$I_0 = I_{Rs} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[\frac{qE_g}{AK} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \dots \dots \dots (II.4)$$

Avec :

E_g [eV] : Énergie de gap du semi-conducteur (1.1 eV pour le silicium poly cristallin à 25°C).

c. Le courant de saturation inverse de la diode (courant de fuite)

Son expression est donnée par l'équation :

$$I_{Rs} = \frac{I_{cc}}{\exp \left(\frac{qV_{OC}}{KAT} \right) - 1} \dots \dots \dots (II.5)$$

Où :

V_{oc} [V] : Tension de circuit ouvert du module (donnée par le constructeur).

q [°C] : Charge de l'électron (1.602 . 10⁻¹⁹ °c).

N_s : Nombre de cellules connectées en série.

A : Constante d'idéalité de la jonction (1<A<2).

K [J/K] : Constante de Boltzmann (1.3805 .10⁻²³ J/K).

À partir des expressions décrites précédemment on peut déduire le courant délivré par une cellule :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V_{cell} + R_s I_{cell})}{N_s A K T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_{sh}} \dots \dots \dots (II.6)$$

d. Le courant du panneau

Les équations décrites précédemment ne peuvent représenter la caractéristique I-V d'un module PV puisqu'elles sont propres à une seule cellule PV qui représente l'élément de base du panneau, on introduit donc l'équation spécifique à un module :

$$I_{PV} = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V_{cell} + R_s I_{cell})}{N_s A K T} \right) - 1 \right] - N_p \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_{sh}} \dots \dots \dots (II.7)$$

Où :

N_s : Nombre de cellules connectées en série dans un module.

N_p : Nombre de cellules connectées en parallèle dans un module.

II.3 Simulation d'une cellule photovoltaïque

Les caractéristiques électriques de cellule sont données dans le tableau suivant :

Eclairement standard	$G=1000 \text{ W/m}^2$
Température standard	$T=25^\circ\text{C}$
Facteur d'idéalité A	$A=1.6$
Energie de la bande interdite	$E_g \approx 1.1\text{eV}$
Courant de court-circuit I_{cc}	7.34 A
Tension a circuit ouvert V_{oc}	0.6V

Tableau (II.1) Caractéristique électrique de la cellule dans les conditions standards

<CST> $T=25^\circ\text{C}$, $G=1000\text{W /m}^2$ [35].

II.3.1 Caractéristiques I(V) et P(V)

Les résultats obtenus de la simulation (programmation en utilisant le logiciel MATLAB) d'un caractéristiques courant –tension I(V) et puissance -tension P(V) de la cellule photovoltaïque dans les conditions standards ($T=25^\circ\text{c}$, $E=1000 \text{ W/m}^2$) sont représentés dans les figures (II.2) et (II.3) :

La figure (II.2) représente la caractéristique courant – tension d'une cellule solaire dans les conditions de $E=1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{c}$. Le courant de court-circuit est égale 7.34A et la tension de circuit ouvert est 0.6 v .

On observe que la caractéristique $I(V)$ d'une cellule photovoltaïque est identique à celle d'une jonction P-N avec un sens bloqué, mais décalé le long de l'axe du courant d'une quantité directement proportionnelle à l'éclairement.

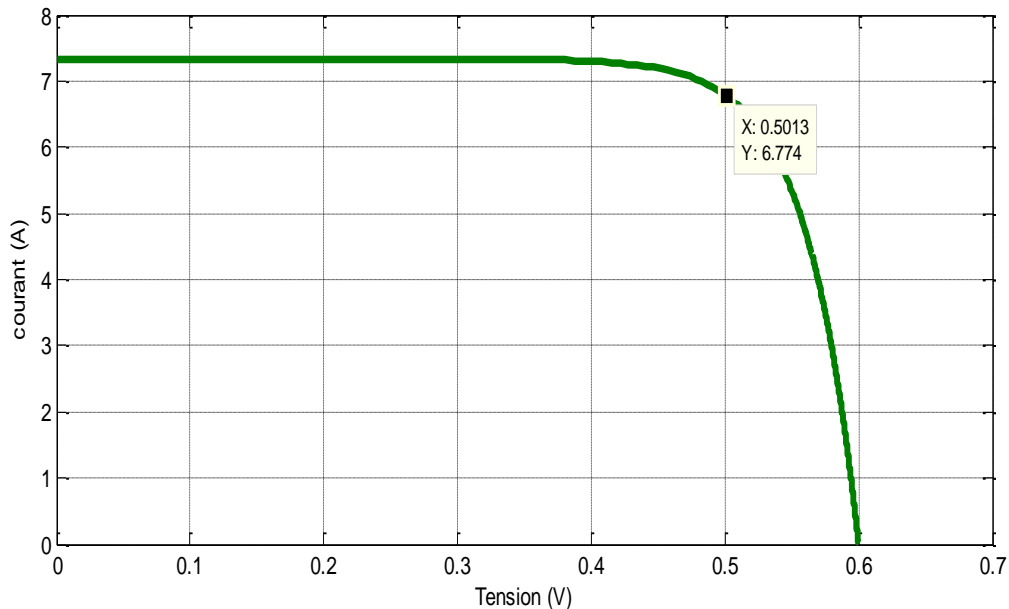


Figure (II.2) : Caractéristique $I(V)$ d'une cellule ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=1000\text{W}/\text{m}^2$).

La figure (II.3) représente la caractéristique puissance – tension d'une cellule solaire dans les conditions de $E=1000\text{ W}/\text{m}^2$ et $T=25^{\circ}\text{C}$. La puissance maximale est $P_{\text{max}}=3.395\text{W}$. On remarque que, quand la tension augmente la puissance augmente jusqu'à atteindre la valeur optimale (P_{max}) ensuite elle décroît.

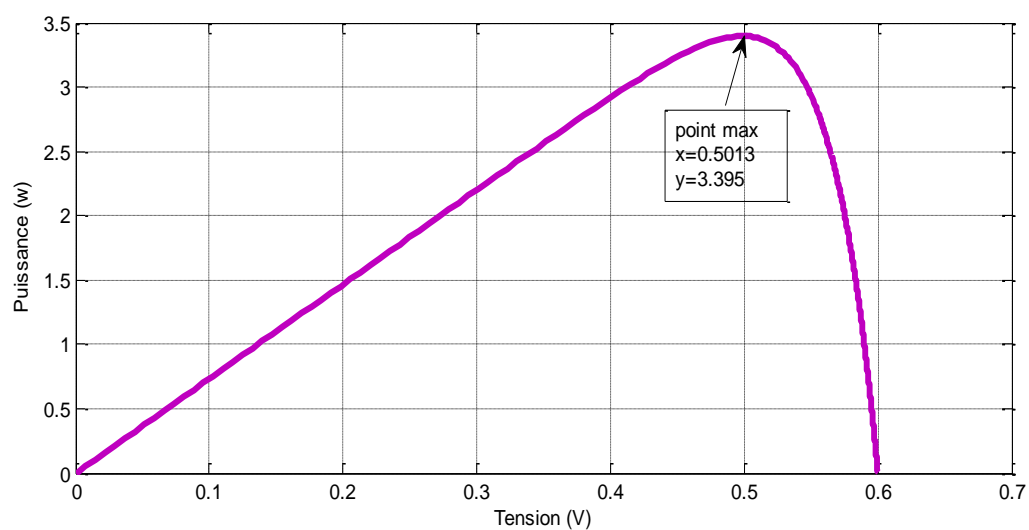


Figure (II.3) : Caractéristique $P(V)$ d'une cellule ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=1000\text{W}/\text{m}^2$).

II.3.2 Effets climatiques sur la cellule PV

II.3.2.1 Influence de la température sur la cellule

Les figures (II.4) et (II.5) représentent la caractéristique courant – tension $I(V)$ et puissance – tension $P(V)$ dans la même condition de l'éclairement ($E=1000 \text{ W/m}^2$) et pour différents température ($T=0, 20, 40, 60$) :

La tension de circuit ouvert est diminuée avec l'augmentation de la température, par contre le courant de court-circuit augmente légèrement avec l'augmentation de la température et la puissance maximale diminue. On constate que la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert.

II.3.2.1.1 Caractéristique $(I-V)$

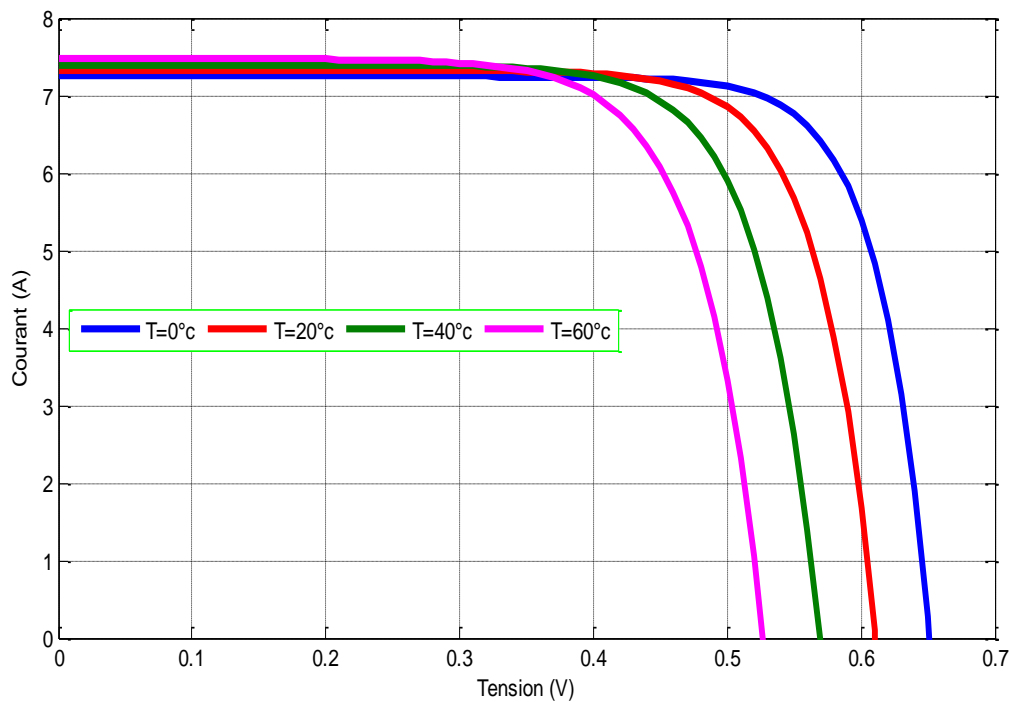


Figure (II.4) : Caractéristique $I(V)$ pour différentes températures ($G=1000\text{W/m}^2$).

II.3.2.1.2 Caractéristique (P-V)

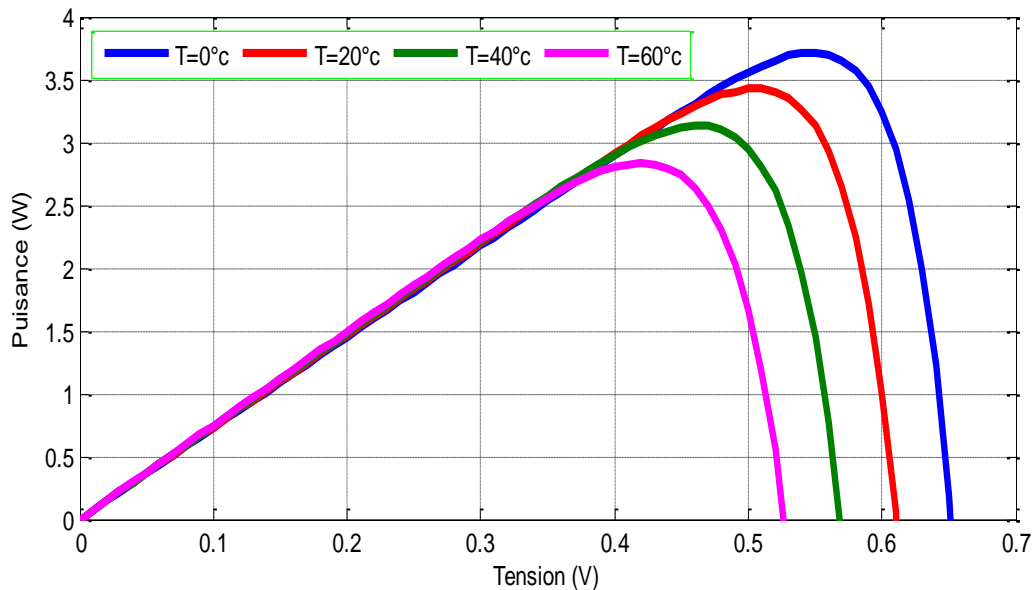


Figure (II.5) : Caractéristique P(V) pour différentes températures ($G=1000\text{W/m}^2$).

On peut donc tirer la conclusion suivante : les cellules PV ont de meilleure performance dans un environnement froid avec ciel dégagé.

II.3.2.2 Influence de l'éclairement sur la cellule

Les figures (II.6) et (II.7) représentent la caractéristique (I-V) et (P-V) d'une cellule en fonction de la variation de l'éclairement ($E=200.400.600.800.1000\text{ W/m}^2$) à température constants ($T=25^\circ\text{C}$) :

Le courant de court-circuit est directement proportionnel au rayonnement incident. Par contre, la tension de circuit ouvert augmente rapidement pour de faibles niveaux d'éclairement, puis lentement pour des niveaux plus élevés (...figure (II.6)).

La figure (II.7) illustre la variation de la puissance délivrée par la cellule en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement, ce qui nous permet de déduire l'influence de l'éclairement sur la caractéristique P(V).

II.3.2.2.1 Caractéristique (I-V)

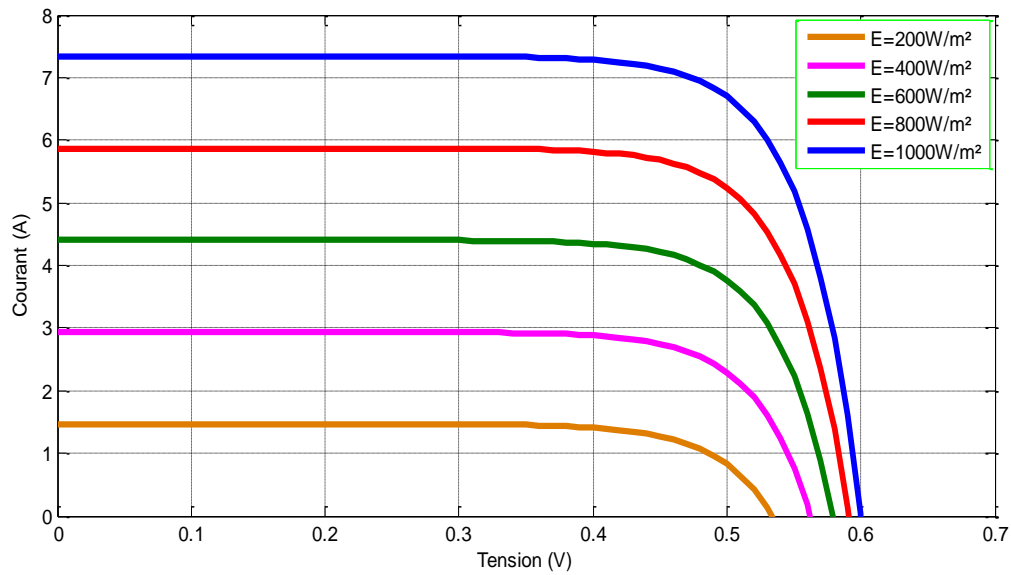


Figure (II.6) : Caractéristique I(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C).

II.3.2.2.1 Caractéristique (P-V)

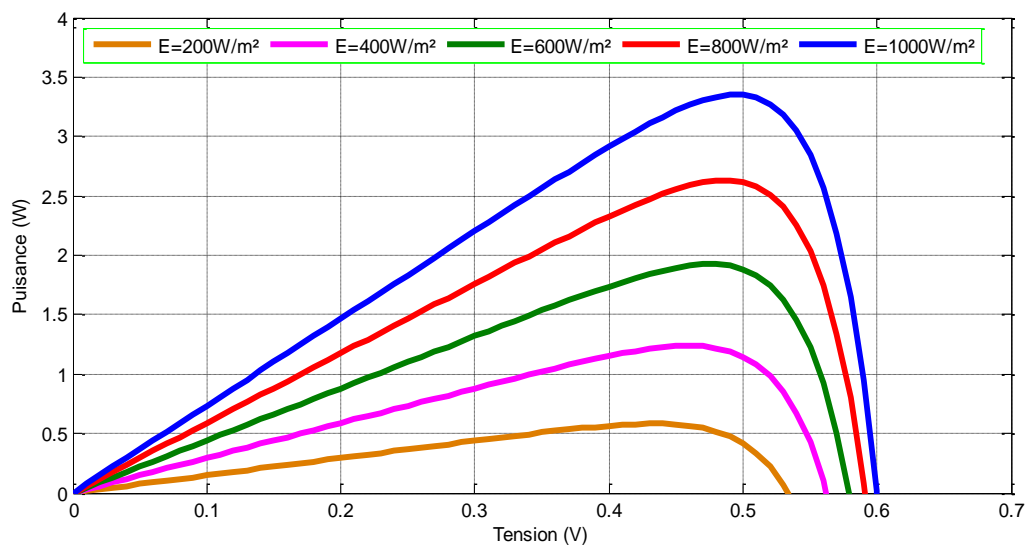


Figure (II.7) : Caractéristique P(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C).

II.4 Simulation du générateur photovoltaïque

Nous avons pris un générateur composé de 46 cellules connectées en série et est considéré dans les conditions standards. $T=25^{\circ}\text{C}$, $G=1000\text{W}/\text{m}^2$.

II.4.1 Caractéristique (I-V)

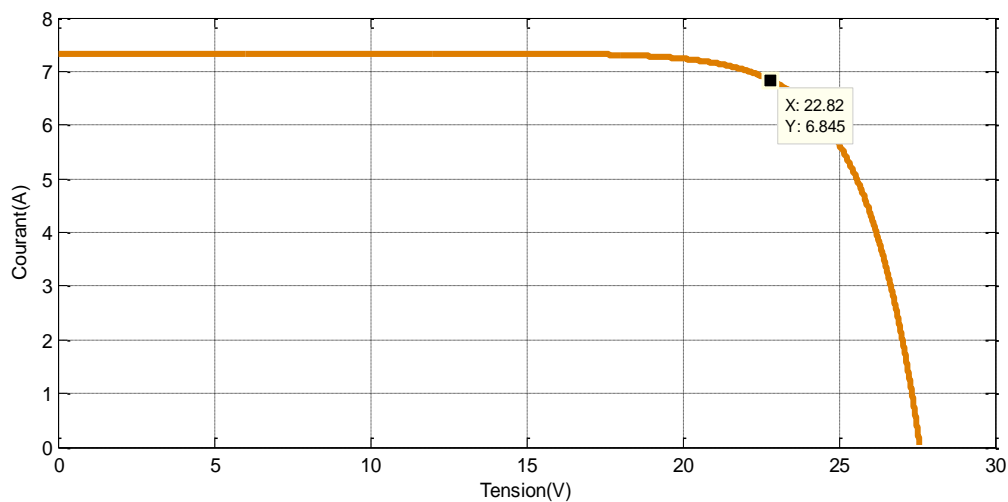


Figure (II.8) : Caractéristique I(V) d'un générateur PV ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=1000\text{W}/\text{m}^2$).

II.4.2 Caractéristique (P-V)

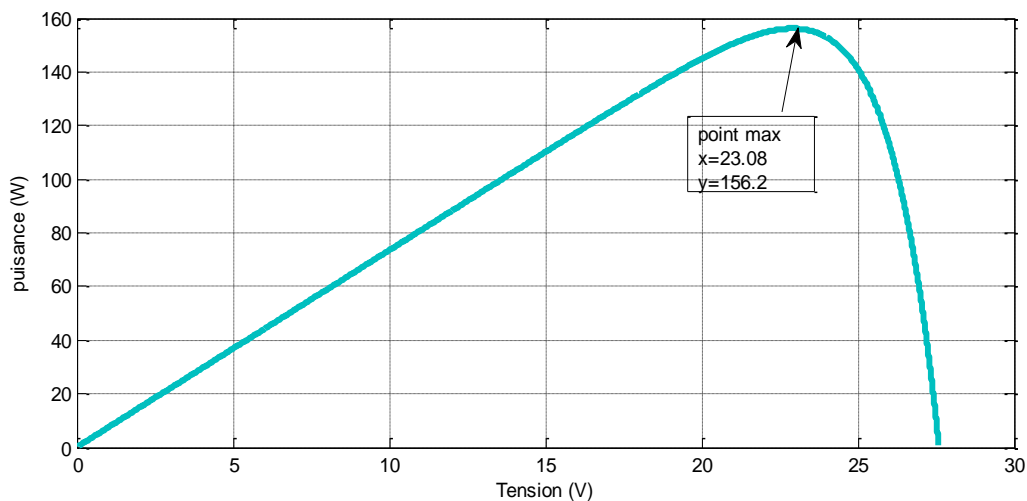


Figure (II.9) : Caractéristique P(V) d'un générateur PV ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=1000\text{W}/\text{m}^2$).

Le courant de court-circuit est $I_{cc}=7.34\text{A}$, la tension de circuit ouvert est $V_{oc}=27.6\text{V}$ (figure II.8). Ce résultat peut être expliqué par le fait que le générateur est composé de 46 cellules connectées en série ce qui donne :

$$V_{ocNcs}=46*0.6=27.6\text{V}$$

La puissance débitée par le générateur photovoltaïque dépend du point de fonctionnement du générateur comme il a montré par la figure (II.9). Le point max représente la puissance maximale débitée par le générateur.

A ce point $P_{max}=156.2W$, ce qui est vérifié par :

$$P_{max}=22.82 * 6.845 =156.20W.$$

II.4.3 Influence de l'association des cellules PV sur le GPV

La cellule tout de seule ne produit qu'une très faible puissance avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance les cellules sont assemblées pour former un générateur. Dans cette partie on va étudier l'influence de l'association série et /ou parallèle des cellules.

II.4.3.1 Influence de l'association série des cellules PV

Les figures (II.10) et (II.11) représentent la caractéristique (I-V) et (P-V) d'une association de cellule en série :

La tension de circuit ouvert augmente quand le nombre de cellule en série augmente, la valeur de courant de court-circuit n'influe pas par l'augmentation du nombre de cellule en série alors que la puissance augmente.

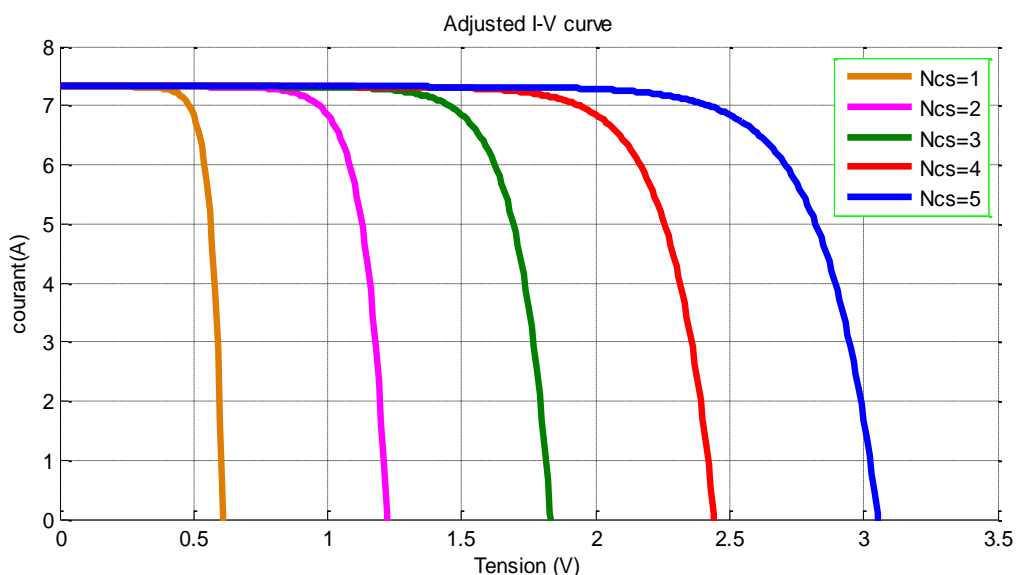


Figure (II.10) : Caractéristique I(V) pour différents nombre de cellule en série.

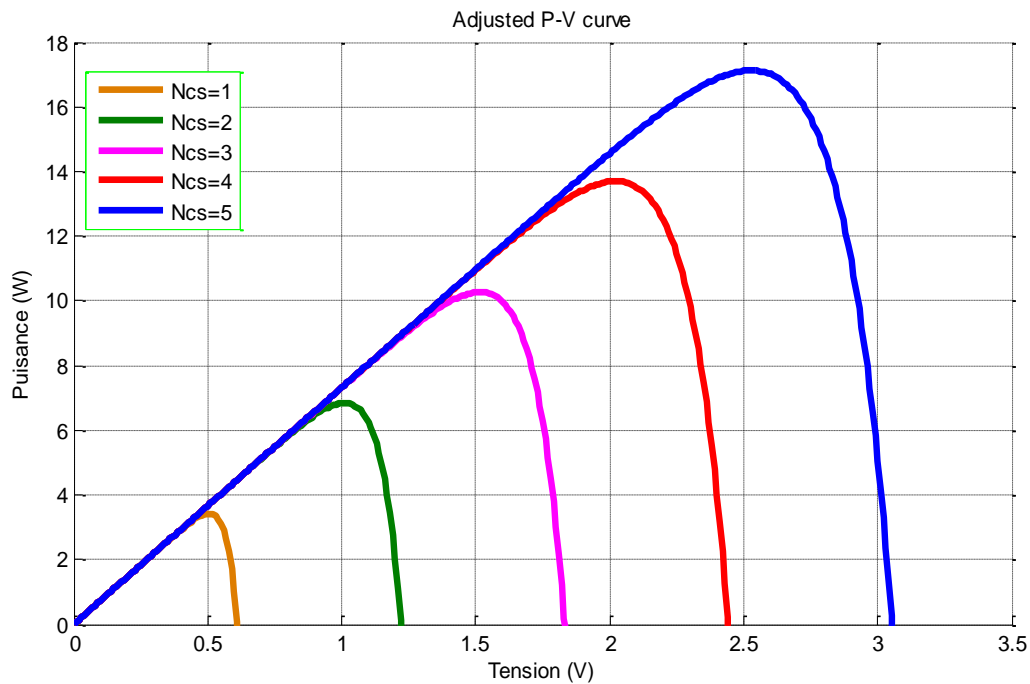


Figure (II.11) : Caractéristique P(V) pour différentes nombre de cellule en série.

II.4.3.2 Influence de l'association parallèle des cellules PV

Les figures (II.12) et (II.13) représentent la caractéristique (I-V) et (P-V) d'une association de cellule en parallèle :

Le courant de court-circuit augmente quand le nombre de cellule en parallèle augmente, la valeur de La tension de circuit ouvert n'influe pas par l'augmentation du nombre de cellule en parallèle alors que la puissance augmente.

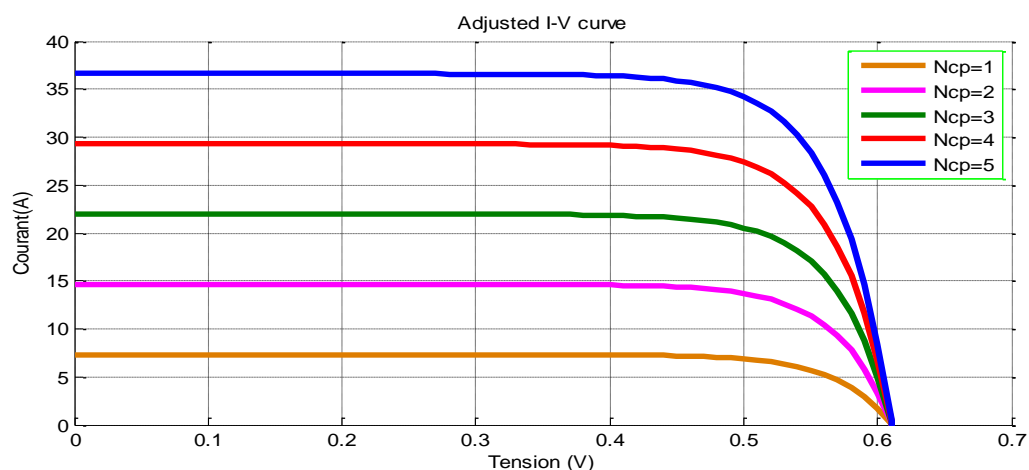


Figure (II.12) : Caractéristique I(V) pour différentes nombre de cellule en parallèle.

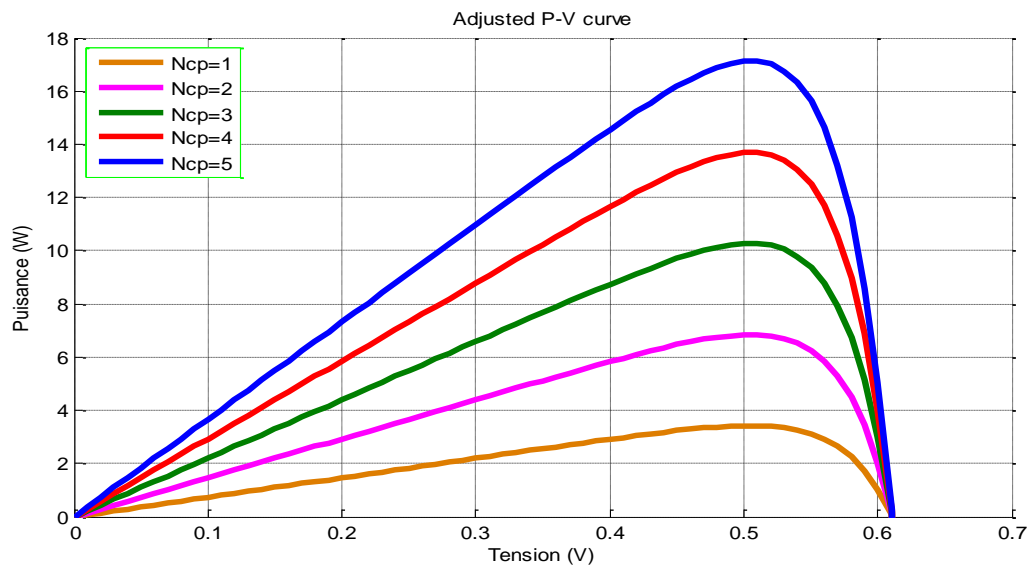


Figure (II.13) : Caractéristique P(V) pour différents nombre de cellule en parallèle.

II.4.3.3 Influence de l'association série / parallèle des cellules PV

Les figures (II.14) et (II.15) représentent la caractéristique (I-V) et (P-V) d'une association de cellule en série/parallèle :

Le courant de court-circuit et La tension de circuit ouvert augmente relativement quand le nombre de cellule en série/parallèle augmente, alors la puissance augmente aussi.

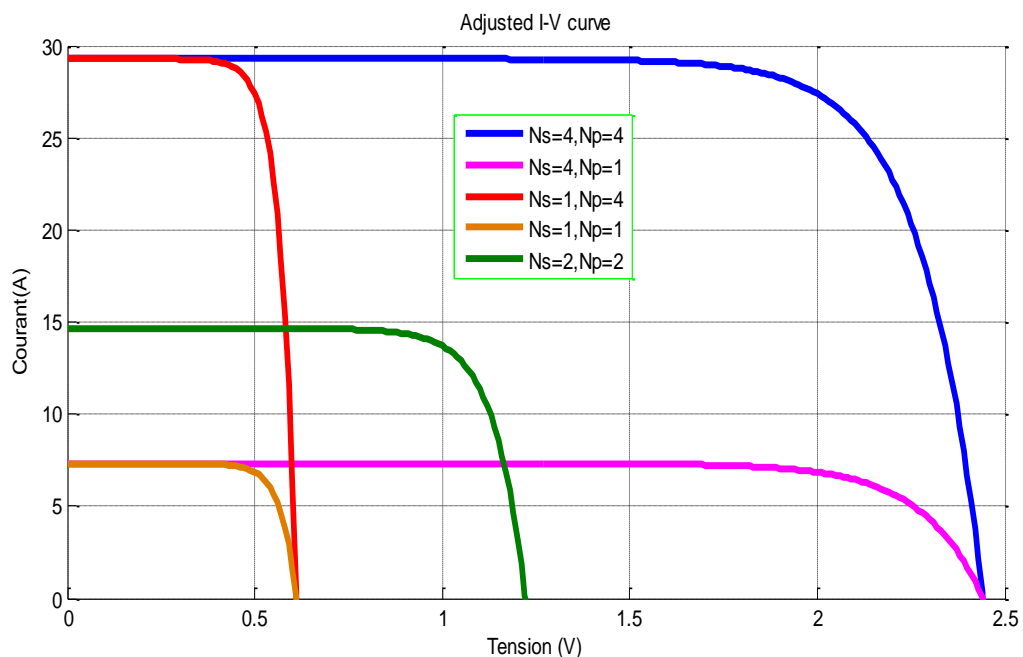


Figure (II.14) Caractéristique I(V) pour différents nombre de cellule en Série / parallèle.

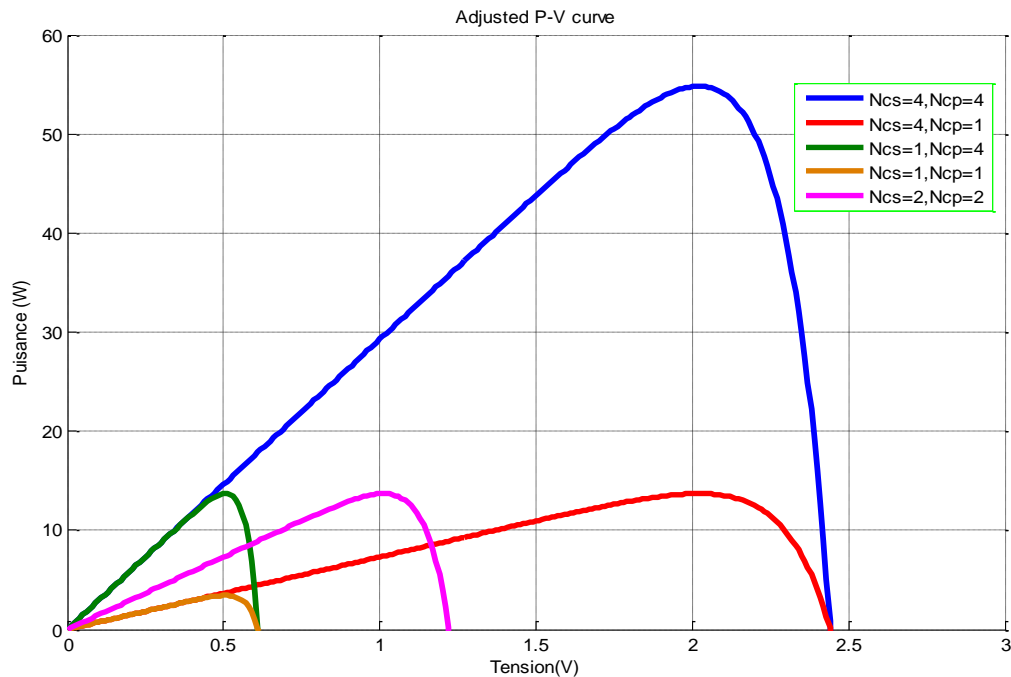


Figure (II.15) Caractéristique P(V) pour différents nombre de cellule en Série / parallèle.

II.4.4 Effets climatiques sur le générateur PV

Les figures (II.16), (II.17), (II.18) et (II.19) représentent la caractéristique (I-V) et (P-V) d'un générateur PV pour différents température et différents éclairement, on obtient aucune différence par rapport à la simulation d'une cellule :

II.4.4.1 Influence de la température sur le générateur PV

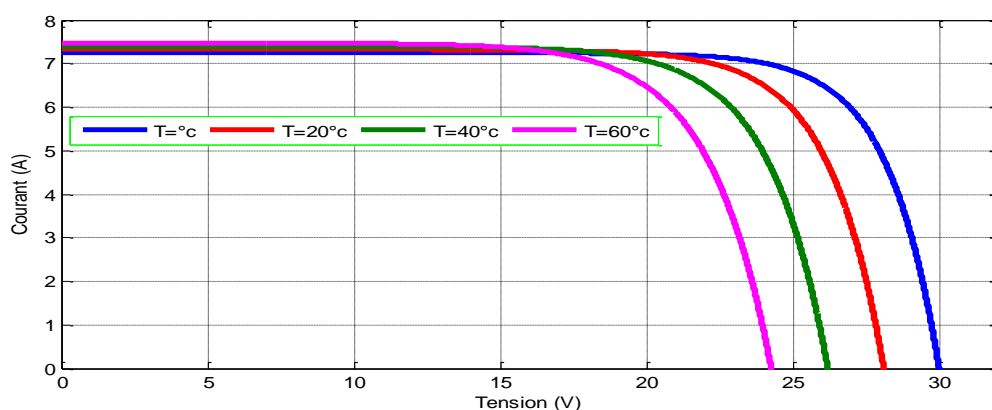


Figure (II.16) : Caractéristique I(V) d'un générateur pour différentes températures (G=1000W/m²).

La figure (II.16) montre l'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$. Il est essentiel de comprendre l'effet de changement de la température d'une cellule solaire sur la caractéristique $I=f(V)$. Le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influe négativement sur la tension de générateur.

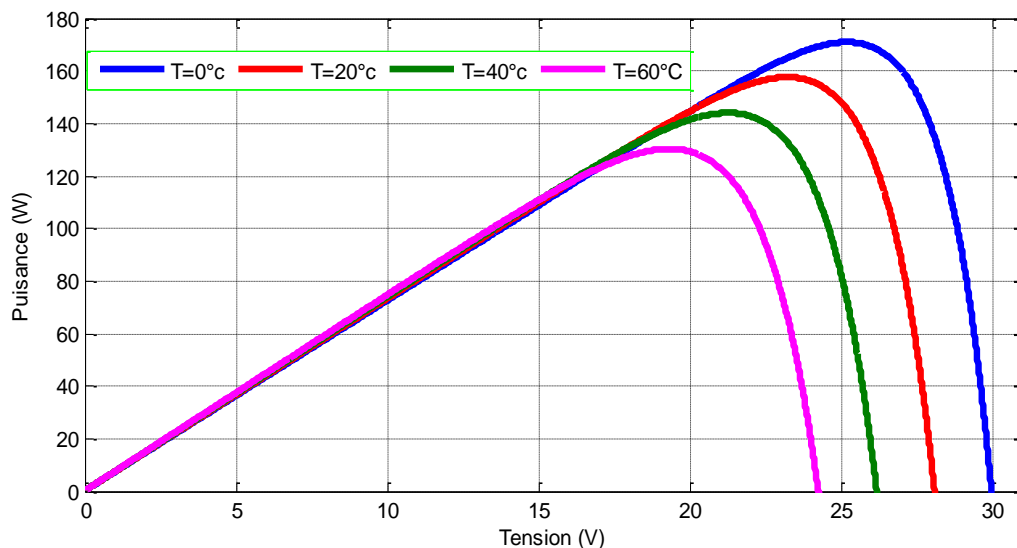


Figure (II.17) : Caractéristique P(V) d'un générateur pour différentes températures ($G=1000\text{W/m}^2$).

II.4.4.2 Influence de l'éclairement sur le générateur PV

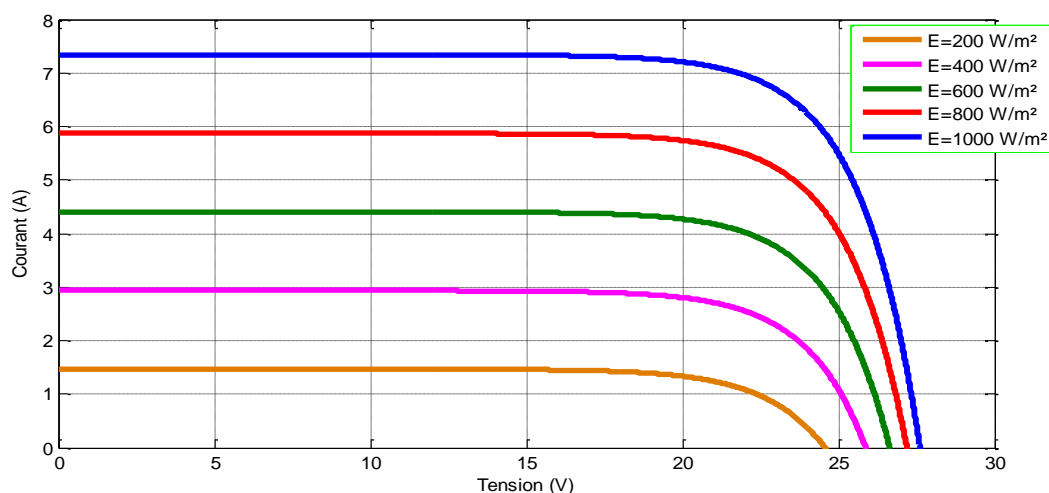


Figure (II.18) : Caractéristique I(V) pour différents niveaux d'éclairement ($T=25^\circ\text{C}$).

La figure (II.18) montre l'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$. A une température constante, on constate que le courant subit une variation importante, mais par

contre la tension varie légèrement. Car le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique.

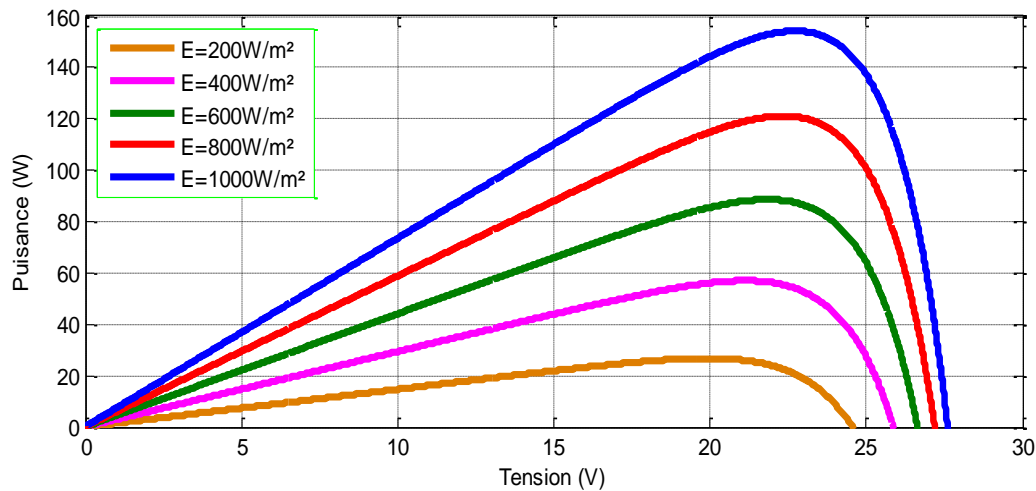


Figure (II.19) : Caractéristique P(V) pour différents niveaux d'éclairement ($T=25^{\circ}\text{C}$).

II.5 Simulation d'une cellule photovoltaïque par Matlab-Simulink

SIMULINK est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation des systèmes dynamiques. Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent le design précis, la Simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communications et de traitement du signal [1].

La figure (II.20) représente le schéma bloc d'une cellule photovoltaïque :

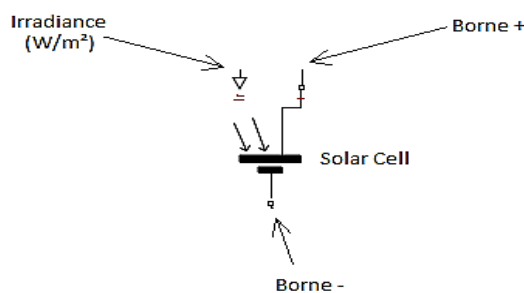


Figure (II.20) : Bloc Simulink représentant la cellule photovoltaïque.

La figure suivante (II.21) représente le schéma bloc de la cellule PV en MATLAB-SIMULINK :

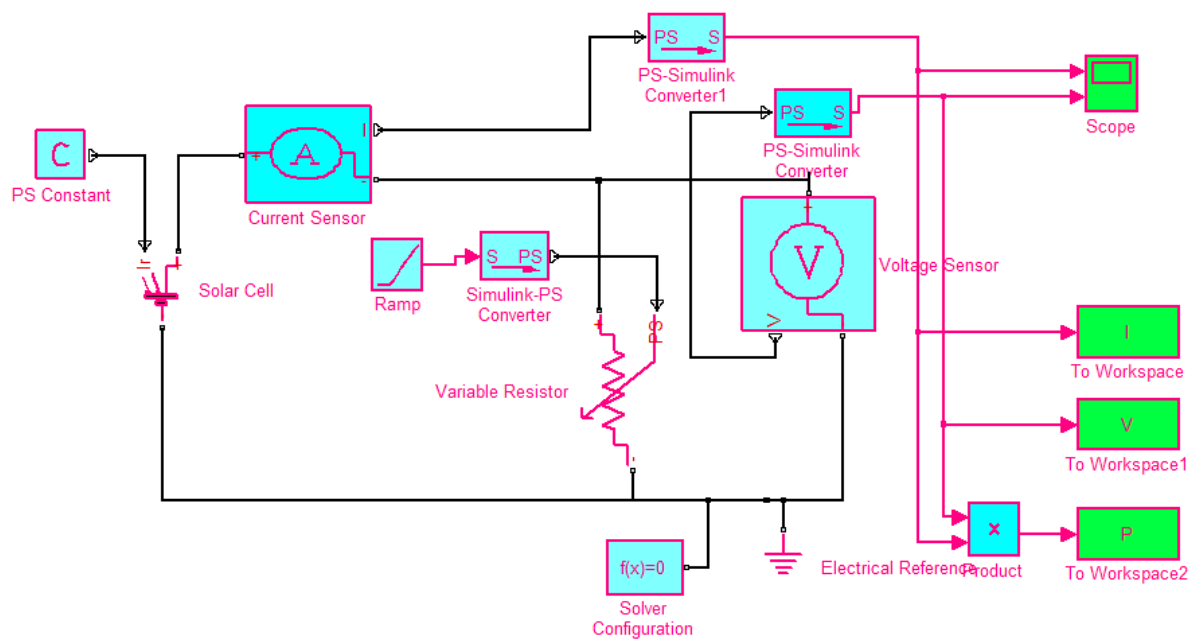


Figure (II.21) : Schéma bloc de la cellule PV en MATLAB-SIMULINK.

Les figures suivants (II.22, II.23, II.24, II.25, II.26 et II.27) représentent les résultats de la simulation d'une cellule PV en MATLAB –SIMULINK en tenant compte l'influence de la température et l'éclairement.

II.5.1 Caractéristique (I-V)

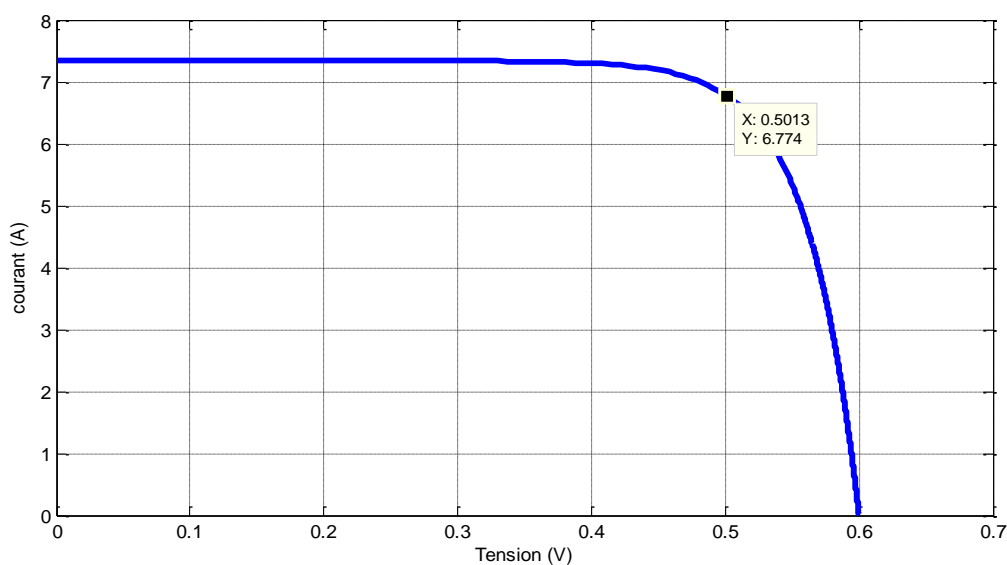


Figure (II.22) : Caractéristique I(V) d'une cellule (T=25°C, G=1000W/m²).

II.5.2 Caractéristique (P-V)

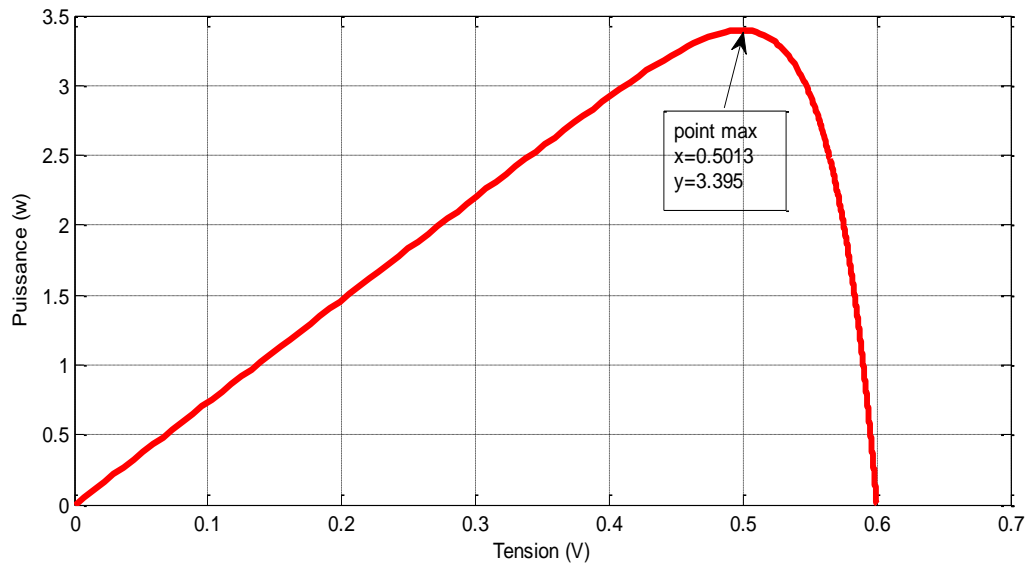


Figure (II.23) Caractéristique P(V) d'une cellule ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=1000\text{W}/\text{m}^2$).

II.5.3 Influence de la température sur la cellule

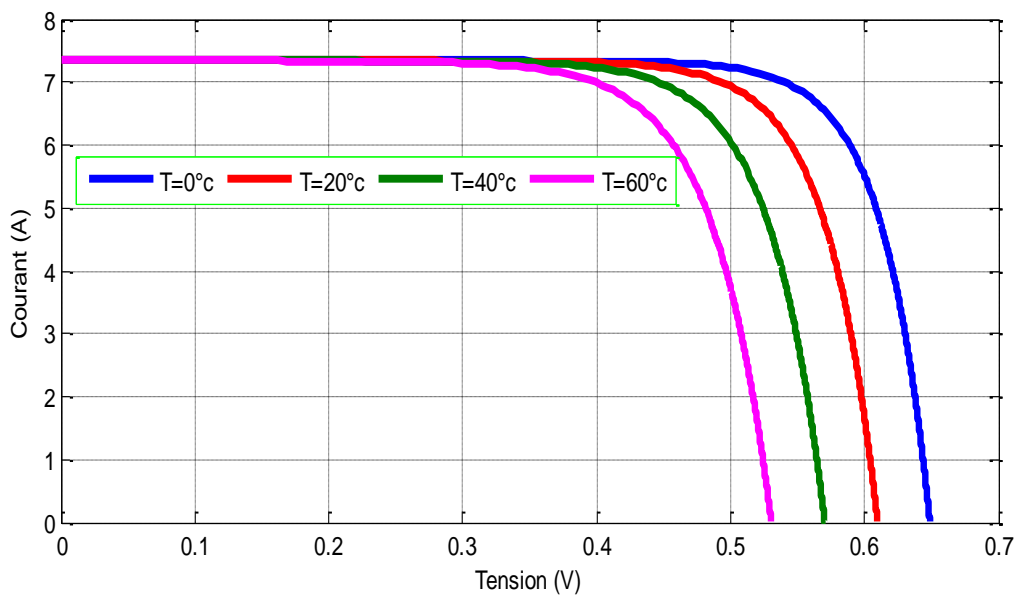


Figure (II.24) : Caractéristique I(V) pour différentes températures ($G=1000\text{W}/\text{m}^2$).

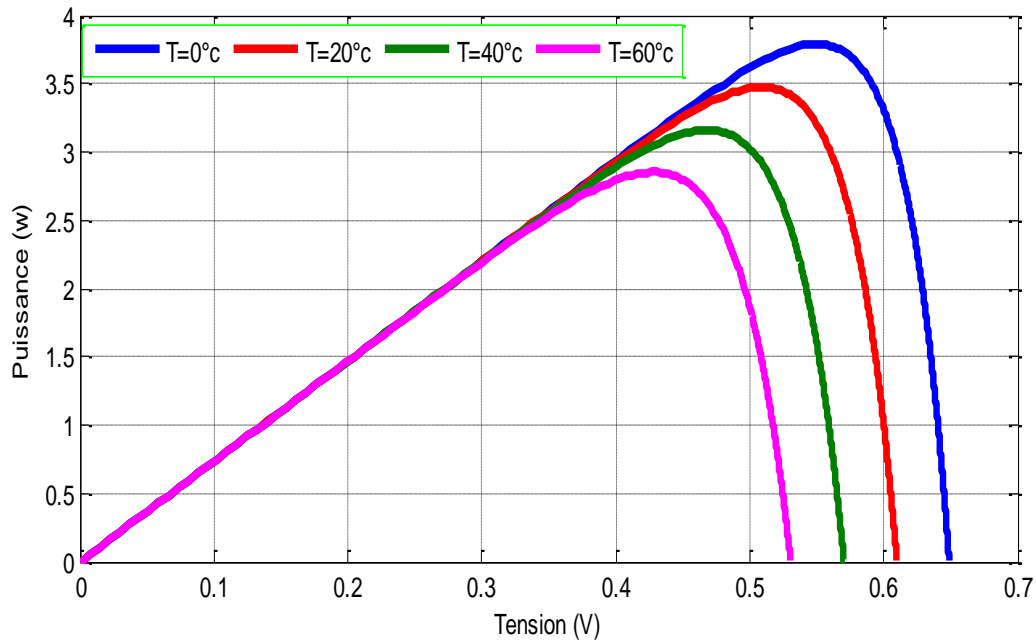


Figure (II.25) : Caractéristique P(V) pour différentes températures ($G=1000\text{W}/\text{m}^2$).

II.5.4 Influence de l'éclairement sur la cellule

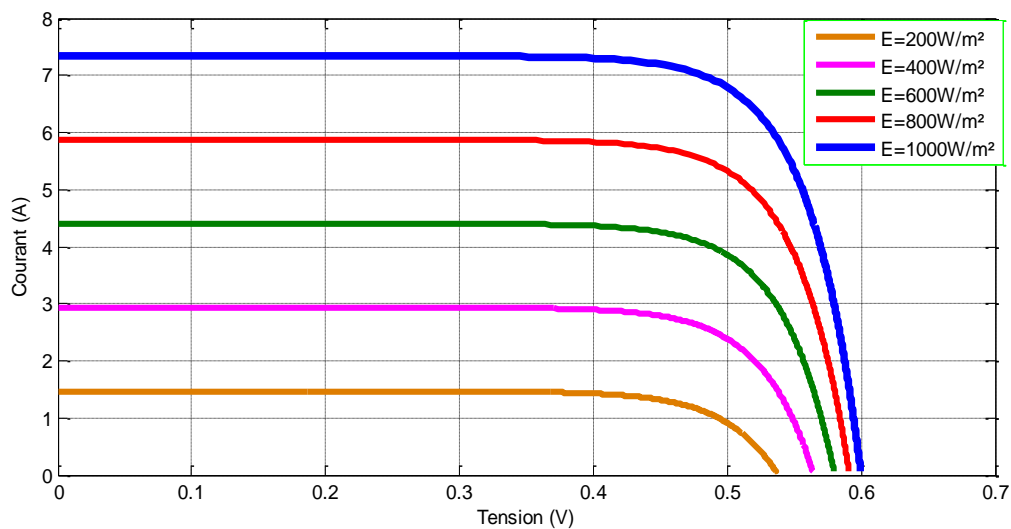


Figure (II.26) : Caractéristique I(V) pour différents niveaux d'éclairement ($T=25^\circ\text{C}$).

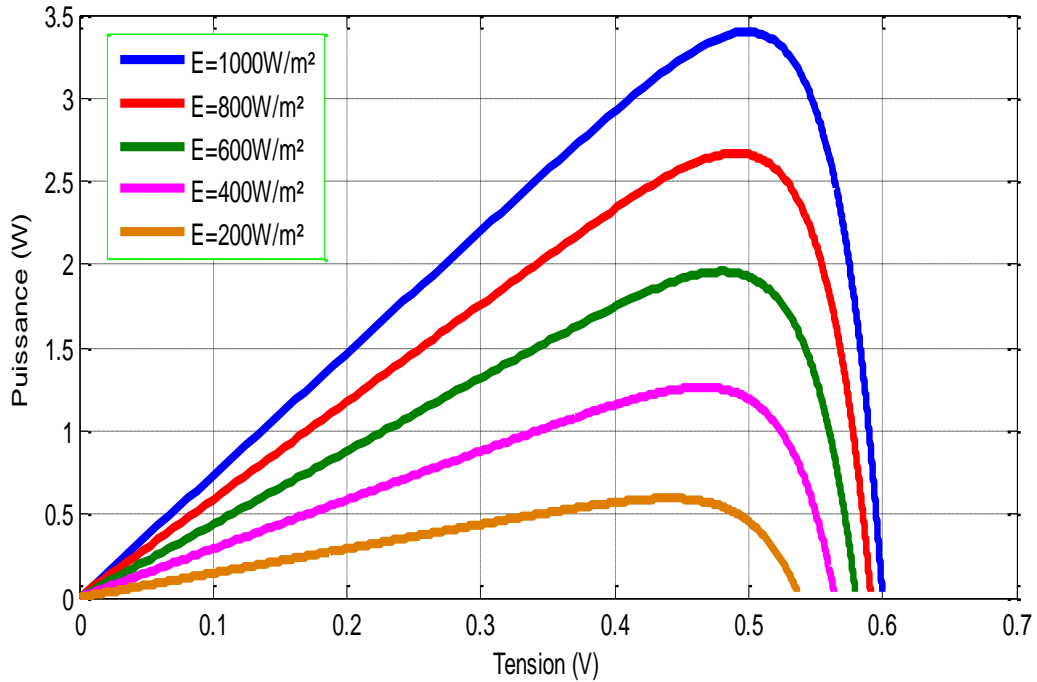


Figure (II.27) : Caractéristique P(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C).

II.6 Simulation d'un générateur PV sous Matlab-Simulink

Cette figure représente le schéma bloc de la générateur PV en MATLAB-SIMULINK :

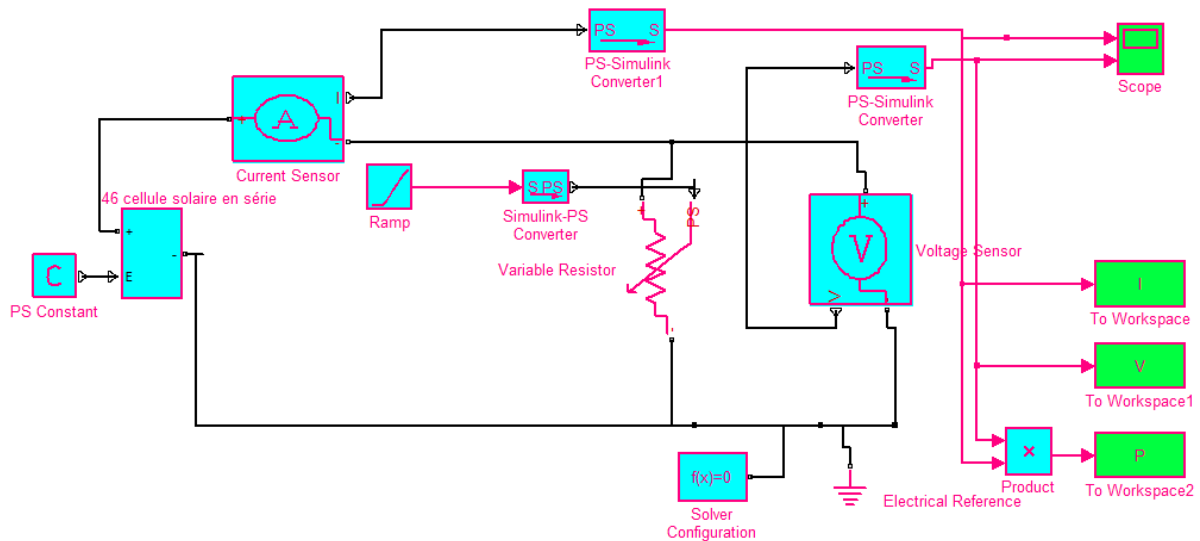


Figure (II.28) : Schéma bloc de la générateur PV en MATLAB-SIMULINK.

Les figures suivantes (II.29, II.30, II.31, II.32, II.33 et II.34) représentent les résultats d'une simulation de la générateur PV en MATLAB-SIMILINK en tenant compte l'influence de la température et l'éclairement.

II.6.1 Caractéristique (I-V)

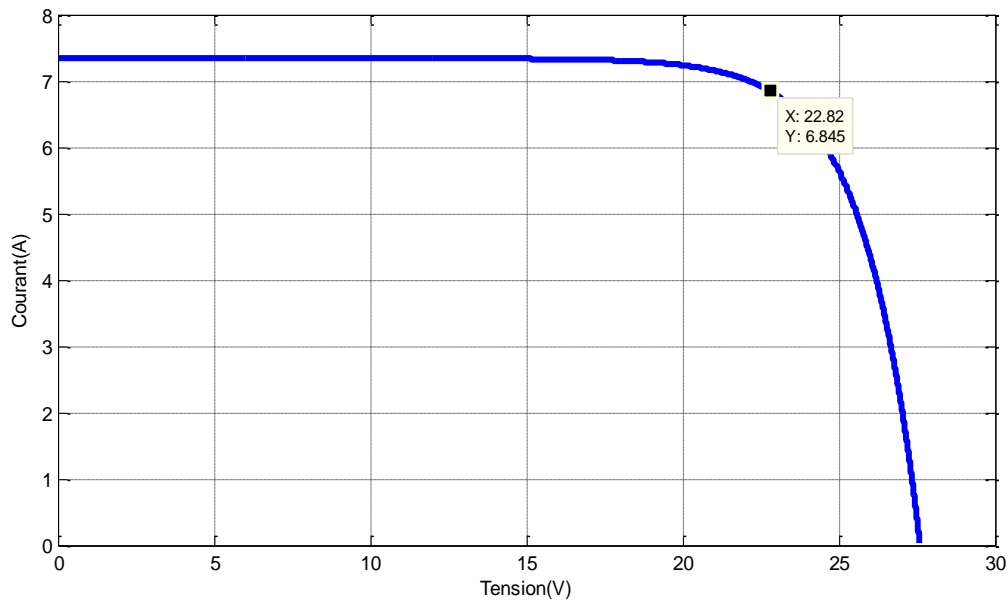


Figure (II.29) Caractéristique I(V) d'une générateur PV ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=1000\text{W}/\text{m}^2$).

II.6.2 Caractéristique (P-V)

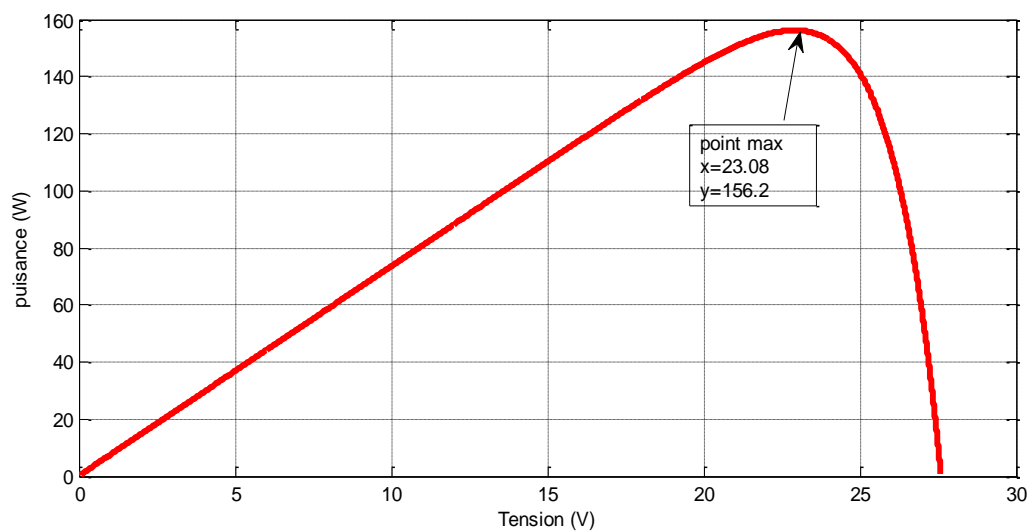


Figure (II.30) Caractéristique P(V) d'une générateur PV ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=1000\text{W}/\text{m}^2$).

II.6.3 Influence de la température sur le générateur

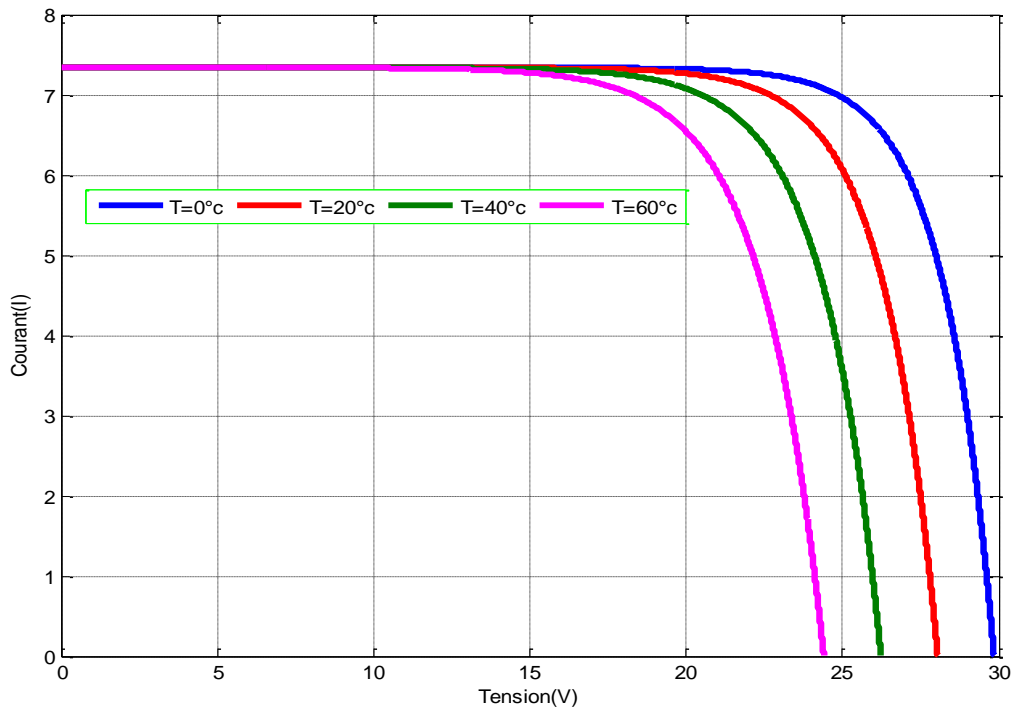


Figure (III.31) Caractéristique I(V) d'un générateur pour différentes températures ($G=1000\text{W/m}^2$).

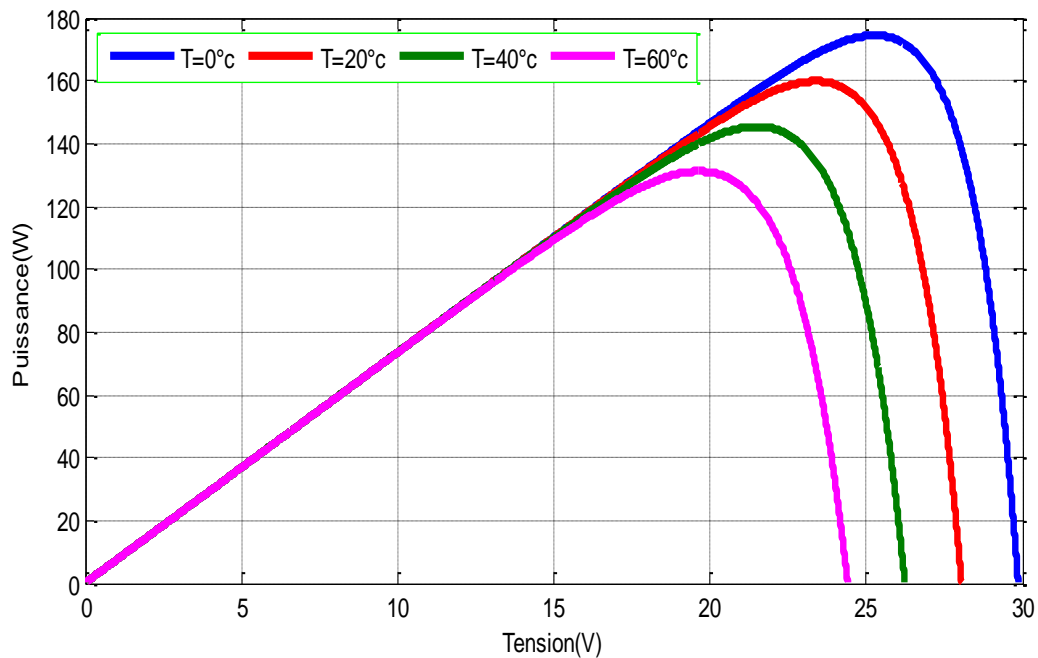


Figure (II.32) : Caractéristique P(V) d'un générateur pour différentes températures ($G=1000\text{W/m}^2$).

II.6.4 Influence de l'éclairement sur le générateur

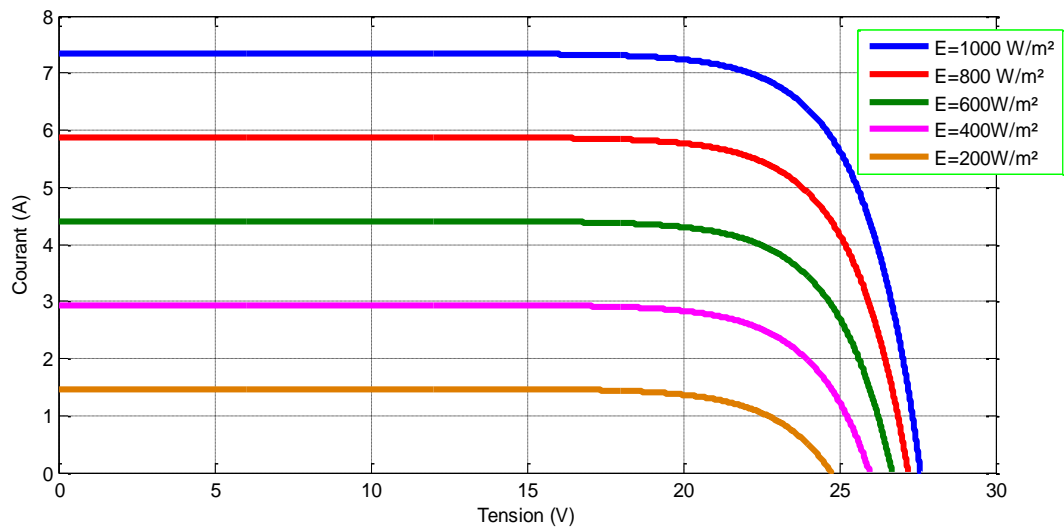


Figure (II.33) : Caractéristique I(V) pour différents niveaux d'éclairement ($T=25^{\circ}C$).

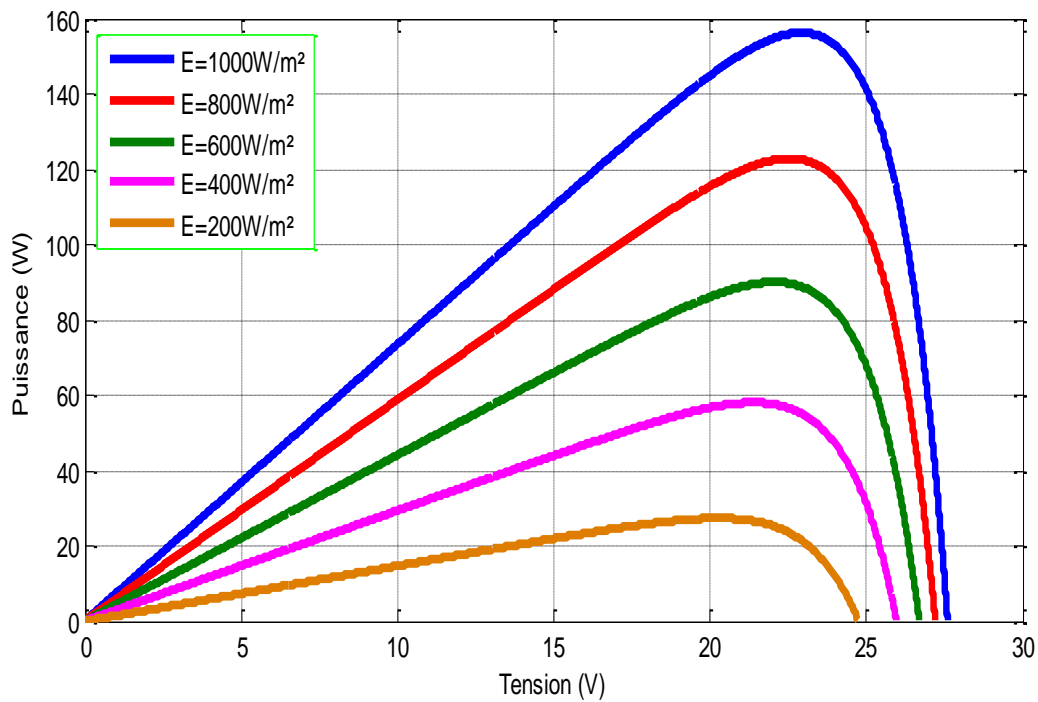


Figure (II.34) : Caractéristique P(V) pour différents niveaux d'éclairement ($T=25^{\circ}C$).

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation mathématique de la cellule et le générateur photovoltaïque, Ensuite Nous avons utilisé le logiciel MATLAB pour étudier dans un premier temps le comportement d'une cellule photovoltaïque puis un générateur photovoltaïque (composé de 46 cellules connectées en série) dans les conditions standard ($G=1000 \text{ W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$). Nous avons étudié aussi l'influence de la température et de l'éclairement sur l'énergie produite par la cellule PV, ainsi l'influence de l'association de cellule (série, parallèle et série / parallèle) sur l'énergie produite.

Enfin, nous avons utilisé l'outil MATLAB-SIMULINK pour simuler le comportement de la cellule et du générateur PV en définissant le point de puissance maximale PPM.

La variation de la puissance maximale dans un GPV doit être étudié afin de chercher le maximum de l'énergie produite ; en utilisant toujours l'environnement de simulation MATLAB-SIMULINK, et cela sera le but du prochain chapitre.

CHAPITRE III

Simulation du Hacheur Commandé par MPPT

III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous avons faire l'étude et la simulation par MATLAB-SIMULINK du convertisseur DC-DC (hacheur) et son commande MPPT pour chercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale.

III.2 Étage d'adaptation entre un Générateur PV et une charge

Un générateur photovoltaïque présente des caractéristiques I-V non linéaires avec un point de puissance maximum MPP. Ces caractéristiques dépendent entre autre du niveau d'éclairement et de la température de la cellule. De plus, selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le GPV débite, nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode connexion directe. Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du générateur photovoltaïque et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge comme présenté dans la figure (III.1).

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

Rôle du convertisseur DC-DC fait fonctionner les modules à leur point de puissance optimale, quelques soient l'éclairement et la charge pour délivrer cette puissance à l'utilisation [36].

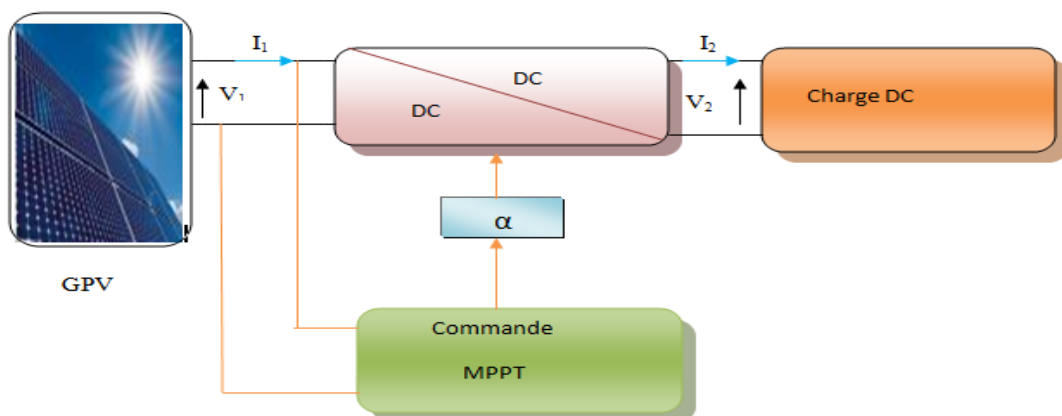


Figure (III.1) : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.

III.3 Convertisseurs DC-DC (Les Hacheurs)

Les hacheurs sont des convertisseurs statiques continu-continu permettant de générer une tension continue variable à partir d'une source de tension fixe. Ils se composent de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance dans le cas idéal, c'est pour cette raison que les hacheurs ont de bons rendements. Généralement le commutateur est un transistor MOSFET qui travaille en mode bloqué-saturé.

Si le commutateur est bloqué, son courant est nul, il ne dissipe donc aucune puissance ; s'il est saturé, la chute de tension à ses bornes sera presque nulle et par conséquent la puissance perdue sera très petite.

Le commutateur du convertisseur est commandé par un signal PWM (Pulse Width Modulation) ou MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion), avec une fréquence de commutation FS fixe et un rapport cyclique α variable [37].

III.3.1 Type de convertisseurs

Il y a un plusieurs topologies des convertisseurs DC-DC. Ils sont classés par catégorie selon que la topologie isolée ou non isolée. Les topologies isolées emploient un transformateur d'isolement fonctionnant à haute fréquence, elles sont très employées souvent dans les alimentations à découpage. Les topologies les plus connues dans la majorité des applications sont le Fly back, en demi-pont et en pont complet. Dans les applications photovoltaïques (PV), les systèmes de couplage avec le réseau électrique emploient souvent ces types de topologies quand l'isolement électrique est préféré pour des raisons de sûreté [38].

Les topologies non isolées ne comportent pas de transformateurs d'isolement. Elles sont généralement utilisées dans l'entraînement des moteurs à courant continu [38]. Ces topologies sont encore classées en trois catégories :

- Abaisseurs (Buck).
- Elévateurs (Boost).
- Elévateurs - Abaisseurs (Buck-Boost).

Dans cette partie nous nous sommes intéressés par le hacheur abaisseur (Buck en anglais).

III.3.2 Hacheur dévolteur « Buck »

Le hacheur dévolteur est un convertisseur statique continu-continu son rôle principale est de convertir sa tension d'entrée en tension de sortie inférieure. Le hacheur se compose des condensateurs, d'inductance, de diode et de commutateur. Tous ces dispositifs dans le cas idéal ne consomment aucune puissance. Généralement le commutateur est un transistor MOSFET ou IGBT qui sont des dispositifs semi-conducteur en mode (bloqué-saturé) [39-40]. La figure(III.2) représente le circuit idéal du hacheur série :

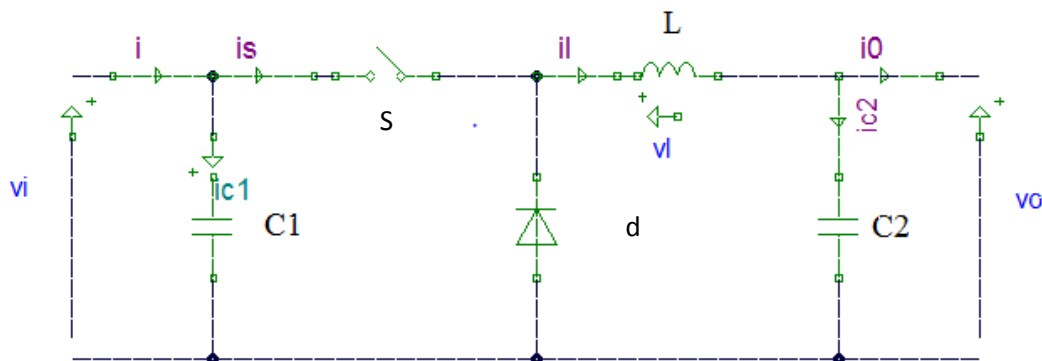


Figure (III.2) : Circuit idéal du hacheur série.

III.3.3 Principe de conversion

III.3.3.1 Fonctionnement

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

T_e : étant la période des impulsions.

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT_e , un courant circule dans le circuit, mais ne passe pas par la diode puisqu'elle est inversement polarisée. L'interrupteur est commandé à la fréquence de découpage $f_e = \frac{1}{T_e}$. La source V_i fournit de l'énergie à la charge et à l'inductance. Pendant le temps t_e $[\alpha T_e, T_e]$ l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre. La tension à ses bornes est donc nulle [41].

III.3.3.2 Modèle mathématique équivalent

Pour savoir le comportement réel nous devons faire la représentation du circuit équivalent par les deux états du commutateur et de tirer par suite le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/sortie. La figure (III.3) montre le schéma du circuit équivalent d'un convertisseur dévolteur avec le commutateur fermé, tandis que la figure (III.4) représente le convertisseur dévolteur avec le commutateur ouvert pendant $(1-\alpha) T_e$ [41].

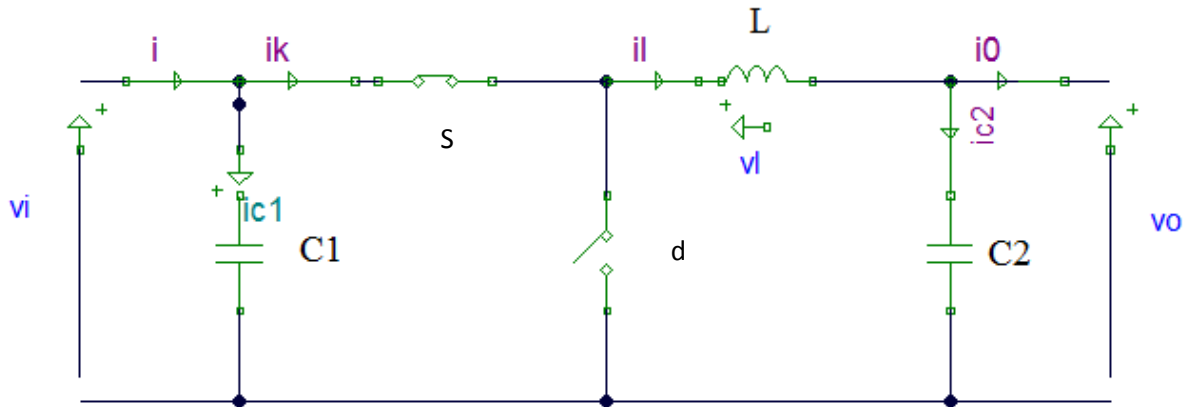


Figure (III.3) : Schéma électrique d'un hacheur Buck fermé.

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

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C \frac{dV_i(t)}{dt} = i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \dots\dots\dots (III.1) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_o(t) \end{cases}$$

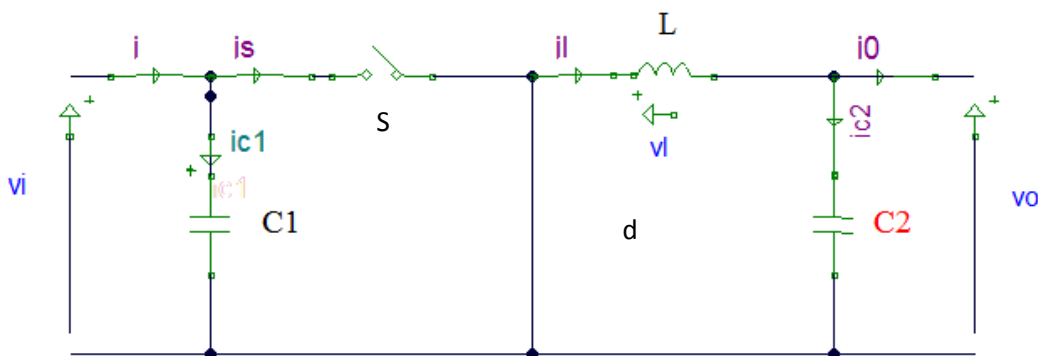


Figure (III.4) : Schéma électrique d'un hacheur Buck ouvert.

Le système d'équations suivantes est déduit de la figure ci-dessus.

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{c1}(t) = C \frac{dV_i(t)}{dt} = i(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \dots\dots\dots (III.2) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = -V_o(t) \end{array} \right.$$

Le système d'équations (III.1) représente les équations de base du hacheur dévolteur.

Les valeurs moyennes de la tension et du courant sont données par :

$$V_{L\text{ moy}} = \langle V_L \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T V_L(t) dt = 0 \dots\dots\dots (III.3)$$

$$I_{c\text{ moy}} = \langle i_c \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T i_c(t) dt = 0 \dots\dots\dots (III.4)$$

III.4 commande MPPT

Un MPPT, (Maximum Power Point Tracking) est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs photovoltaïques ou encore avec les générateurs éoliens [22].

III.4.1 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}) [22].

III.4.2 Classification des commandes MPPT selon le type de recherche

III.4.2.1 MPPT Indirect

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées (I_{sc} ou V_{oc}), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP. Il compte aussi les commandes en se basant sur une estimation du point de fonctionnement du GPV réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable. Il existe aussi des commandes qui établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur [41-42].

Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser. Elles sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis devant fonctionner dans des zones géographiques où il y a peu de changements climatiques.

III.4.2.2 MPPT directs

Ces méthodes utilisent les mesures de tension et de courant des panneaux et dont l'algorithme est basé sur la variation de ces mesures. L'avantage de ces algorithmes est qu'ils ne nécessitent pas une connaissance préalable des caractéristiques des GPV. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de différenciation, la méthode « Perturb & Observe », l'incrément de conductance... [16][8].

III.5 Principe de la technique “Perturb and Observe” (P&O)

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension V_{PV} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{PV} qui en résulte ainsi, comme l'illustre la figure (III.5), on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{PV} engendre un accroissement de la puissance P_{PV} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. À partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P_{PV}(V_{PV})$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié [42].

En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance P_{PV} augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM. La figure (III.6) représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type (P&O), où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension [43].

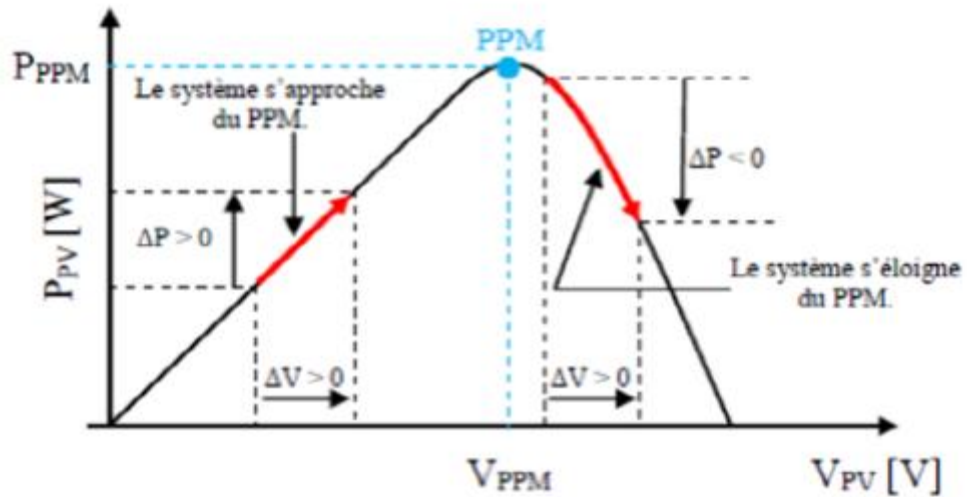


Figure (III.5) : Caractéristique P(V) d'un panneau solaire.

Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du GPV à chaque instant.

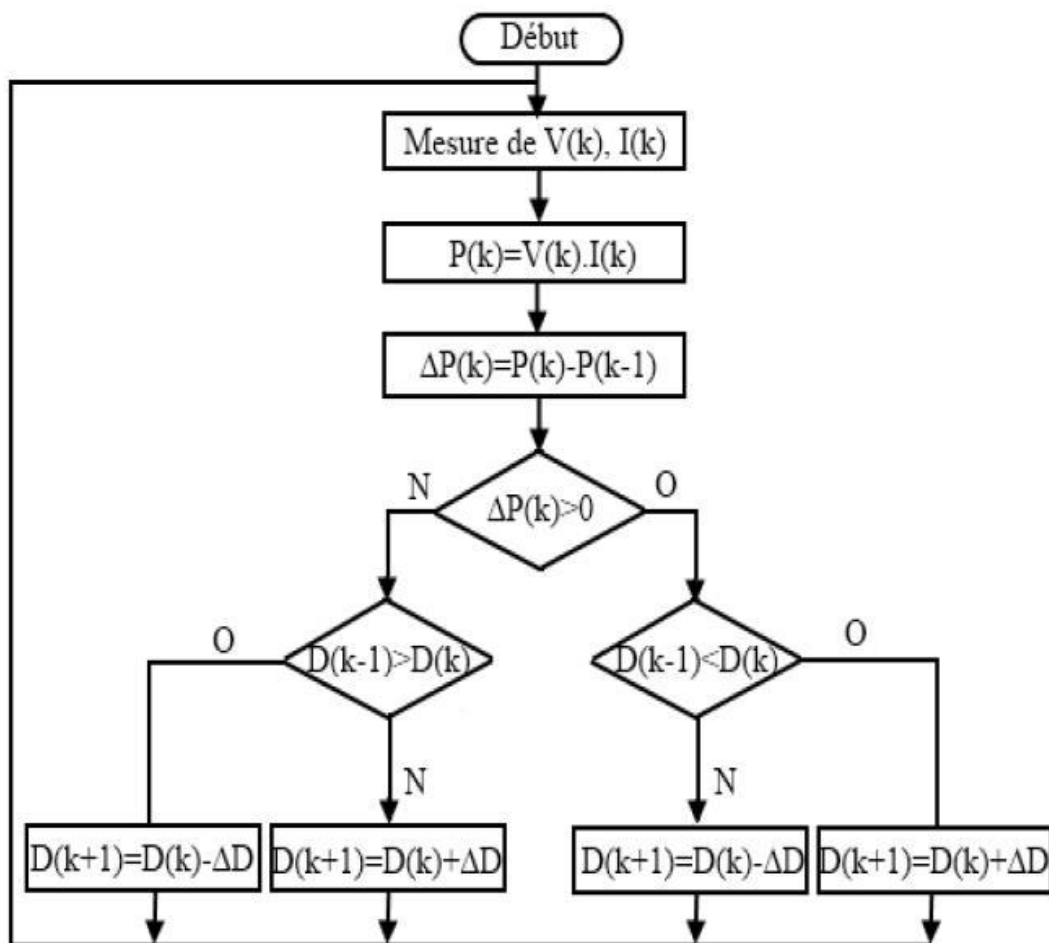


Figure (III.6) : Algorithme MPPT perturbation et observation (P&O).

III.6 Principe du MLI (PWM) [44]

Dans les convertisseurs DC-DC, la tension de sortie doit être régulée pour être constamment égale à une tension de référence, du fait que la tension d'alimentation V et les caractéristiques de la charge peuvent varier.

Une méthode pour réguler la tension de sortie $V_0(t)$ afin d'obtenir une tension moyenne V_{0moy} fixe consiste à ajuster en permanence le rapport cyclique de commande de l'interrupteur $\alpha = \frac{T_{ON}}{T}$ sans modifier T .

Cette méthode qui consiste à faire varier la largeur des impulsions de commande de l'interrupteur est appelée méthode de Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) ou encore PWM (Pulse Width Modulation).

Le signal de contrôle de l'interrupteur S devra être élaboré par comparaison entre le rapport cyclique α et une tension en dents de scie V_{DS} comme suit :

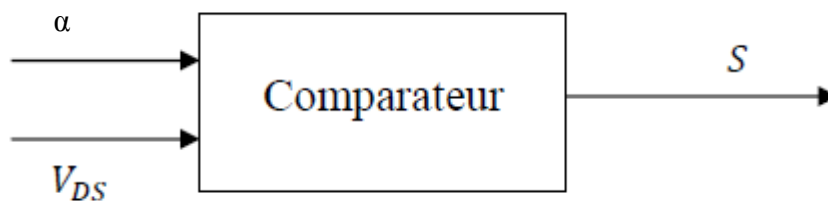


Figure (III.7) : Principe du MLI (DC/DC).

- Lorsque $\alpha > V_{DS}$: $S = 1$, l'interrupteur S est commandé à la fermeture (état ON).
- Lorsque $\alpha < V_{DS}$: $S = 0$, l'interrupteur S est commandé à l'ouverture (état OFF).

III.7 Simulation d'un hacheur série (Buck)

On a utilisé pour L une valeur normalisé de $66 \mu\text{H}$, $R=6 \text{ ohm}$ et $C=75 \mu\text{F}$. dans la fréquence $F = 10\text{KHz}$, et le rapport cyclique $\alpha = 50 \%$. La figure suivante Figure (III.8), (III.9) représente le block d'un hacheur Buck dans Matlab Simulink :

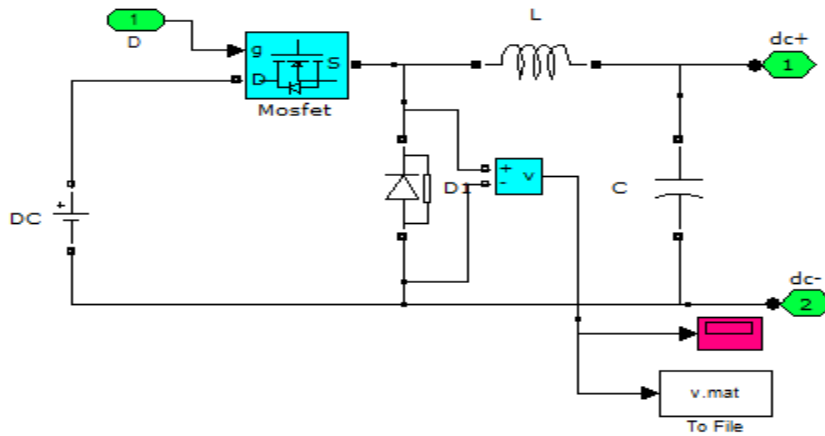


Figure (III.8) : Modèle de simulation du convertisseur série.

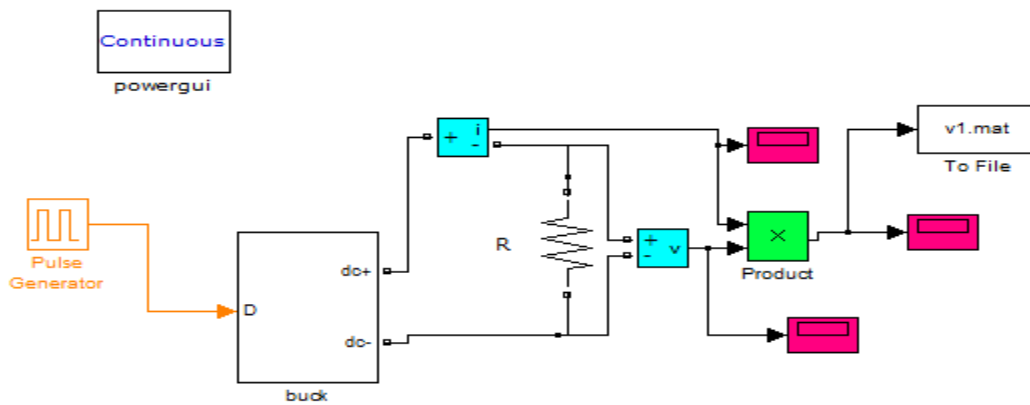


Figure (III.9) : Système permettant la simulation du convertisseur série.

Les figures suivants (III.10), (III.11), (III.12), (III.13) et (III.14) représentent les résultats de la simulation d'un hacheur série :

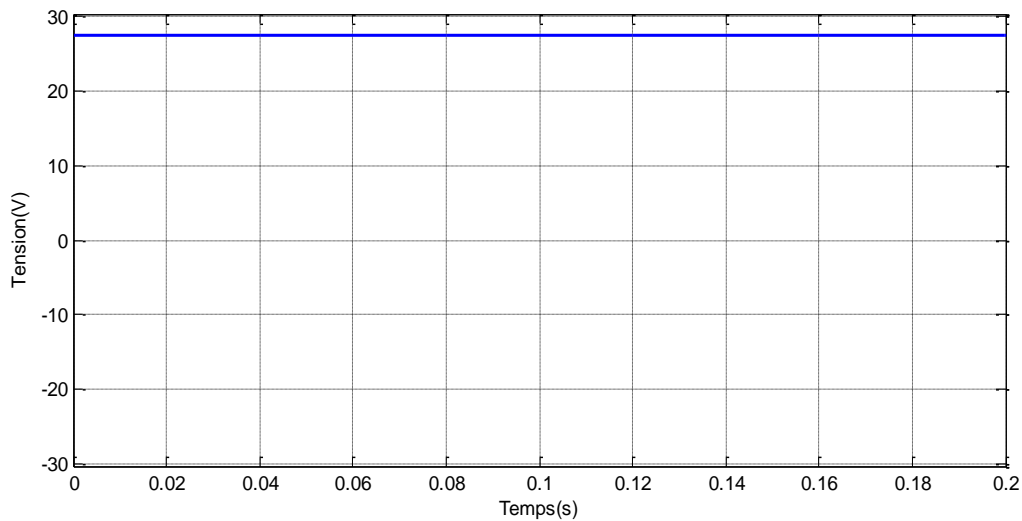


Figure (III.10) : Tension de source.

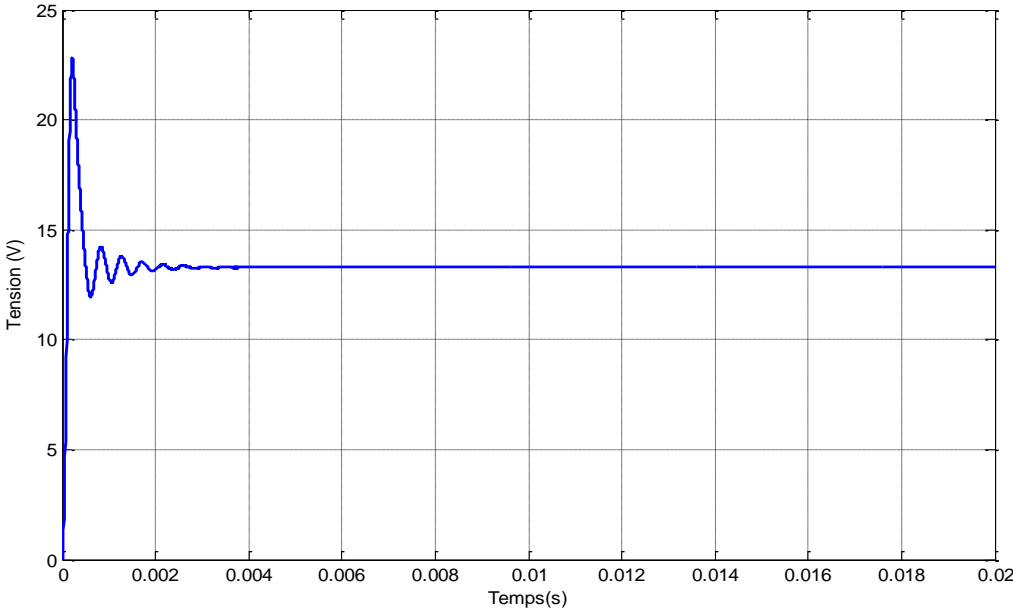


Figure (III.11) : Tension de charge (résistif).

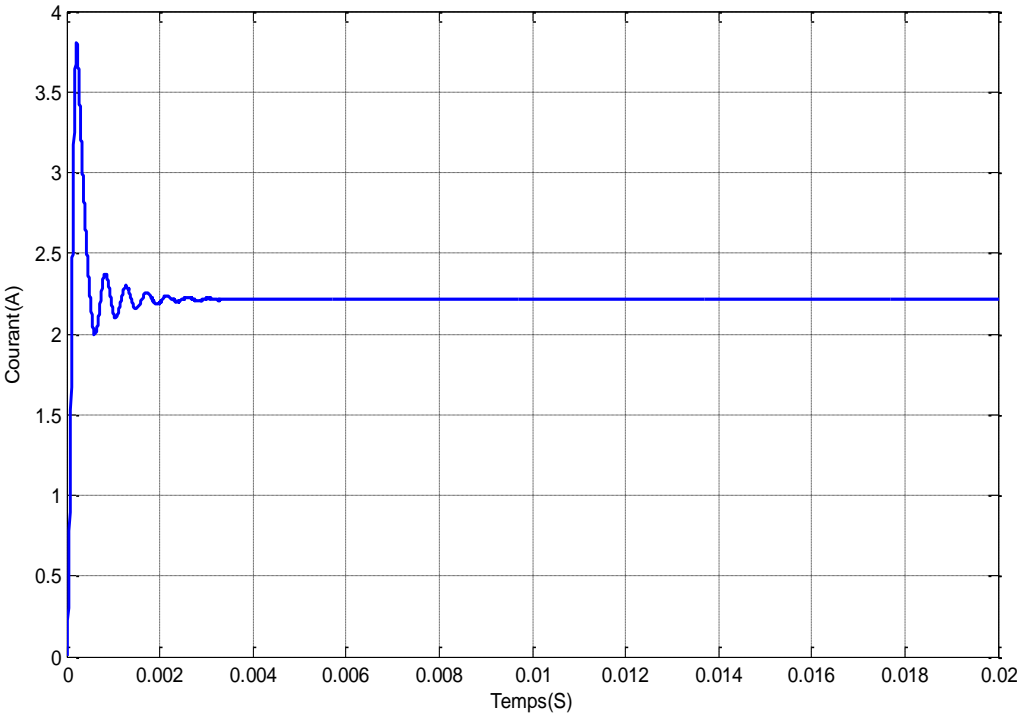


Figure (III.12) : Courant de charge (résistif).

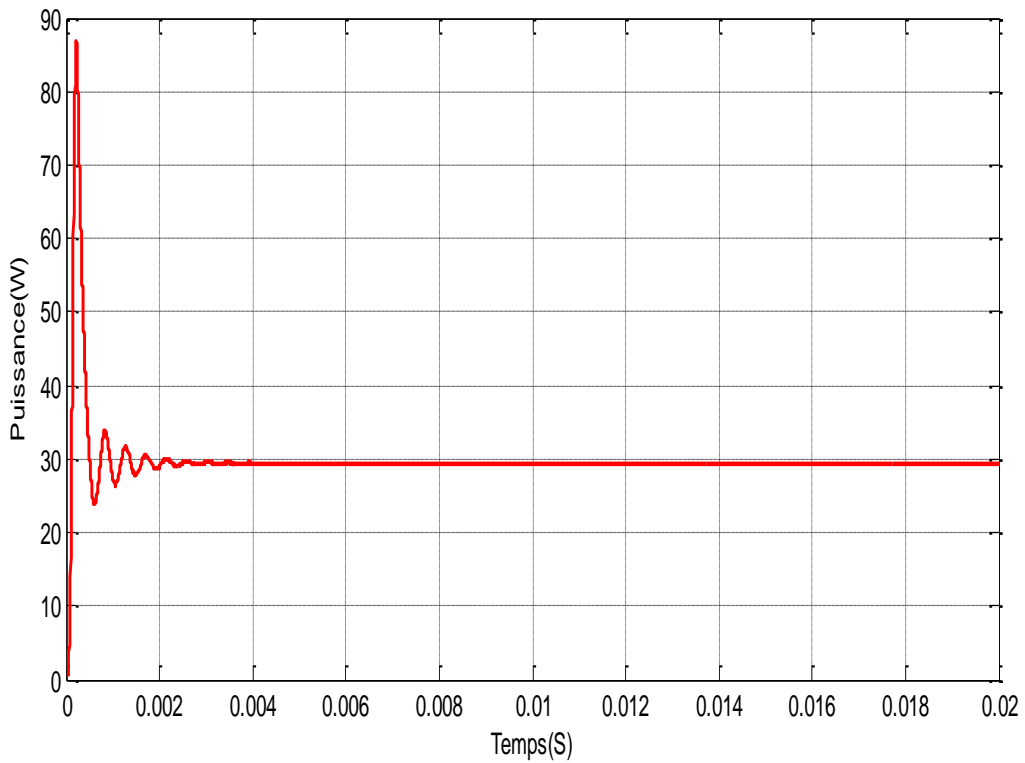


Figure (III.13) : Puissance de charge (résistif).

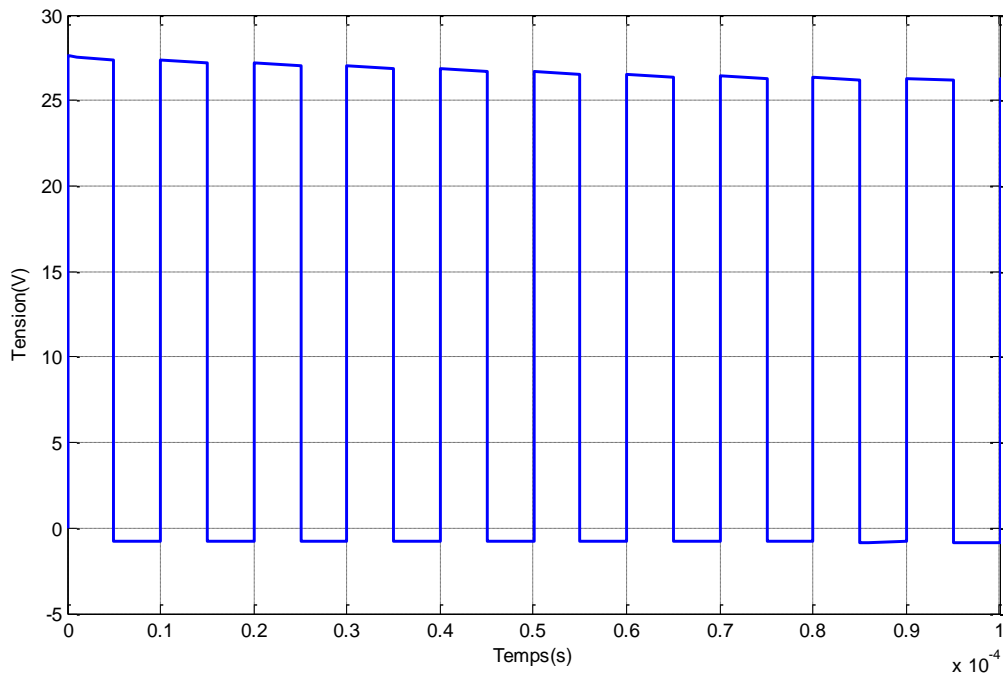


Figure (III.14) : Tension de diode.

- Bloc MPPT

La figure (III.15) représente le block MPPT dans SIMULINK :

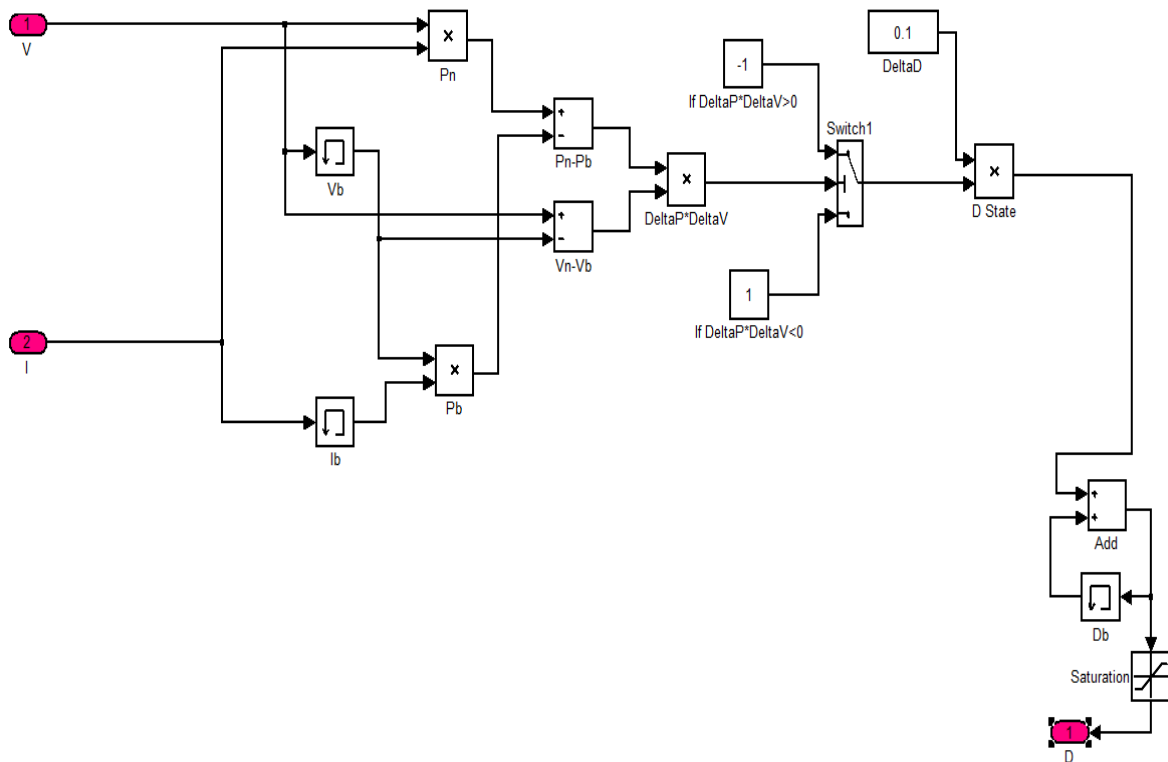


Figure (III.15) : Modèle SIMULINK pour l’algorithme MPPT (P&O).

- Bloc PWM

Le bloc « PWM » génère le signal PWM nécessaire à la commande du commutateur

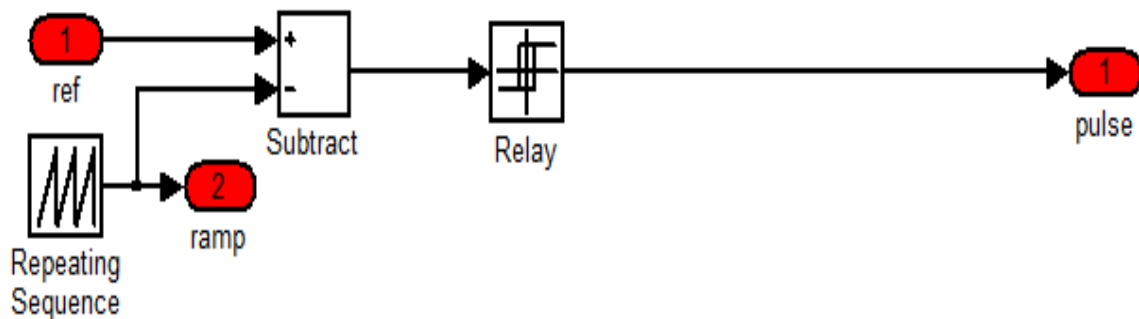


Figure (III.16) : Modèle SIMULINK pour la génération du signal PWM.

III.8 Simulation du schéma global

La figure(III.17) Représente le schéma global d'un système photovoltaïque composé d'un module PV avec un hacheur commandé en MPPT.

Dans cette simulation on a utilisé un GPV et un hacheur série caractérisé comme nous avons cité précédemment, on a utilisé aussi une commande MPPT de type P&O.

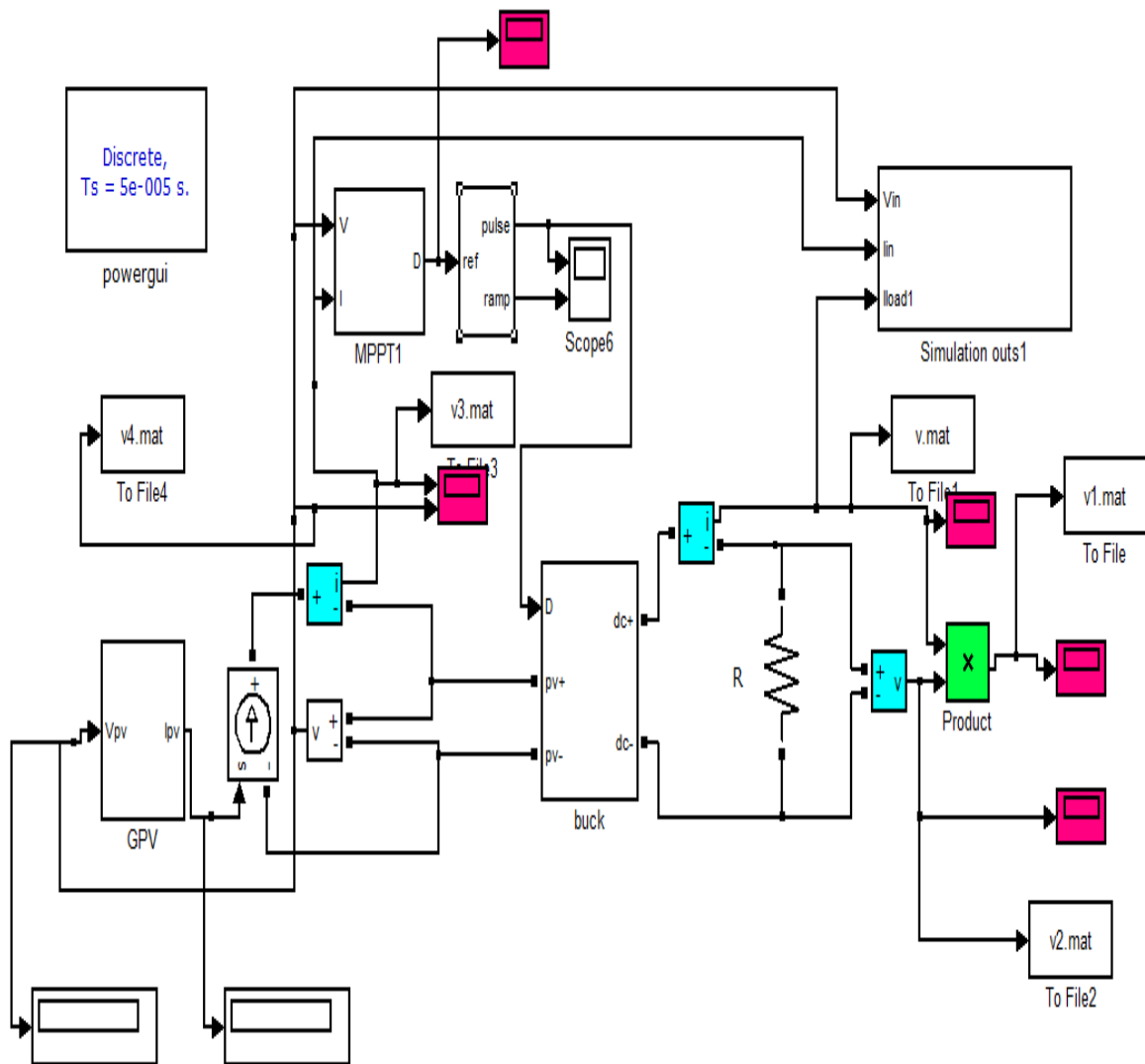


Figure (III.17) : Schéma MATLAB-SIMULINK d'un système photovoltaïque avec une commande MPPT (P&O) et un convertisseur (DC/DC) type Buck.

III.9 résultats de la simulation

Pour un pas de perturbation de 0.1 dans les conditions standard ($T = 25\text{ °C}$ et $E = 1000\text{W/m}^2$) :

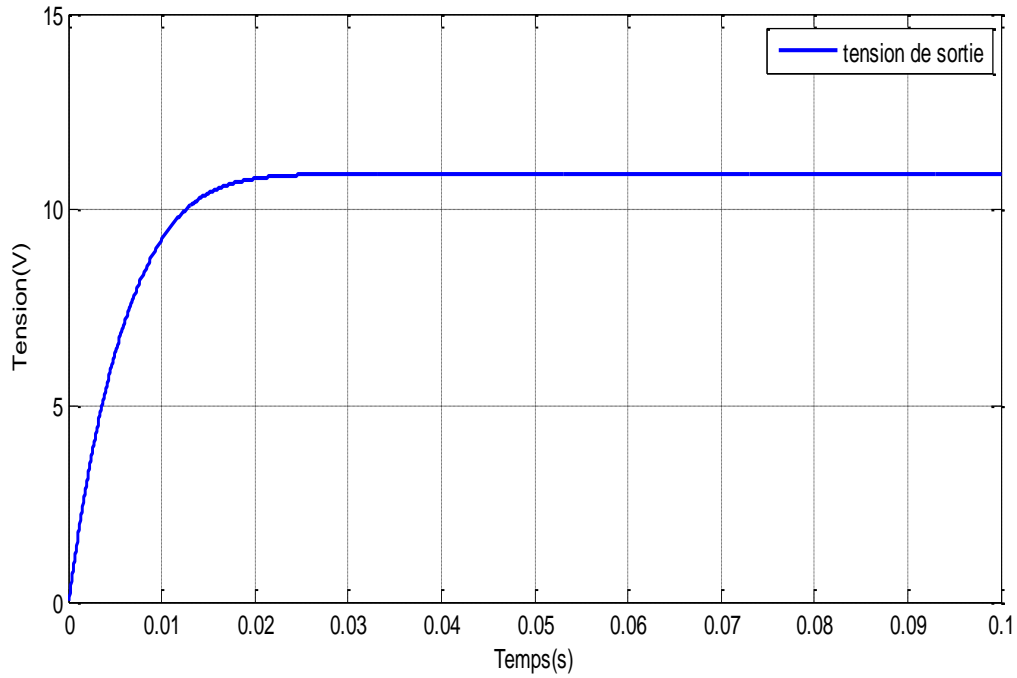
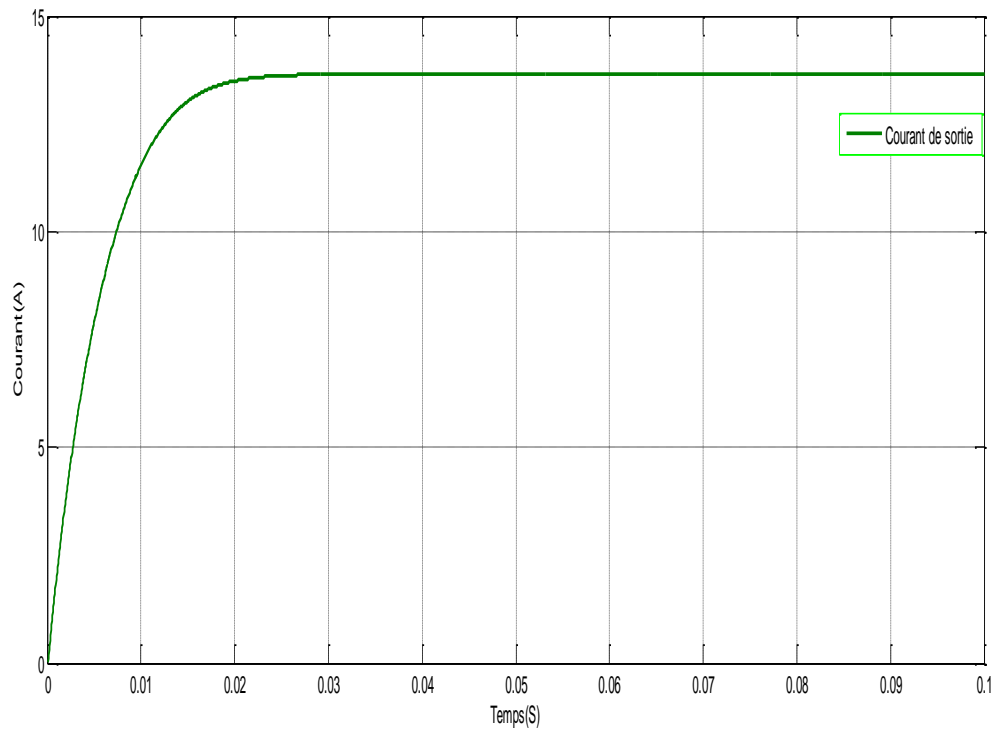


Figure (III.18) : Tension de sortie pour un pas 0.1.



Figure(III.19) : Courant de sortie pour un pas 0.1.

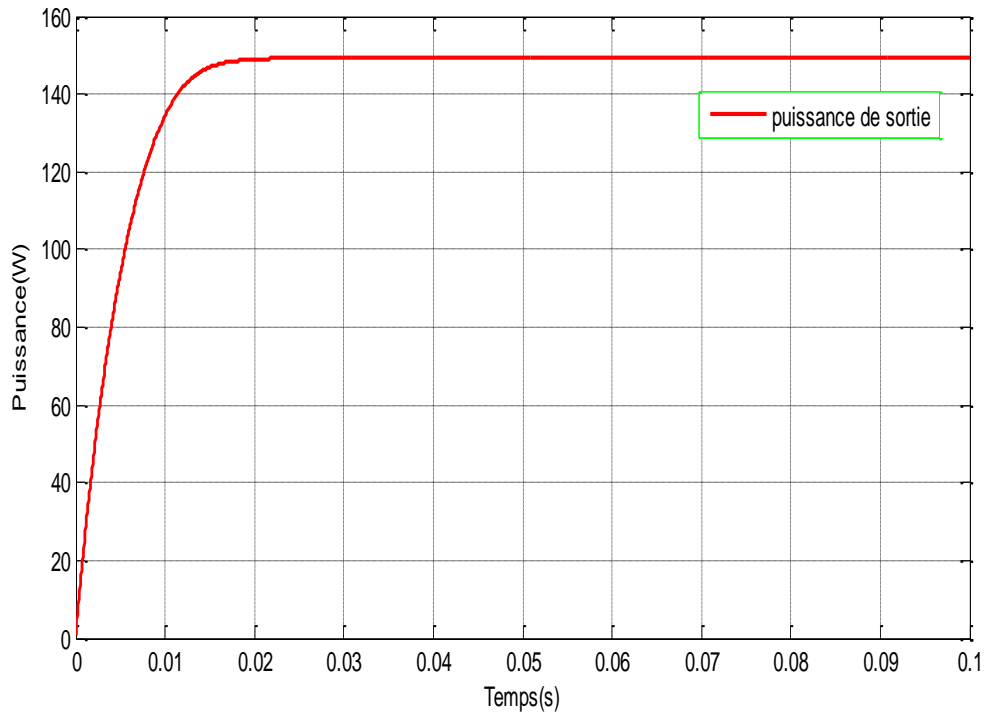


Figure (III.20) : Puissance de sortie pour un pas 0.1.

III.10 Effet de changement d'éclairement et le pas de perturbation sur la puissance du sortie à la température fixe ($T=25^{\circ}\text{C}$)

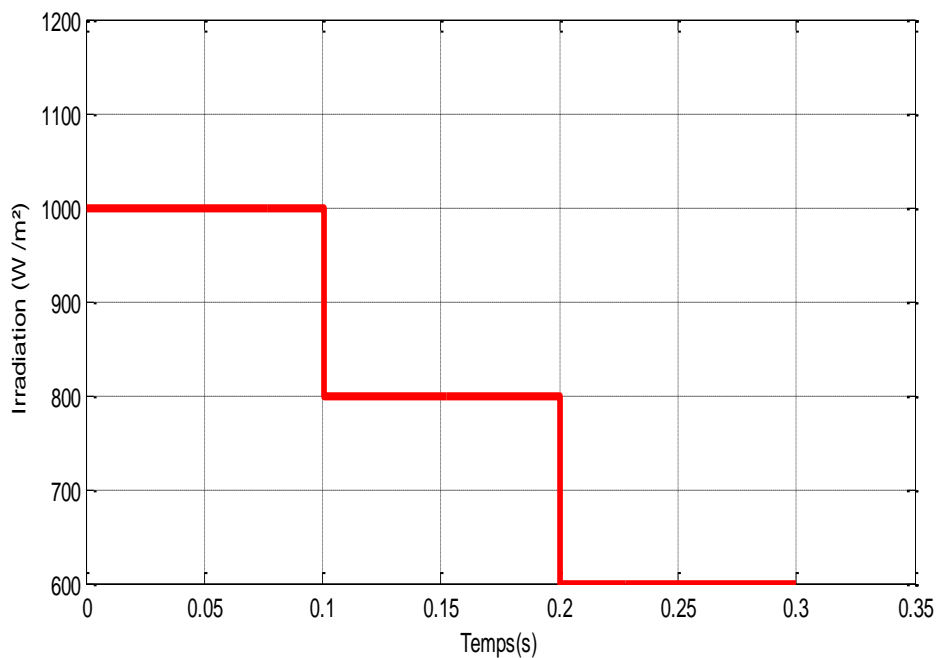


Figure (III.21) : Variation de l'irradiation (W/m²).

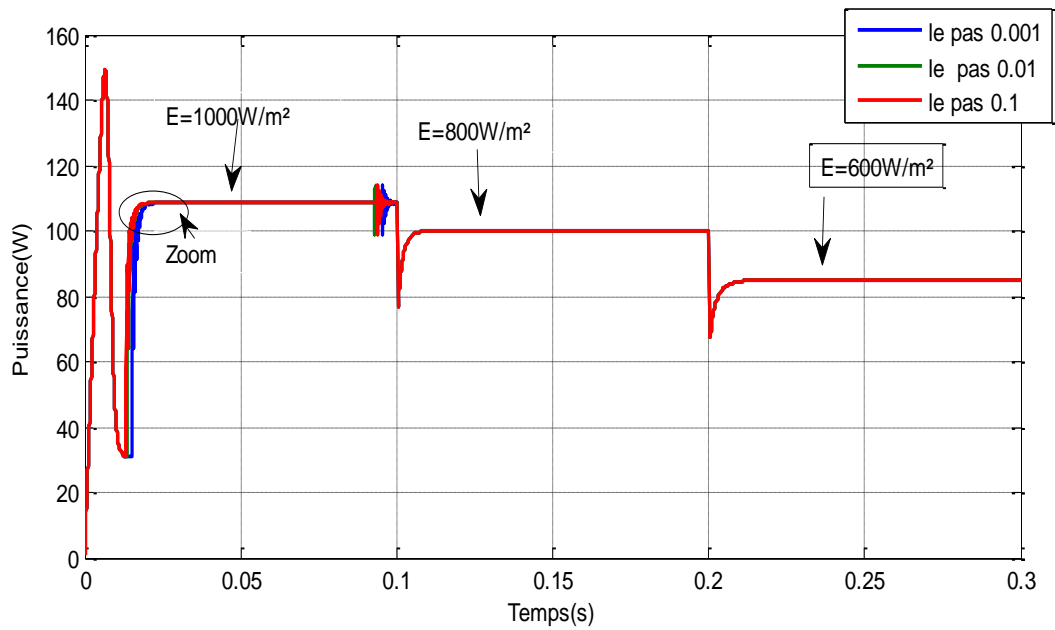


Figure (III.22) : Effet de changement d'éclairement et le pas de perturbation sur la puissance.

- Zoom

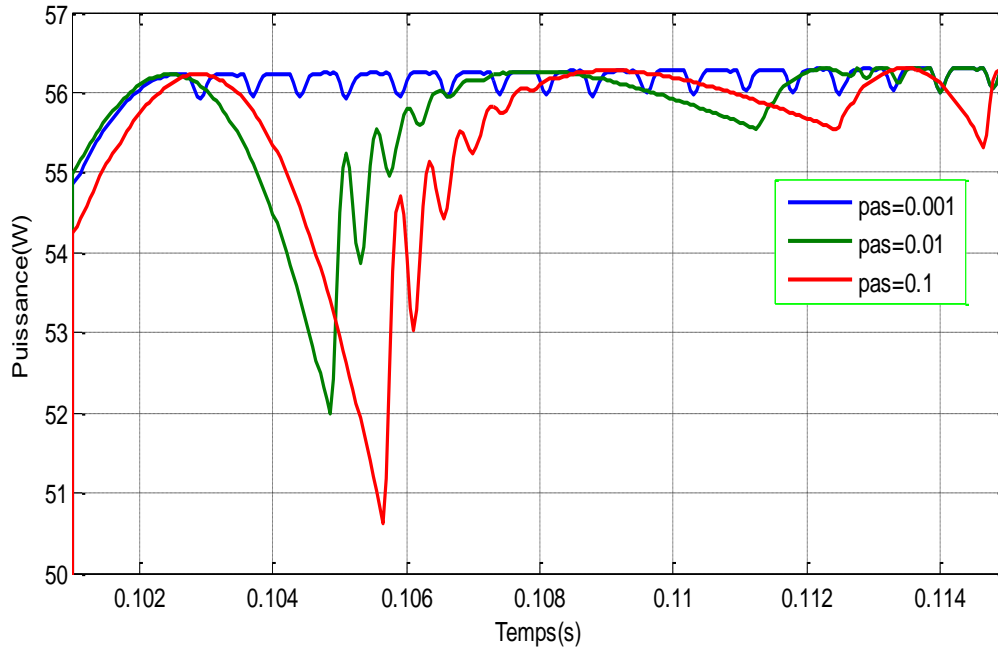


Figure (III.23) : zoom de l'effet de changement d'éclairement et le pas de perturbation sur la puissance.

III.11 Discussions des résultats de la simulation

Les figures (III.18), (III.19) et (III.20) représentent la tension, le courant et la puissance de sortie respectivement pour un pas de perturbation de 0.1.

Ces résultats montrent que le hacheur série et la commande MPPT « perturbation et observation » effectuent correctement leurs rôles.

Le hacheur série fournit une tension à sa sortie inférieure à celle fournie par le générateur photovoltaïque et la commande MPPT adapte le générateur PV à la charge :

Dans la figure (III.22), nous avons soumis le système à une variation de l'éclairement (600, 800, 1000) W/m² et on a relevé les résultats pour un pas variable (0.1, 0.01, 0.001), on voit clairement que la puissance réagit correctement avec la variation de l'éclairement pour se stabiliser au point de puissance max par la commande MPPT et on remarque que on atteint le point de fonctionnement MPP plus rapide dans le cas où le pas égale 0.1, puis 0.01 et en fin 0.001, mais par contre l'amplitude de l'oscillation autour du point max varie inversement proportionnel au pas. Donc la perte de puissance est réduite. Maintenant si on parle sur la précision de la réponse, on remarque que la réponse est plus précise dans le cas où le pas égale 0.001.

III.12 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le fonctionnement du hacheur série DC-DC (Buck) et la commande MPPT, Le convertisseur Buck et l'algorithme (Perturb & Observe) sont simulés en utilisant la boîte outil Sim Power System du Matlab/Simulink Version 2009. D'après les résultats obtenus, on remarque que le convertisseur DC-DC (Buck) et la commande MPPT effectuent correctement ses rôles d'atteindre le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale, sous différentes conditions de fonctionnement.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans notre projet l'étude est basée sur l'analyse d'une modélisation et simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque (PV) adapté par une commande numérique (commande MPPT) assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

Au premier lieu nous avons vu des notions sur l'énergie solaire, le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque au silicium ainsi que le générateur (GPV), nous avons abordé aussi les différents groupements possibles des cellules et défini son rendement et le Facteur de forme.

Ensuite, nous avons présenté la modélisation mathématique de la cellule et le générateur photovoltaïque, Nous avons utilisé le logiciel MATLAB pour étudier dans un premier temps le comportement d'une cellule photovoltaïque puis un générateur photovoltaïque (composé de 46 cellules connectées en série) dans les conditions standard ($G=1000 \text{ W/m}^2$ $T=25^\circ\text{C}$). Nous avons étudié aussi l'influence de la température et de l'éclairement sur l'énergie produite par la cellule PV, ainsi l'influence de l'association de cellule (série, parallèle et série / parallèle) sur l'énergie produite.

Finalement, nous avons présenté le fonctionnement du hacheur DC-DC (Buck) et la commande MPPT, et faire la simulation du hacheur Buck.

Les principaux éléments auxquels ce travail a abouti sont :

- Le courant délivré par le GPV est directement proportionnel à l'ensoleillement par contre la tension aux bornes du GPV est relativement peu dégradée par l'accroissement de celui-ci.
- L'augmentation de la température conduit à une diminution nette de la tension de circuit ouvert, à une légère augmentation du courant de court-circuit, et à une diminution de la puissance maximale.
- Pour profiter de la puissance maximale délivrée par un panneau solaire, l'utilisation d'un étage d'adaptation entre ce panneau et la charge est nécessaire.

Pour une éventuelle continuité du présent travail, il est possible d'énumérer quelques perspectives comme suite de cette étude dont on peut citer :

- Exploitation de nouveaux algorithmes MPPT ;
- Introduction d'autres types de convertisseurs DC/DC ;

Bibliographique

- [1] HANANOU.F, ROUABAH.A, «Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque», MASTER ACADEMIQUE, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 09 /06/2014
- [2] Boukli .h, «Conception et Réalisation d'un Générateur photovoltaïque Muni d'un convertisseur MPPT pour une Meilleure Gestion Energétique», THESE DE MAGISTER, Université Abou-Baker Blkaid-Tlemcen 2010/2011.
- [3] Touil.N, Ghenbazi.S, «Modélisation et Simulation d'un Systèm Photovoltaïque », MASTER ACADEMIQUE, Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued Septembre 2015.
- [4] FERRAIA.A, « Dimensionnement des Infrastructures Utilisant Diverses Sources Énergétiques Renouvelables Potentielles pour l'Alimentation Electrique d'un Village» Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2008.
- [5] DERBAL. M, DEBBAH. N « Étude et Commande d'un Système Hybride Eolien Photovoltaïque Connecté au Réseau avec Stockage. Contribution à l'Amélioration de la Qualité de l'Énergie.», Mémoire du projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme D'Ingénieur d'Etat en Électrotechnique, École Nationale Polytechnique d'Alger Juin 2013.
- [6] www.energies-renouvelables.org
- [7] Tsuda. I, Kurokawa. K, Nozaki.K, «Annual simulation results of photovoltaic system with redox flow battery », solar Energy Materials and solar cells 35, pp 503 –508, 1994.
- [8] ZEGGAOUI.S, « Stockage de l'énergie Solaire », Master en Electronique, Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Hacen Badi, El-Harrach, Alger, Algérie.2013.
- [9] M.N.Mchalikh, CH.Hmada, «Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau », Mémoire de Master Université Kasdi Merbah–Ouargla 2013.
- [10] Zerga .A, Benyarou. F. et B. Benyousef : « Optimisation du rendement d'une cellule solaire NP au silicium monocristallin », Rev. Energ. Ren : physique Energétique (1998pp.95-100).
- [11] « Technologies and comparions », Energy Storage Association, [http : //electricitystorage.org/](http://electricitystorage.org/), 2007.

- [12] BELAOUDMOU. O, BAHLOUL. A, «Etude et Commande d'un Système Hybride Eolien-Photovoltaïque Connecté au Réseau», diplôme de Master en Automatique, Ecole Nationale Polytechnique, Juin 2012
- [13] P. Rueda, E. Fernandez, "Multi junction Ga/As Solar Cell Capacitance and its impact upon Solar Array Regulators", 6th European Space Power Conference, Porto, Portugal, 6-10 May 2002, pp. 29-34, 2002.
- [14] ADOUANE .M, «Etude et conception d'une stratégie de commande d'un onduleur connecté au réseau électrique», Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Hassan Badi, El-Harrach, ALGER, 2008.
- [15] SAADI.S, « Effet Des Paramètres Opérationnels Sur Les Performances D'un Capteur Solaire Plan » Thèse de Magistère en physique, Université Mentouri De Constantine – 2010
- [16] Antonio Luque and Steven Hegedus,"Handbook of Photovoltaic Science and Engineering", John Wiley & Sons Ltd, 2003
- [17] F. Kininger, "Photovoltaic Systems Technology", University of Kassel, 2003
- [18] Cédric Cabal, « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque », Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, Décembre 2008.
- [19] BISKER. A, CHIRI .M, « Commande d'un Système Photovoltaïque en mode Isolé et en mode Connecté au Réseau», Projet de fin d'études En vue de l'obtention du diplôme D'Ingénieur d'État en Électrotechnique, École Nationale Polytechnique, Juin 2012
- [20] B. Robyns, P. Bastard, "Production décentralisée d'électricité : contexte et enjeux techniques", La revue 3EI n°39, Décembre 2004.
- [21] BELAKEHAL. S, «Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables», THÈSE Doctorat, UNIVERSITE DE CONSTANTINE, 10/06/ 2010.
- [22] Home Energy, «Etude comparative de panneaux solaires photovoltaïques», Rapport de stage de fin de D.U.T. Mesures Physiques, Université Paris VII 2, place Jussieu 75005 PARIS, Mai 2006/Juillet 2006
- [23] SLAMA, F, «Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques Interconnectés au réseau électrique », Mémoire de Magister, UNIVERSITE FERHAT ABBAS -SETIFUFAS (ALGERIE) ,01/04/2011.
- [24] O.BENSEDDIK et F.DJALOUUD '' Etude et optimisation du fonctionnement d'un Système photovoltaïque ''Mémoire de Master Université Kasdi Merbah-Ouargla 27/06/2012.
- [25] MERAHL.R, «MODELISATION D'UN DIPOSITIF MPPT POUR L'ETUDE DE L'AUGMENTATION DE LA PUISSANCE PRODUITE PAR LES GENERATEUR PHOTOVOLTAIQUES» Mémoire de Magister, BADJI MOKHTAR ,2010.

- [26] AOUIFI .S, «Modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque», Mémoire Magister, UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF-1 UFAS (ALGERIE), 2014
- [27] Bouguerra.T, «Optimisation d'un système photovoltaïque : Application en continu et en alternatif», Mémoire Magister, UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE 1, 30/06/2014.
- [28] Makhlouf .M «Etude et optimisation d'un modèle de conversion d'énergie photovoltaïque application», thèse de doctorat, Université de Constantine, 2012.
- [29] Saidani.A, « Amélioration de la technique d'extraction de maximum de puissance du système photovoltaïque basé sur la méthode (P&O) », mémoire de master, Université de M'sila 2015.
- [30] Chekired.F, « Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA», mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2008.
- [31] Helali.K, «Modélisation d'une cellule photovoltaïque : Etude Comparative», Mémoire Magister, Université Mouloud de Tizi-Ouzou, 25/06/2012.
- [32] A. Bouharchouche, A. Bouabdallah, « Étude et dimensionnement d'une centrale hybride photovoltaïque-éolienne », Projet de fin d'études, ENP, 2010.
- [33] Dariga MEEKHUN, « Réalisation d'un système de conversion et de gestion de l'énergie d'un système photovoltaïque pour l'alimentation des réseaux de capteurs sans fil autonomes pour l'application aéronautique », Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2011.
- [34] N. Pandiarajan, R. Ramaprabha, Ranganath Muthu, « Application of circuit model for photovoltaic energy conversion system», International Journal of Photo energy, India, 2011.2016.
- [35] Chovet A, Masson P. « Physique des Semi-Conducteurs » Ecole Polytechnique Universitaire de Marseille - 2004/2005.
- [36] A. Lyes, «Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque », UNIVERSITE MOULOU MAMMERI DE TIZI OUZOU Mémoire de Magister, 2011.
- [37] NECHE .K, « Aide à la mise au point d'un banc de test photovoltaïque », Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Hassen Badi, El-Harrach, ALGER.
- [38] A. Oi, « Design and simulation of photovoltaïque water pumping système », These de Magister de l'université California, USA, Septembre 2005.
- [39] ARCHES Raphaël, CHERON Yvon, ESCAUT Bernard, Equipe de recherche des Convertisseurs Statiques du LEEI « Convertisseurs continu-continu non isolés » Institut Nationale Polytechnique de Toulouse.
- [40] Michel Pinard « Commande électronique des moteurs », ISBN 210 00 5326 4 dunod, Paris 2004, (www.dunod.com).

- [41] Minwon Park, In-Keun Yu, Member IEEE, "A Study on the Optimal Voltage for MPPT obtained by Surface Temperature of Solar Cell ", Changwon National University, 2000.
- [42] Sahraoui.A.N, «étude d'une chaîne de convertisseur photovoltaïque», Mémoire de magistère Université de Msila, 2010.
- [43] Walker, Geoff R « Evaluating MPPT converter topologies using a MATLAB PV Model », Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC '00, Brisbane. 2000.
- [44] DJERIOU.S, «Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone», MAGISTER, Soutenu le 03/07/ 2011.

Résumé

La connexion entre un générateur photovoltaïque (GPV) et une charge de type continu reste encore un sujet d'étude. L'adaptation d'impédance entre un générateur PV et une charge de type continu est un problème technologique que signifie essentiellement le transfert du maximum de puissance du générateur PV à la charge. Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude de la chaîne de conversion photovoltaïque.

L'étude et la simulation des éléments de cette chaîne ont montré que l'élément principal de la chaîne, le générateur photovoltaïque GPV, ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières du courant et de la tension. Ainsi, afin de poursuivre le point de puissance maximale, l'insertion d'un étage d'adaptation, entre le GPV et la charge est nécessaire. Cet étage a été réalisé dans notre cas en utilisant un convertisseur DC/DC Buck et l'algorithme MPPT (P&O).

Mots clés : Simulation. Convertisseur DC/DC. Algorithme MPPT (P&O), Générateur photovoltaïque (GPV), Eclairage.

Abstract

The connection between a photovoltaic generator (GPV) and a continuous type load is still a subject of study. The impedance matching between a PV generator and a DC load is a technological problem that essentially means transferring the maximum power from the PV generator to the load. The work presented in this thesis concerns the study of the photovoltaic conversion chain.

The study and the simulation of the elements of this chain showed that the main element of the chain, the photovoltaic generator GPV, can deliver a maximum power only for particular values of the current and the voltage. Thus, in order to find the point of maximum power, the insertion of an adaptation stage between the GPV and the load is necessary. This stage was realized in our case using a Buck DC / DC converter and the MPPT (P & O) algorithm.

Keywords

Simulation. DC / DC converter. MPPT algorithm (P & O), Photovoltaic generator (GPV), Irradiance.

ملخص

تعتبر الطاقة من أهم العناصر الأساسية والضرورية للحياة، نظرا للتزايد المستمر في الطلب على الطاقة أصبح من الضروري البحث عن مصادر بديلة لإنتاج الطاقة وذلك عن طريق استغلال الطاقات المتجددة ومن أهم المصادر استعمالا للطاقة الشمسية لما لها من مميزات كثيرة.

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

الكلمات المفتاحية: النظام الكهروضوئي، المحول الخافض(DC/DC)، الية التحكم (MPPT (P & O)، مولد(GPV)، اشعاع.