

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة البليدة 1
Université de BLIDA1

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Projet de Fin d'Études

présenté par

CHAIB SETTI AHMED

&

BOUTELDJA ABD ELKADER

pour l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique option : Machines Electrique

Thème

Analyse du comportement dynamique d'un système photovoltaïque face aux variations climatiques

Proposé par : M cheggaga nawel

Année Universitaire 2014-2015

DEDICACE

Je dédie ce modeste mémoire :

A mes parents, qui ont toujours cru en moi et qui m'ont accompagné moralement tout au long de ce parcours. L'éducation, soin et conseils qu'ils m'ont prodigués, m'ont toujours guidé pour faire les bons choix dans ma vie. Sans la grâce d'Allah ainsi que leurs soutiens, encouragements et prières, rien n'aurait été possible.

A mes frères, omar, amin, seufiane, akram

A ma sœur moufida.

A toute ma famille "chaïb setti".

A mes oncles.

A mes enseignants.

A mes amis, et plus particulièrement ; Hamza, hakim , Ahmed, tarek sif eddine et Abdelkader.

A mes camarades de classe.

A toutes les personnes qui m'ont aidé durant le Parcours de ma formation.

Chaïb setti ahmed



DEDICACE

Je dédie ce modeste mémoire :

A mes parents, Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

Mon père, qui peut être fier et de trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Allah faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.

A mon frère, Balkacem.

A mes sœurs : Hakima, Samira, Razika

A toute ma famille "BOUTELDJA".

A mes oncles.

A mes enseignants.

A mes amis, et plus particulièrement : Ahmed, Hakim, Mohamed, Hamza, Tarek, Sif eddine

Et Abd elhak.

A mes camarades de classe.

*A toutes les personnes qui m'ont aidé
durant le parcours de ma formation.*

*Bouteldja
Abd elkader*



Remerciement

Je tiens à louer tout d'abord mon Dieu « الحمد لله رب العالمين ».

*Nous remercions très sincèrement Madame **N.Cheggaga**, sans elle ce travail ne serait jamais achevé, nous lui souhaitons du succès dans ses recherches ainsi que dans sa vie professionnelle*

*Nous remercions vivement **M.Belmili***

Pour l'aide précieuse qu'ils nous ont apportée, leur disponibilité et

Surtout leur grande qualité humaine.

Nous tenons à remercier les membres du jury qui nous ont fait l'honneur de participer à l'examen de ce travail

*Nous remercions en particulier **M.Belazog** et **M.Messoum**, et Madame*

Elmerraoui.

Enfin, nos remerciements vont à tous ceux qui portent de l'estime pour nous et qui nous ont soutenus d'une manière ou d'une autre pour l'élaboration de ce travail.

Résumé :

La puissance produite par un module photovoltaïque est influencée par l'intensité de l'irradiation solaire et la température des cellules. Dans ce travail, nous nous sommes intéressées à la modélisation des différents constituants de la chaîne photovoltaïque comportant, le panneau PV, le hacheur Buck-Boost, contrôleur MPPT et système de stockage, afin d'estimer la dégradation des performances électriques pour un système photovoltaïque en se basant sur l'influence des différentes paramètres externes et internes.

Mots clés : modélisation, MPPT, photovoltaïque, vieillissement.

ملخص:

إن الطاقة المستمدة من اللوح الشمسي تتأثر بعدة عوامل منها شدة الحرارة، و الإنارة الشمسية. في إطار هذا العمل اهتمنا بدراسة مختلف نماذج مكونات النظام الكهروضوئي التي تشمل : اللوح الكهروضوئي، محول التيار المستمر، مراقب، و نظام التخزين، و قمنا بتقدير درجة تضرر الأداء الكهربائي لوحدة كهر وضوئية بالتركيز على مختلف العوامل الخارجية و الداخلية .

الكلمات المفتاحية التصميم، الكهروضوئي، الأقدمية. MPPT.

Abstract:

The output power induced by the photovoltaic modules is influenced by the intensity of solar cell radiation, temperature of the solar cells and moreover by the load. In this work, we are interested by modeling the different components of the photovoltaic chain, which includes the PV panel, the buck-boost converter, controller (MPPT) and the energy storage system, to estimate the degradation of the electrical performance for a photovoltaic module based on the influence of different parameter internal and external.

Key Word: modeling, MPPT, photovoltaic , aging.

Nomenclatures

I_{ph}	courant produit par la photopile	A
E	flux lumineux	Wb
V_g	Tension de seuil de diode	V
R_s	résistance série	Ω
R_p	résistance en dérivation ou shunt	Ω
T	température de la cellule	K ⁰
I_{CC}	courant de court-circuit	A
FF	facteur de courbe ou de forme	-
P_{pv}	puissance de sortie du générateur photovoltaïque	W
I_{ph}	photo courant	A
I_0	courant de saturation	A
Q	charge de l'électron	E
K	constante de Boltzmann	J/K
n	facteur d'idéalité relatif au module	-
V_{pv}	Tension de sortie du générateur photovoltaïque	V
P_{ppm}	puissance maximale	W
V_{co}	la tension du circuit ouvert	V
I_{pv}	Courant de sortie du générateur photovoltaïque	A
N_p	Nombre des modules en parallèles	-
N_s	Nombre des modules en série	-
V_s	Tension de sortie de l'hacheur	V
α	Rapport cyclique de l'hacheur	-

Table des matières

REMERCIEMENT

DIDECACE

RESUME

LISTE DES ACRONYSMES ET ABREVIATIONS

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

SOMMAIRE :

Introduction générale.....(1)

CHAPITRE 01 : Généralité sur le générateur photovoltaïque.....

1.1 Introduction.....(3)

1.2 Généralités sur les cellules photovoltaïques.....(3)

1.2.1 Rappel sur les semi-conducteurs.....(3)

1.2.2 L'effet photovoltaïque et la jonction PN.....(3)

1.2.3 La cellule photovoltaïque.....(4)

1.2.4 Les différents types de cellules solaires.....(5).

1.2.5 Modèles de la cellule photovoltaïque.....(5)

1.2.6 Paramètres externes d'une cellule photovoltaïque.....(9)

1.3- Les modules photovoltaïques.....(10)

1.4 -Les générateurs PV..... (10)

1.5 Influence de la température sur les courbes $I(V)$, $P(V)$(11)

1.6. Influence de l'ensoleillement sur les courbes $I(V)$, $P(V)$(12)

1.7 Protections d'un GPV.....(12)

1.7.1 Diode anti-retour..... (13)

1.7.2 Diode by-pass..... (13)

1.8 Quelques avantages et inconvénients de l'énergie PV.....(14)

a) Les avantages.....(14)

b) Les inconvénients.....(14)

1.9 Conclusion.....(16)

CHAPITRE 02 Modélisation et simulation du système photovoltaïque.....

2.1	Introduction.....	(17)
2.2	Modélisation et simulation du système photovoltaïque.....	(17)
2.3	Modèle Simulink du GPV.....	(18)
2.3.1	Simulation du GPV dans les conditions standards.....	(19)
2.3.2	Influence de l'éclairement sur les caractéristiques $I=f(V)$ et $P=f(V)$	(20)
2.3.3	Influence de la température sur les caractéristiques $I=f(V)$ et $P=f(V)$	(21)
2.4	Le régulateur photovoltaïque.....	(23)
2.4.1	Principe de fonctionnement de MPPT.....	(23)
2.4.2	La méthode Perturbe & Observe (P&O).....	(24)
2.4.3	Modélisation du contrôleur MPPT.....	(26)
2.5	Convertisseurs DC/DC.....	(27)
2.5.1	Le hacheur survolteur (Boost).....	(27)
2.5.2	Hacheur dévolteur (Buck).....	(28)
2.5.3	Le convertisseur Buck-Boost.....	(28)
2.5.4	Modélisation de l'hacheur dévolteur-survolteur (buck-boost converter).....	(30)
2.6	Stockage d'énergie.....	(30)
2.6.1	Modélisation de la batterie solaire.....	(30)
2.7	Simulation du système global.....	(31)
2.7.1	Simulation du système avec contrôleur MPPT P&O.....	(32)
2.8	Conclusion.....	(36)

CHAPITRE 03 Dégradation des performances électriques avec le vieillissement

3.1	Introduction.....	(37)
3.2	Présentation de module Sharp NTS5E3E.....	(37)
3-3	Dégradation de la transmissivité du verre et de l'EVA.....	(37)
3.4	Dégradation de la résistance série.....	(38)
3.5	Dégradation de la résistance shunt.....	(39)
3.6	Dégradation avec les résistances série et shunt.....	(40)

3.7 Dégradation globale de performance électrique.....	(41)
3.8. Représentation de la dégradation du rendement.....	(42)
3-9 Résultat de simulation de noter panneau.....	(43)
3.10 Conclusion.....	(45)
Conclusion générale	(46)

Bibliographie

LISTE DES FIGURES

Chapitre 01

- Figure (1.1)** : Principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique en PV
- Figure (1.2)** : Circuit équivalent de la cellule solaire
- Figure (1.3)** : Influence des résistances shunt et série sur la caractéristique courant tension d'une cellule photovoltaïque
- Figure (1.4)** : Schéma équivalent de la cellule photovoltaïque à deux diodes
- Figure (1.5)**: Composantes d'un générateur de modules photovoltaïques
- Figure (1.6)**:L'effet de la température sur les caractéristiques I(V) et P(V)
- Figure (1.7)**:L'effet de l'ensoleillement sur les caractéristiques I(V) et P(V)
- Figure (1.8)** : Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et Diode anti-retour
- Figure (1.9)** : Intensité du rayonnement du soleil en un jour

Chapitre 02

- Figure (2.1)**: Modèle Simulink du système photovoltaïque fonctionne avec le MPPT P&O
- Figure (2.2)** : Modèle du générateur photovoltaïque sous Matlab/Simulink selon le modèle à deux exponentielles
- Figure (2.3)** : Caractéristiques $I=f(V)$ et $P=f(V)$
- Figure (2.4)** : Caractéristiques $I=f(V)$ et $P=f(V)$ avec $T=25^{\circ}\text{C}$ et $E=800\text{ W/m}^2$
- Figure (2.5)** : Caractéristiques $I=f(V)$ et $P=f(V)$ avec $T=25^{\circ}\text{C}$ et $E=600\text{ W/m}^2$
- Figure (2.6)** : Caractéristiques $I=f(V)$ et $P=f(V)$ avec $T=40^{\circ}\text{C}$ et $E=1000\text{ W/m}^2$
- Figure (2.7)** : Caractéristiques $I=f(V)$ et $P=f(V)$ avec $T=0^{\circ}\text{C}$ et $E=1000\text{ W/m}^2$
- Figure (2.8)** : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque
- Figure (2.9)**: Schéma de converge vers le PPM par P&O
- Figure (2.10)** : Algorithme de MPPT a base de la méthode P&O
- Figure (2.11)**: Schéma bloc du contrôleur MPPT par la méthode P&O sous Simulink
- Figure (2.12)** *Circuit électrique de base du hacheur survolteur*
- Figure (2.13)** *Circuit électrique de base du hacheur dévolteur*
- Figure (2.14)**.*Circuit électrique de base du hacheur survolteur/dévolteur*
- Figure (2.15)** *Caractéristique de la tension et du courant du Buck-Boost*

Figure (2.16): Le modèle Simulink du convertisseur (Buck boost)

Figure (2.17) : Cellule électrochimique de base

Figure (2.18): Schéma bloc de la batterie sous Simulink

Figure (2.19): Résultats de la simulation dans les conditions STC

Figure (2.20) : Résultats de la simulation dans les conditions E constante et T variable

Figure (2.21): Résultats de la simulation dans les conditions T constant et E variable

Figure (2.22): Résultats de la simulation dans les conditions E variable et T variable

Figure (2.23): variation de température insolation par un jour

Figure (2.24): Résultats de la simulation dans le site réel

Chapitre 03

Figure (3.1) Caractéristiques I-V et P-V en fonction de la transmissivité

Figure (3.2) Caractéristiques I-V et P-V pour différentes valeurs de résistance série

Figure (3.3) Caractéristiques I-V et P-V pour différentes valeurs de résistance shunt

Figure (3.4) Caractéristiques I-V et P-V en fonction des deux résistances pour différents moments de la durée de vie du module

Figure (3.5) Les courbes I-V et P-V du model global pour différents moments de la durée de vie du module

Figure (3.6) La dégradation du rendement du module pendant toute sa durée de vie en fonction de la transmissivité, des résistances série et parallèle ainsi que la dégradation global

Figure (3.7) : Résulta de simulation dans le cas standard

Figure (3.8) : Résulta de simulation dans le cas de dégradation de la résistance série

Figure (3.9) : Résulta de simulation dans le cas de dégradation de la résistance shunt

Figure (3.10) : Résulta de simulation dans le cas de dégradation des résistances shunt et série

LISTE DES TABLEAUX

Tableau (3.1) : les valeurs des puissances et du rendement dans le cas Dégradation de la transmissivité du verre et de l'EVA

Tableau (3.2) : les valeurs des puissances et du rendement dans le cas Dégradation de la résistance série

Tableau (3.3) : les valeurs des puissances et du rendement dans le cas Dégradation de la résistance shunt

Tableau (3.4) : les valeurs des puissances et du rendement dans le cas Dégradation avec les résistances série et shunt

Tableau (3.5) : les valeurs des puissances et du rendement dans le cas Dégradation globale de performance électrique

Introduction générale

Introduction générale

Le dernier siècle a connu une consommation irrationnelle en matière d'énergie qui ne cesse de croître dans toutes les régions du monde. Nos besoins énergétiques auront tendance à augmenter encore plus dans les années à venir et donc une reconsidération de nos ressources s'avère incontournable pour envisager un réel développement durable et respectueux de l'environnement.

Les sources d'énergies renouvelables présentent à la fois une solution fiable et infinie. À ce sujet, le soleil, le vent, la biomasse, la mer,... apparaissent comme des énergies inépuisables et facilement exploitables. L'énergie solaire est vue comme étant la meilleure alternative, et représente l'avenir du monde en matière de ressources énergétiques. En effet, ce que reçoit la terre sous forme d'énergie solaire est l'équivalent de la consommation électrique de 5.9 milliards de personnes pendant 27 ans [1].

D'après l'Agence Internationale de l'Énergie « AIE », une surface de 145.000km², soit 4% de la surface des déserts arides de panneaux photovoltaïques, suffirait à couvrir la totalité des besoins énergétiques mondiaux [1].

L'Algérie se situe dans l'une des régions les plus ensoleillées du monde, elle bénéficie d'une forte capacité d'exportation de l'énergie électrique solaire. La surface du désert seul est estimée à plus d'un million et demi de km² : un potentiel géant en énergie solaire, cette dernière, si elle est bien exploitée, peut facilement couvrir, à elle seule tout le besoin national en terme d'énergie électrique. Au-delà de toutes considérations hypothétiques, il apparaît que le photovoltaïque se présente comme une solution d'avenir car il offre une multitude d'avantages.

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, basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire un courant électrique lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en

fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules en série et en parallèle forme un générateur photovoltaïque.

Une adaptation de puissance entre la source et la charge s'avère importante pour un meilleur fonctionnement et afin d'assurer la fiabilité du système. Avec le développement d'une électronique de puissance spécifique dédiée aux applications photovoltaïques, beaucoup de systèmes de conversion innovants ont été conçus des hacheurs réalisant la conversion DC-DC ont été utilisés pour maximiser l'énergie pouvant être soutirée des panneaux photovoltaïques grâce à un contrôle MPPT, mais également pour adapter le niveau de tension du générateur PV à celui du bus continu.

Le nombre de modules photovoltaïques installés en Algérie continue de croître de manière importante. Ces panneaux seront exposés à toutes les variations météorologiques, ce qui peut altérer l'efficacité énergétique des systèmes photovoltaïques. L'objectif de ce travail est d'établir un modèle permettant de simuler la diminution de l'efficacité de la puissance électrique produite par un système photovoltaïque causée par différentes paramètres externes (température et rayonnement solaire) et internes (résistance des contacts métalliques et les courant de fuite).

Dans ce contexte, ce mémoire est établi sur trois chapitres :

- Dans le premier chapitre nous présentons les généralités sur le générateur photovoltaïque
- Dans le deuxième chapitre est consacré à la modélisation et la simulation sous Matlab/Simulink du générateur photovoltaïque et système photovoltaïque, en se basant sur l'influence des différents paramètres externes (température et rayonnement solaire). Nous présentons les différents résultats de la simulation du système on utilise un modèle à deux exponentielles et quelques algorithmes déjà développées sur la poursuite du point maximale de la puissance(MPPT).
- Dans le troisième chapitre nous présentons les différents résultats relatifs à la dégradation en des paramètres internes sera aussi présentés.

CHAPITRE 01

Généralité sur le générateur photovoltaïque



1.1 Introduction

L'effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique de type continue. Le terme photovoltaïque vient du grec " phos, photos " qui désigne la lumière et de " voltaïque ", mot dérivé du physicien italien Alessandro VOLTA, connu pour ses travaux sur l'électricité.

L'élément de base dans la conversion PV est la cellule PV, plusieurs cellules sont associées dans un module, ces derniers sont groupés en un seul panneau.

Le générateur PV est l'ensemble producteur d'énergie qui se situe en amont des charges [1].

1.2 Généralités sur les cellules photovoltaïques

1.2.1 Rappel sur les semi-conducteurs

Le semi-conducteur a une structure cristalline. Celle-ci consiste en des atomes parfaitement rangés en lignes et en colonnes et liés les uns aux autres par quatre électrons périphériques. Ces électrons n'ont pas la tentation de se déplacer, et l'ensemble se comporte comme un bon isolant électrique.

Quand un semi-conducteur est éclairé par la lumière du soleil, les photons qui constituent cette lumière sont capables de transmettre leur énergie aux électrons de valence du semi-conducteur pour rompre la liaison qui les maintient liés aux atomes respectifs. Pour chaque liaison rompue, on obtient un électron libre dans le semi-conducteur ainsi qu'un trou. Les trous se comportent, sous différents aspects, comme des particules avec une charge positive égale à celle de l'électron [2].

1.2.2 L'effet photovoltaïque et la jonction PN

Fut observé la première fois en 1839 par le physicien français Edmond Becquerel, l'effet photovoltaïque permet la transformation de l'énergie lumineuse en électricité. Sous l'effet d'un rayonnement lumineux incident, les électrons des bandes de valence du semi-conducteur vont pouvoir passer dans la bande de conduction et devenir libres. Ce phénomène va engendrer au sein de la structure du semi-conducteur la création de paires d'électron-trou. Ceux-ci, sous l'effet de la barrière de potentiel, vont s'accumuler sur chacune des faces extérieures des

zones P et N. Ainsi, une tension électrique apparaît dans les deux cotés N et P. Le dispositif devient donc générateur électrique sous l'effet de la lumière. La collecte de courant se fait par les contacts métalliques (électrodes). Si ces électrodes sont reliées à un circuit extérieur, un courant continu circule [3][4].

1.2.3 La cellule photovoltaïque

Appelé aussi, cellule solaire ou photopile, la cellule photovoltaïque est fabriquée à l'aide de matériaux semi-conducteurs. Elle est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque, son rôle est de transformer l'énergie solaire en électricité de type continu. La proportion d'énergie transformée constitue le rendement de la cellule [2].

La plus répandue est à base de silicium mono et poly cristallin, un certain nombre d'autres matériaux et de structures font l'objet d'effort de recherche considérable visant à découvrir et à mettre au point des solutions nouvelles pour obtenir des cellules à base du sulfure de cadmium, du silicium amorphe, de l'arséniure de gallium [5].

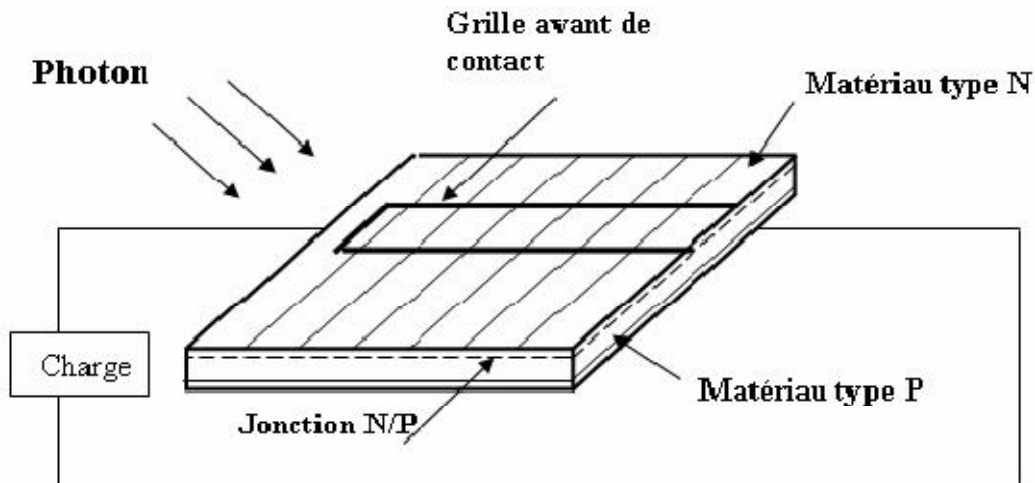


Figure (1.1) : Principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique en PV [6]

1.2.4- Les différents types de cellules solaires :

Ils existent trois principaux types de cellules :

a. Les cellules monocristallines :

Ce sont celles qui ont le meilleur rendement (12-16%), mais aussi celles qui ont le coût le plus élevé, du fait d'une fabrication compliquée [7].

b. Les cellules poly cristallines :

Leurs conception étant plus facile, leur coût de fabrication est moins important, cependant leur rendement est plus faible (11-13%) [7].

c. Les cellules amorphes :

Faibles rendement (8-10%), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. utilisée couramment dans les produits de petites consommation tel que les montres [7].

D'autres technologies à **couches minces**, comme le CIS (cuivre-indium-sélénium) ou CdTe (tellure de cadmium) permettent le captage de différentes fréquences du spectre lumineux et ainsi augmenter le rendement jusqu'à 12% [7].

1.2.5- Modèles de la cellule photovoltaïque :

Depuis l'invention de la cellule solaire en 1954, plusieurs modèles ont été proposés pour décrire son fonctionnement et son comportement sous différentes conditions météorologiques (éclairage et température). Ces modèles ont été affirmés au cours du temps et en fonction des moyens de calcul disponibles. Les modèles les plus utilisés sont :

1. Modèle idéale ;
2. Modèle à une seule exponentielle ou à une seule diode ;
3. Modèle à deux exponentielles ou à deux diodes ;

a) Modèle à une seule exponentielle ou une seule diode :

Une cellule photovoltaïque peut être illustrée par son schéma équivalent comme le montre la figure (1.2).

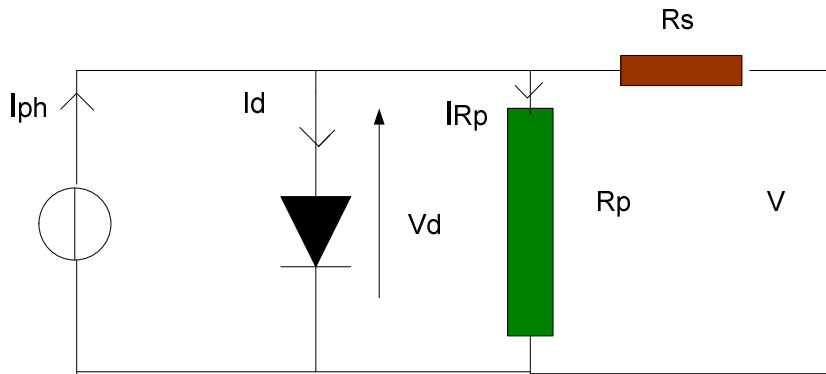


Figure (1.2) : Circuit équivalent de la cellule solaire

La cellule comporte une résistance série (R_s) et une résistance en dérivation ou shunt (R_p). Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique I-V de la photopile :

- la résistance série est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.
- la résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, elle dépend de la fonction dont celle-ci a été réalisée.

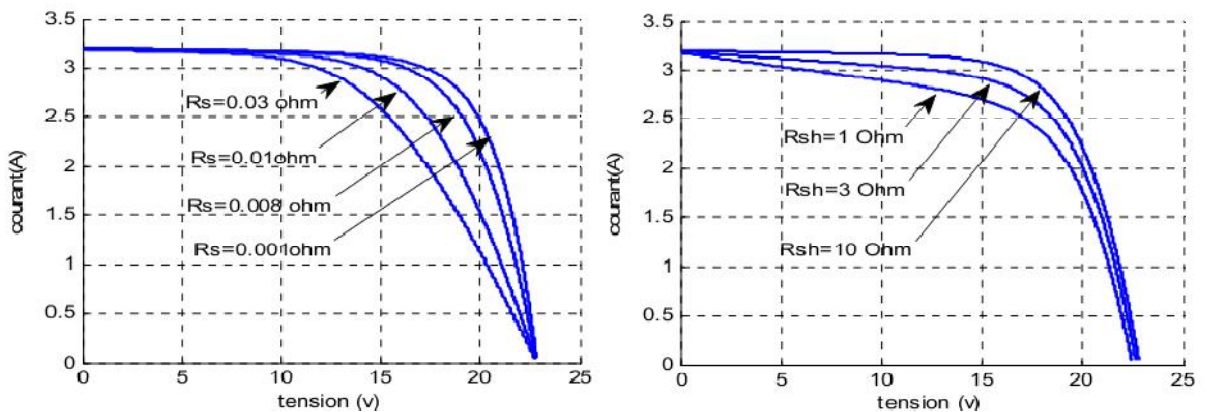


Figure (1.3) : Influence des résistances shunt et série sur la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque

• Présentation du modèle mathématique

A partir de la figure (1.2) la loi des nœuds nous permet d'écrire la relation suivante

$$I_{ph} = I_D + I_{R_p} + I \quad (1.1)$$

Le courant de jonction I_D est donné par :

$$I_D = I_0 \left[e^{\frac{q(V+IR_S)}{nKT}} - 1 \right] \quad (1.2)$$

Le courant dans la résistance R_p est donné par :

$$IR_p = \frac{V+IR_S}{R_p} \quad (1.3)$$

A partir de l'équation (1.1), on obtient l'expression de courant I :

$$I = I_{ph} - I_D - IR_p \quad (1.4)$$

Remplaçons dans (1.4) les équations (1.2) et (1.3) l'équation caractéristique deviendra :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{q(V+IR_S)}{nKT}} - 1 \right] - \frac{V+IR_S}{R_p} \quad (1.5)$$

Où :

I : Le courant de cellule.

V : La tension de cellule.

R_s : La résistance série de la cellule. [Ω]

T : La température de la cellule [$^{\circ}\text{K}$].

q : La charge d'électron $e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

I_0 : Le courant de saturation [A]

K : La constante de Boltzman ($1.3854 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$).

V_g : La tension de seuil de diode (1.1V).

n : Le facteur de qualité de diode.

Si l'on suppose que la résistance parallèle est infinie ($R_p = \infty$) l'équation (1.5) devienne:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{q(V+IR_S)}{nKT}} - 1 \right] \quad (1.6)$$

L'équation (1.6) en termes de I et V n'est pas tellement facile à résoudre comparativement à l'équation du circuit équivalent simplifié. Par conséquent une méthode numérique (Newton- Raphson) doit être appliquée.

b) Modèle à deux exponentielles ou à deux diodes:

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle tient compte d'effets résistifs parasites dus à la fabrication et représentés sur le modèle équivalent par deux résistances : R_s et R_p , il est représenté sur la figure suivante [8]:

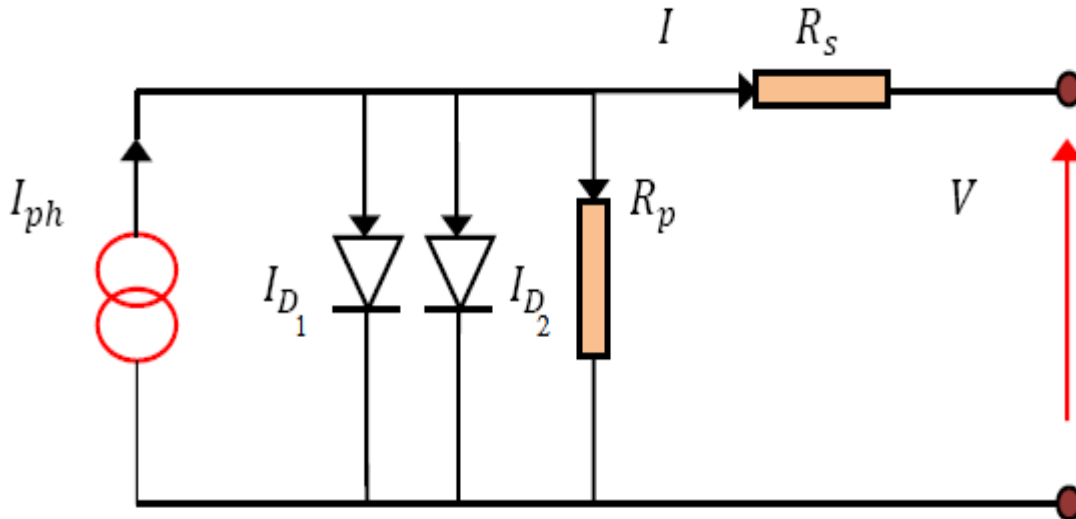


Figure (1.4) : Schéma équivalent de la cellule photovoltaïque à deux diodes.

La représentation avec deux diodes est plus proche aux caractéristiques réelles de la cellule photovoltaïque.

L'équation caractéristique de la cellule réelle est alors donnée par :

$$I = I_{Ph} - I_{D1} \left[e^{\frac{q(V+IR_s)}{n_1 kT}} - 1 \right] - I_{D2} \left[e^{\frac{q(V+IR_s)}{n_2 kT}} - 1 \right] - \frac{V+IR_s}{R_p} \quad (1.7)$$

Le courant dans la diode est donnée par :

$$I_D = I_0 \left[e^{\frac{q(V+IR_s)}{n kT}} - 1 \right] \quad (1.8)$$

Avec :

$$I_0 = K_1 T^3 e^{-\frac{E_g}{kT}} \quad (1.9)$$

R_s : (La résistance série) représente les résistances de contacts;

R_p : (La résistance shunt (R_{sh})) caractérise les divers courants de fuite dans la jonction PN ;

I_{D1}, I_{D2} : Sont les courants de saturation des diodes ;

n_1, n_2 : Facteurs de pureté de la diode.

1.2.6 Paramètres externes d'une cellule photovoltaïque

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique. Les plus usuels sont les suivantes [9] :

- Courant de court circuit

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal (R_s nulle et R_p infinie), ce courant se confond avec la photo courant

I_L dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation (1.2), on obtient

$$I_{cc} = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{q(I_{cc} R_s)}{nKT}} - 1 \right] - \frac{I_{cc} R_s}{R_p} \quad (1.10)$$

Pour la plupart des photopiles (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme $I_0 \left[e^{\frac{q(I_{cc} R_s)}{nKT}} - 1 \right]$ devant I_{ph}

L'expression approchée du courant de court circuit est alors : $I_{cc} = \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{R_s}{R_p}\right)}$

- Tension de circuit ouvert

C'est la tension V_{co} pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul

(C'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque).

$$0 = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{q(V_{co})}{nKT}} - 1 \right] - \frac{V_{co}}{R_p} \quad (1.11)$$

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

$$V_{co} = \left(\frac{nKT}{q} \right) * \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right) \quad (1.12)$$

- Facteur de forme

On appelle facteur de forme FF , le rapport entre la valeur maximale de la puissance peuvent être extrait ($V_{pm} * I_{pm}$) de la photopile sous les conditions de mesures standardisées, et le produit $I_{cc} * V_{co}$.

Où : I_{cc} intensité de court-circuit et V_{co} tension de circuit ouvert

$$FF = \frac{V_{pm} I_{pm}}{I_{cc} V_{co}} \quad (1.13)$$

Pour une cellule de fabrication industrielle, le facteur de forme est de l'ordre de 70%.

- Le rendement

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

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{FF.V_{co}.I_{cc}}{P_{in}} \quad (1.14)$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court circuit et la tension à circuit ouvert [10].

1.3- Les modules photovoltaïques

Afin d'augmenter la tension d'utilisation, les cellules PV sont connectées en série. La tension nominale du module est habituellement adaptée à la charge et les modules auront donc généralement 36 cellules. Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation.

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série, si 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 [11].

1.4 -Les générateurs PV

Les modules PV sont les éléments de base de tout système photovoltaïque. Ils peuvent être branchés en série pour augmenter leur tension d'utilisation et en parallèle pour augmenter leur courant. Cet ensemble est appelé le champ de modules PV. L'énergie fournie par le champ peut être utilisée pour charger des batteries qui fourniront l'électricité au moment voulu (figure 1.5).

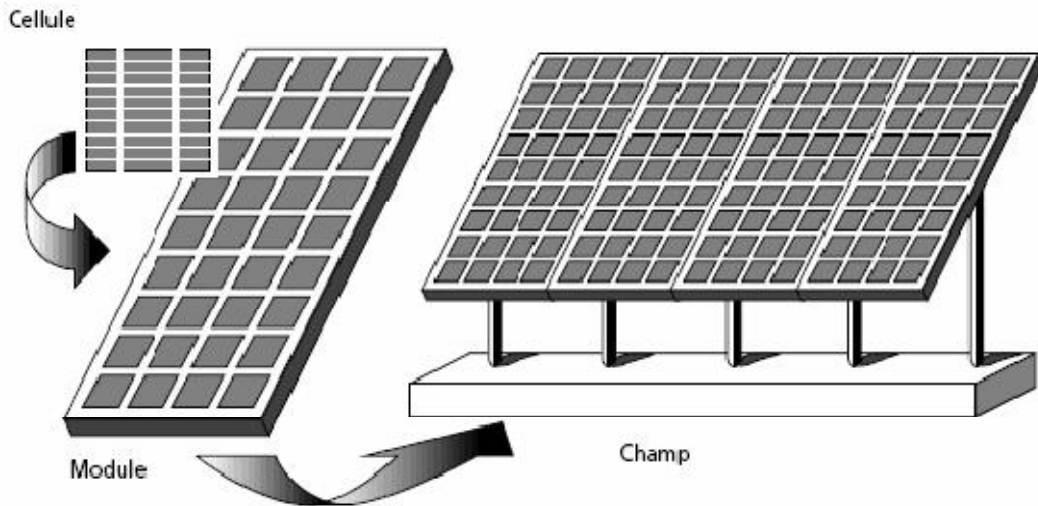


Figure (1.5): Composantes d'un générateur de modules photovoltaïques [11]

Pour le générateur, la caractéristique $I_{pv} (V_{pv})$ est obtenue par :

$$I_{pv} = N_p \cdot I \tag{1.15}$$

$$V_{pv} = N_s \cdot V \tag{1.16}$$

Où : N_p est le nombre de modules en parallèles N_s le nombre de modules en séries.

1.5 Influence de la température sur les courbes $I(V)$, $P(V)$:

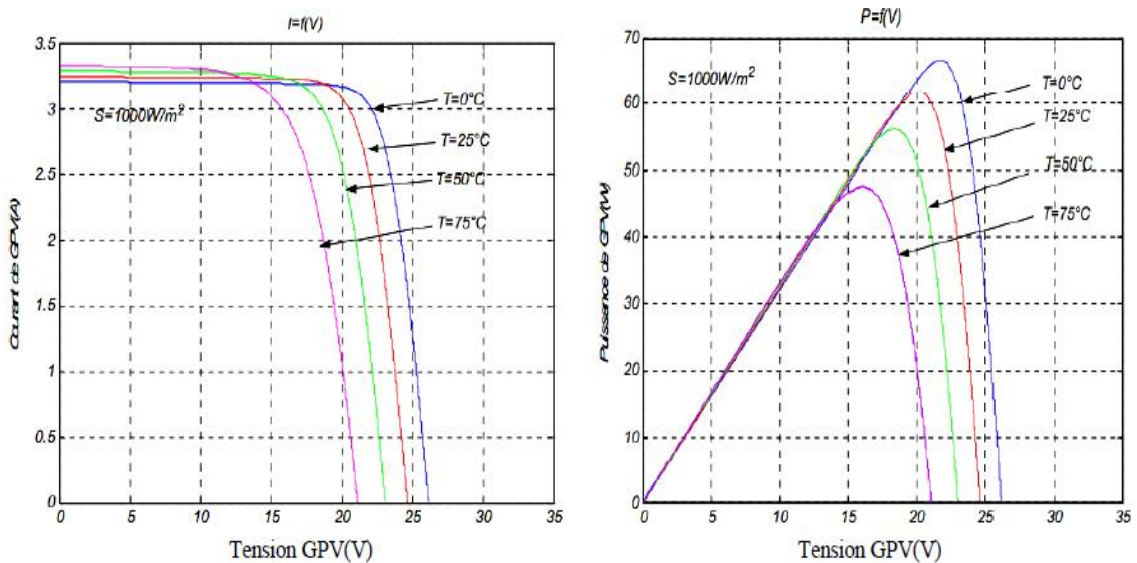


Figure (1.6): L'effet de la température sur les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$

D'après ces graphes on voit que le courant du panneau est presque constant, par contre la variation de la température est inversement proportionnelle à la tension du panneau.

1.6. Influence de l'ensoleillement sur les courbes I(V), P(V) :

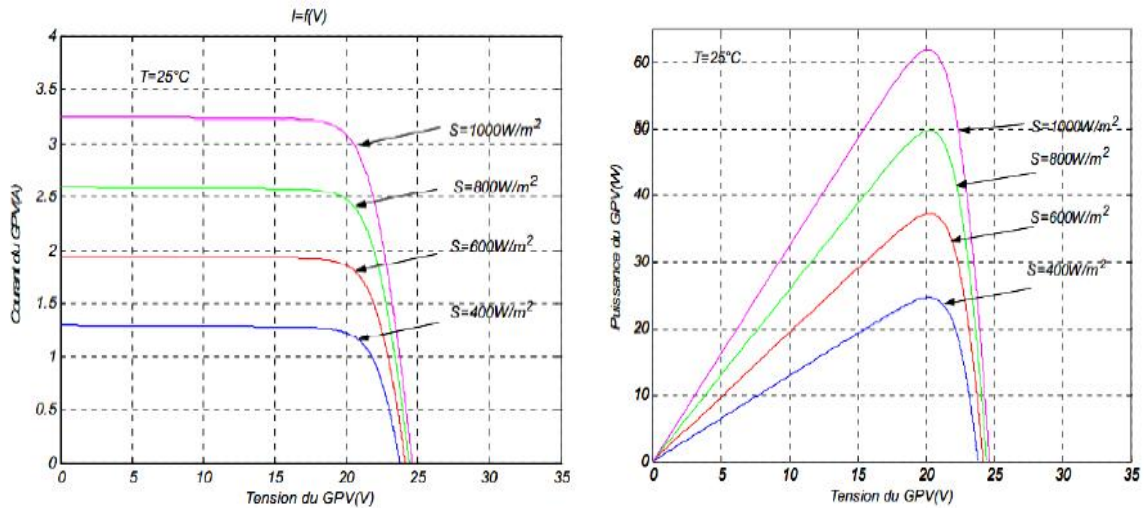


Figure (1.7): L'effet de l'ensoleillement sur les caractéristiques I(V) et P(V)

D'une part, on peut remarquer que les points de fonctionnement à puissance maximale se déplacent et se situent autour d'une valeur d'environ 21V. D'autre part, on peut aussi remarquer que le courant est directement proportionnel au rayonnement solaire. Par contre, la tension est relativement peu dégradée. On en déduit donc que le panneau peut fournir une tension correcte, même à faible éclairage.

1.7 Protections d'un GPV :

Pour garantir une durée de vie importante d'une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie électrique sur des années, des protections électriques doivent être ajoutées aux modules photovoltaïques afin d'éviter des pannes destructrices liées à l'association de cellules en série et de panneaux en parallèles. Pour cela, deux types de protections classiques sont utilisés dans les installations actuelles.

1.7.1 Diode anti-retour :

Une cellule photovoltaïque se comporte comme un récepteur lorsqu'elle ne reçoit pas de rayonnement solaire (nuit, ...), donc elle consomme du courant. Pour éviter dans ce cas la décharge de la batterie on utilise une diode installée en série entre les modules et la batterie appelée diode « anti-retour » (ou diode série).

Quand le générateur est constitué de modules en parallèle il y a une diode anti-retour sur chaque branche. En effet il se peut qu'une branche débite de courant plus qu'une autre, dans ce cas, sans la diode la première branche débiterait dans la seconde [12].

1.7.2 Diode by-pass :

Lorsqu'une partie de champ de modules est accidentellement couverte, le courant produit par le reste du champ continu à circuler et traverse les cellules cachées. Dans ce cas ces cellules se comportent en récepteur et risquent l'échauffement et la destruction. Pour éviter ceci des diodes sont installées sur les modules pour dériver le courant en cas d'obstruction de cellules, ce sont les diodes « by-pass » appelées aussi diodes parallèles [12].

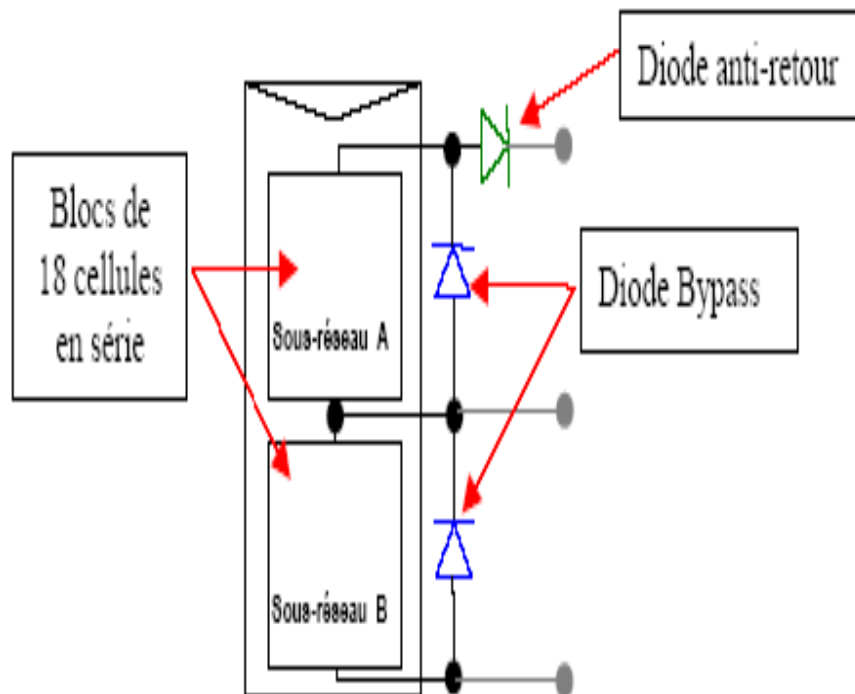


Figure (1.8) : Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et Diode anti-retour.

1.8 Quelques avantages et inconvénients de l'énergie PV

a) Les avantages

- Le soleil est une source d'énergie propre et renouvelable, qui ne produit ni le gaz ni le déchet toxique par son utilisation.
- Le processus photovoltaïque est complètement à semi-conducteurs et d'un seul bloc. Il n'y a aucune pièce mobile et aucun matériau n'est consommé ou émis.
- Les systèmes photovoltaïques ont les avantages suivants par rapport aux options de concurrence de puissance:
 - ils ne font pas de pollution, sans émissions ou odeurs discernables.
 - ils peuvent être des systèmes autonomes qui actionnent sûrement sans surveillance pendant de longues périodes.
 - ils ne consomment aucun carburant, leur carburant est abondant et libre.
 - ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la fiabilité de système.
 - ils n'exigent aucun raccordement à une source d'énergie ou à un approvisionnement en carburant existant [13].

b) Les inconvénients

- prix: les cellules solaires sont encore lointaines pour produire une fraction significative de l'énergie du monde requise en raison de la charge de placement initiale. Cependant, le prix diminue considérablement par rapport à la puissance maximale en Watt, depuis les années 70 [14].
- rayonnement du soleil: l'intensité d'irradiation du rayonnement du soleil en un jour, toujours, change et flotte. La figure 1.9 [5] est un exemple de l'irradiation du mauvais temps. L'irradiation commence autour de 6 heures et augmente à la valeur maximale (se rapproche de 900 W/m²) à 12 AM après que 11 AM, l'irradiation flotte parce que le ciel est plus tardif, nuageux et pluvieux. Ensuite l'intensité d'ensoleillement diminue graduellement. Autour 18 h l'ensoleillement est nulle. Le rayonnement du soleil est une source principale pour le système photovoltaïque, ainsi l'exécution du système photovoltaïque dépend de l'intensité d'ensoleillement.

- Rendement: le rendement de la cellule solaire est relativement bas, 15 % [15] pour le silicium monocristallin et 12 % pour le silicium poly-cristal. En conséquence, pour obtenir la grande capacité du générateur solaire, le grand secteur de la cellule solaire et les endroits sont nécessaires. De nouveaux matériels et processus sont recherchés pour remplacer le silicium qui est le matériel principal pour la cellule en silicium mais reste toujours à prix élevé et rendement bas.

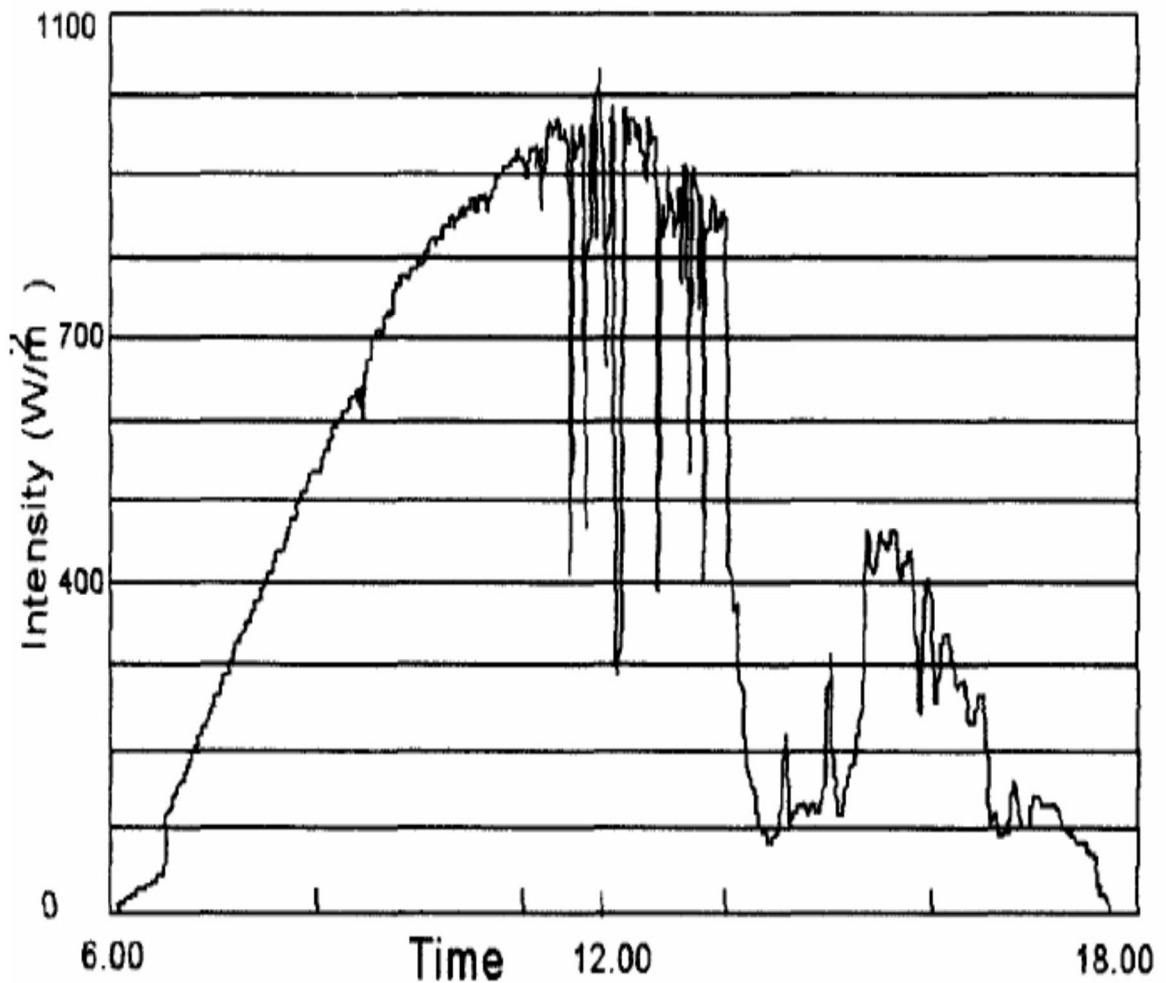


Figure (1.9) : Intensité du rayonnement du soleil en un jour

1.9 Conclusion :

La cellule photovoltaïque est l'élément de base dans la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique, elle présente une caractéristique courant-tension fortement non linéaire, et son rendement dépend des conditions météorologiques (éclairage, température).

L'association de cellules en série et en parallèle donne lieu aux générateurs photovoltaïques, qui sont utilisés pour l'alimentation électrique.

Dans la prochain chapitre on étudie La modélisation et la simulation du générateur photovoltaïque, et l'étude de l'influence de la température et de l'éclairage sur la courbe

$I=f(V)$ et $P=f(V)$ permettent de connaître son comportement pour un meilleur suivi de la poursuite du point de puissance maximal (augmenter le rendement) et pour une meilleure simulation du système photovoltaïque.

Chapitre 02

Modélisation et simulation du système photovoltaïque

2.1 Introduction

Un système photovoltaïque est un système d'alimentation électrique, constitué principalement d'un générateur photovoltaïque composé d'un seul ou plusieurs panneaux solaires, d'un ensemble des batteries pour le stockage d'énergie électrique, d'un ou de plusieurs convertisseurs continu-continu afin de fournir des tensions d'alimentation adéquates pour les batteries et les charges continues.

Dans ce chapitre nous présenterons d'abord la modélisation de générateur photovoltaïque puis celle chaîne de conversion photovoltaïque.

Nous prenons un système photovoltaïque figure (2.1), générateur PV, convertisseur d'énergie DC-DC (*survolteur/dévolteur*), une commande MPPT et une batterie.

2.2 Modèle du système photovoltaïque:

L'emploi du module photovoltaïque dans des installations solaires nécessite une bonne connaissance de sa performance, aussi, prévoir son comportement sous différentes conditions climatiques. Les modules photovoltaïques commercialisés nous informe uniquement sur la puissance maximale P_{ppm} , la tension du circuit ouvert V_{oc} , le courant du court-circuit I_{cc} pris à des conditions de test standard (STC), c'est-à-dire à un éclairement de 1000 W/m^2 et une température de $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Un modèle généralisé a été développé sur MATLAB SIMULINK pour décrire le comportement du générateur photovoltaïque, sous les différentes conditions climatiques par rapport à l'éclairement, ainsi qu'à la température.

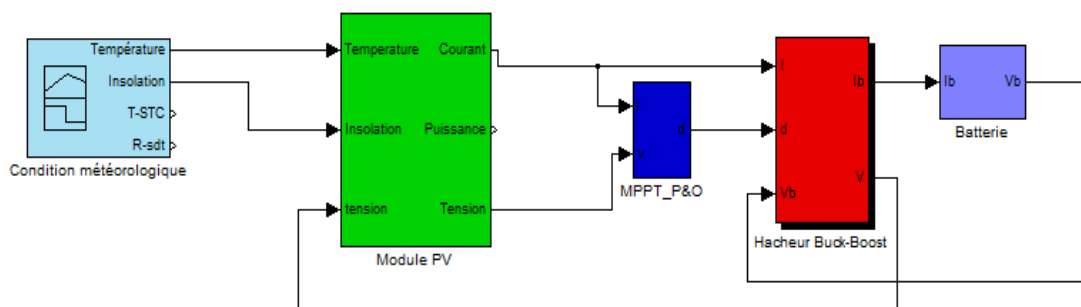


Figure (2.1): Modèle Simulink du système photovoltaïque fonctionne avec le MPPT P&O.

Le système d'alimentation solaire à simuler comprend un panneau solaire de 36 cellules en série, un MPPT P&O, un hacheur dévolteur-survolteur et une batterie.

2.3 Modèle Simulink du GPV

Le but des simulations (qu'on va présenter) est de déterminer le comportement du générateur PV face aux différents changements climatiques tels que la température et l'ensoleillement et l'influence de ses paramètres internes, les résistances shunt et série.

La figure (2.2) montre le schéma bloc du panneau solaire sous MATLAB/SIMULINK, ce schéma modélise les équations mathématiques du panneau solaire données dans (1.7).

Le bloc de simulation de la figure (2.2) a comme entrées les valeurs de température et d'ensoleillement, en changeant ces valeurs on peut évaluer la réaction du système à différents changements des conditions atmosphériques.

Et a comme sorties :

Le courant, la tension du GPV et la puissance délivrée par ce dernier.

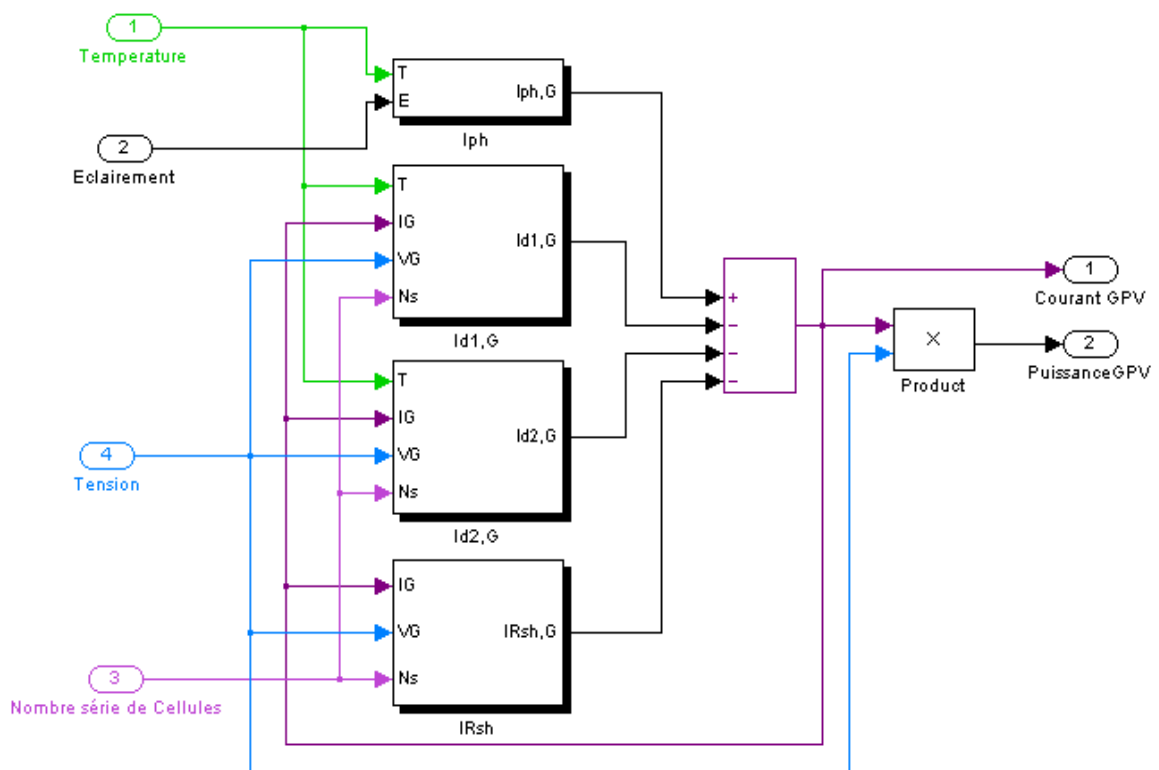


Figure (2.2) : Modèle du générateur photovoltaïque sous Matlab/Simulink selon le modèle à deux exponentielles.

2.3.1 Simulation du GPV dans les conditions standards

Pour une température $T=25^{\circ}\text{C}$ et un ensoleillement $E=1000\text{W}/\text{m}^2$ nous avons simulé les caractéristiques $I=f(V)$ et $P=f(V)$. Les résultats de cette simulation sont représentés sur les figures (2.3).

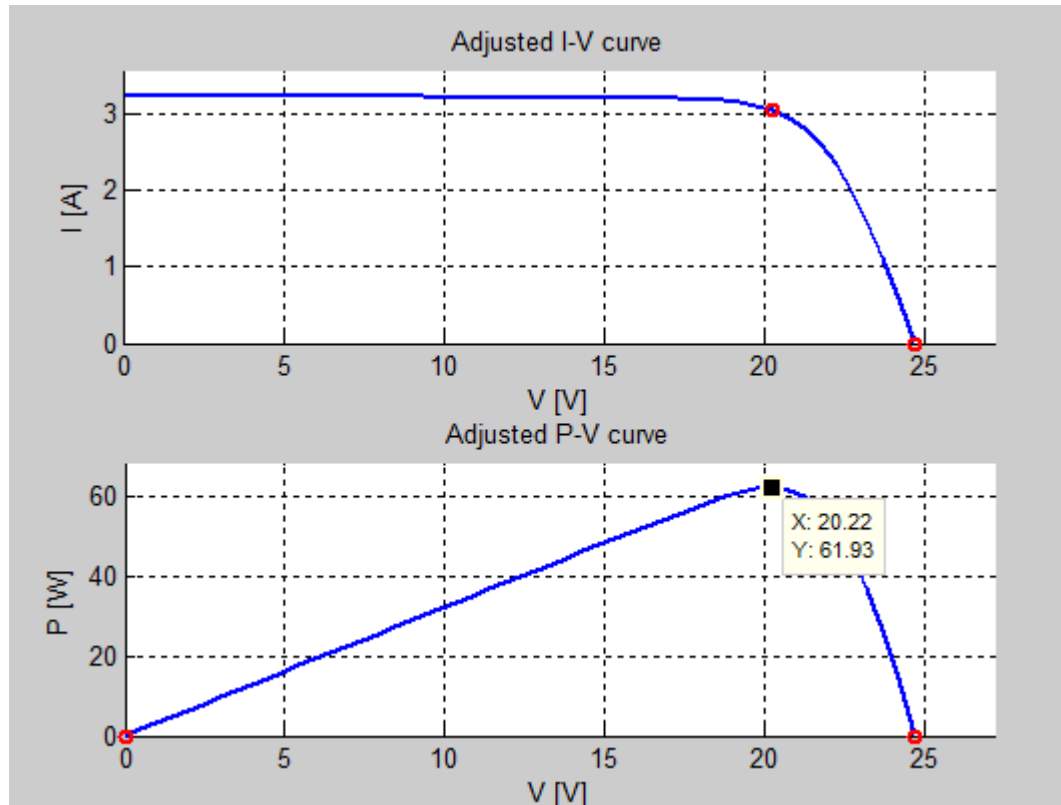


Figure (2.3) : Caractéristiques $I=f(V)$ et $P=f(V)$.

Les courbes des caractéristiques $I=f(V)$ et $P=f(V)$ d'un panneau solaire de 60 W qui est composé de 36 cellules, représentent respectivement la variation du courant qu'il produit et la variation de la puissance en fonction de la tension aux bornes du panneau PV depuis le court-circuit jusqu'au circuit ouvert.

A partir de ces caractéristiques nous pouvons déduire les paramètres suivants :

- la tension de circuit ouvert $V_{co} = 24.68 \text{ V}$,
- le courant de court-circuit $I_{cc} = 3.248\text{A}$,
- le point de la puissance maximale PPM = 61.93W,
- le courant pour lequel la puissance est maximale $I_m = 3.063\text{A}$,
- la tension pour laquelle la puissance est maximale $V_m = 20.22\text{V}$.

2.3.2 Influence de l'éclairement sur les caractéristiques $I=f(V)$ et $P=f(V)$

Pour étudier l'influence de l'éclairement sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension nous avons fait varier l'éclairement solaire dans notre simulation en gardant la température constante ($T=25^{\circ}\text{C}$).

Les figures suivantes illustrent les caractéristiques obtenues pour des éclairements de $800\text{W}/\text{m}^2$, $600\text{W}/\text{m}^2$

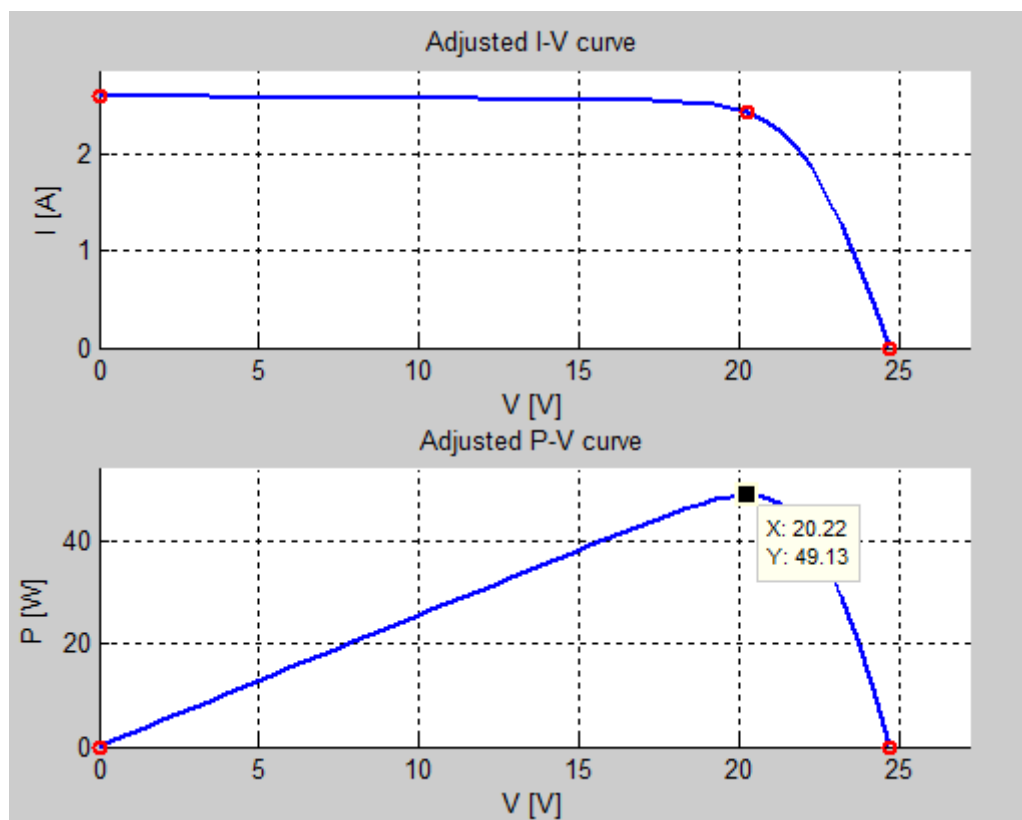


Figure (2.4) : Caractéristiques $I=f(V)$ et $P=f(V)$ avec $T=25^{\circ}\text{C}$ et $E=800\text{ W}/\text{m}^2$

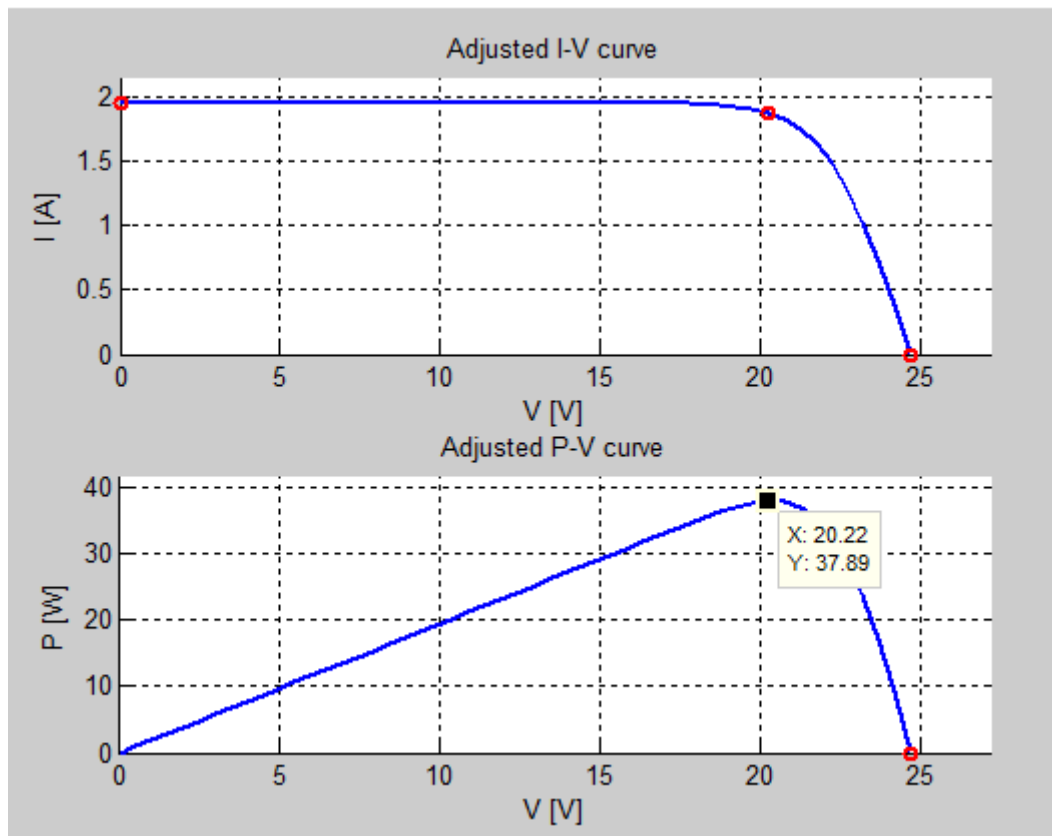


Figure (2.5) : Caractéristiques $I=f(V)$ et $P=f(V)$ avec $T=25^{\circ}\text{C}$ et $E=600\text{ W/m}^2$

La variation de l'ensoleillement (flux lumineux) se traduit par un déplacement de la caractéristique $I=f(V)$ suivant l'axe des courants, ce qui veut dire que le courant du court-circuit I_{cc} est proportionnel à l'éclairement, par contre V_{co} varie très peu en fonction de l'éclairement. Par conséquent, la puissance délivrée par le générateur augmente figures (2.4),(2.5).

2.3.3 Influence de la température sur les caractéristiques $I=f(V)$ et $P=f(V)$

Afin d'évaluer l'influence de la température sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension, nous avons simulé le comportement du générateur PV en faisant varier la température, en gardant l'éclairement constant (1000W/m^2).

Les résultats de cette simulation pour des températures de 40°C , 0°C sont donnés par les caractéristiques suivantes :

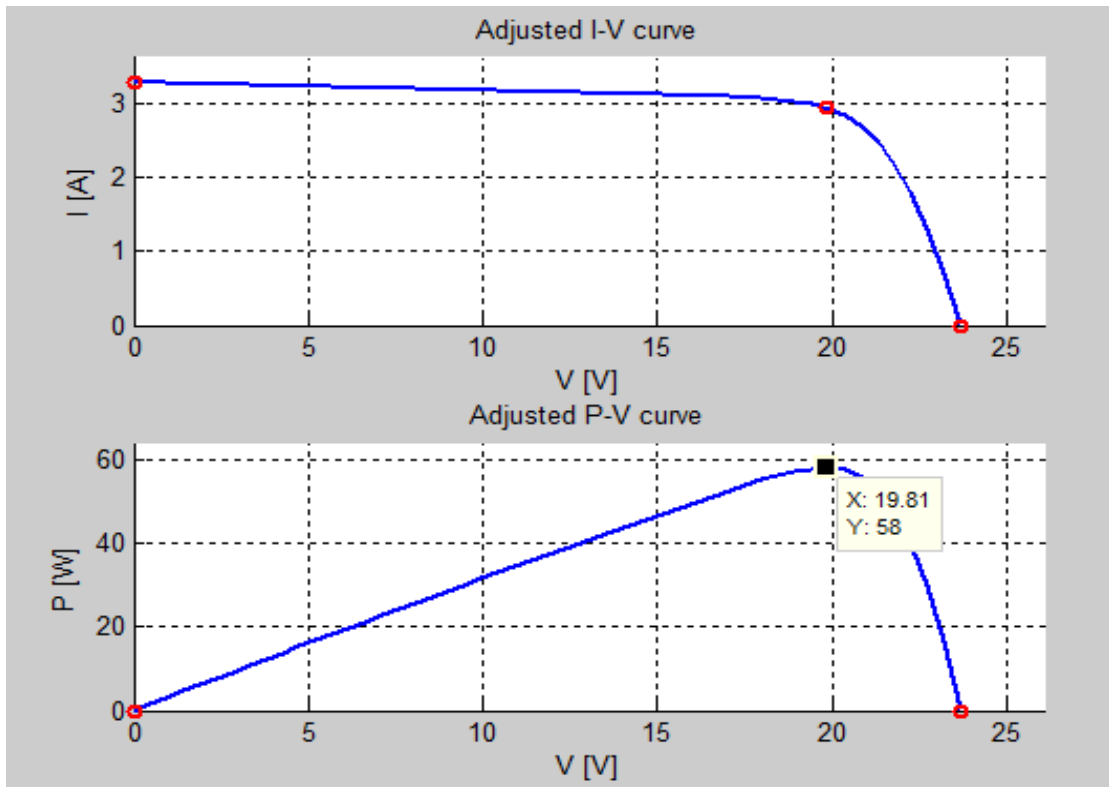


Figure (2.6) : Caractéristiques $I=f(V)$ et $P=f(V)$ avec $T=40^{\circ}\text{C}$ et $E=1000 \text{ W/m}^2$

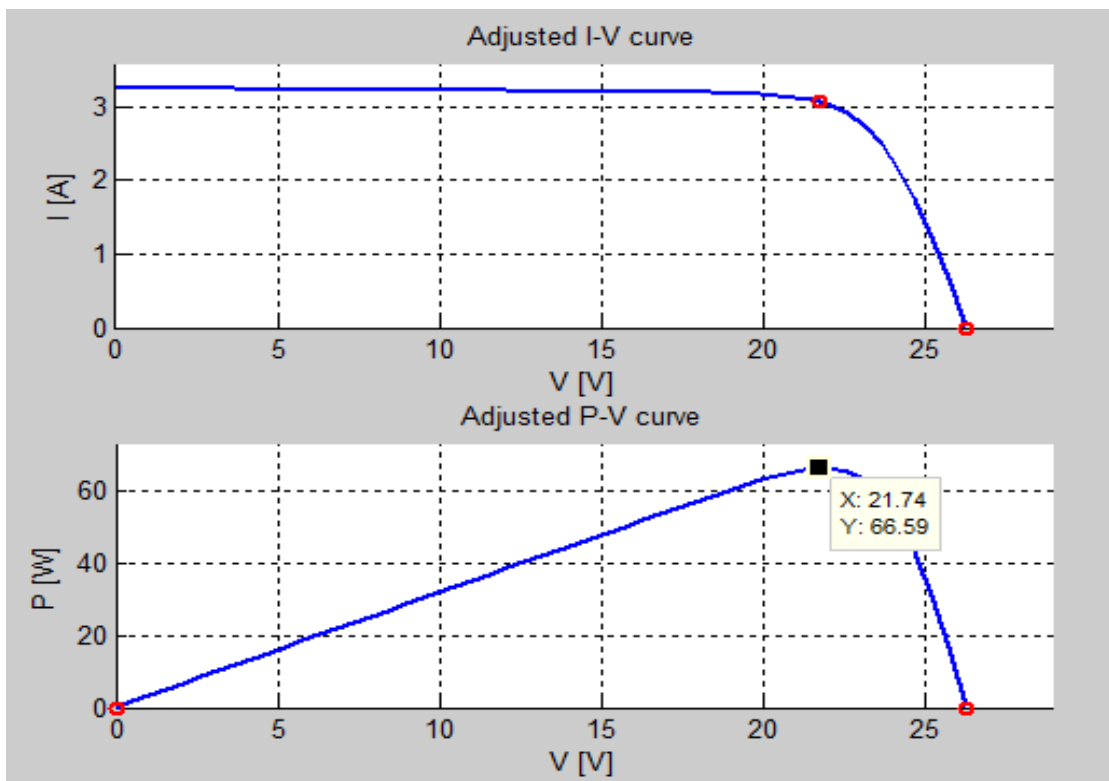


Figure (2.7) : Caractéristiques $I=f(V)$ et $P=f(V)$ avec $T=0^{\circ}\text{C}$ et $E=1000 \text{ W/m}^2$

D'après la caractéristique $I=f(V)$ nous remarquons que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance diminue figures (2.6), (2.7) La diminution de la puissance fournie est estimée environ de 0,5% par degré Celsius pour un module.

2.4 Le régulateur photovoltaïque :

2.4.1 Principe de fonctionnement de MPPT :

Un MPPT, de l'anglais « Maximum Power Point Tracking » est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. En conséquence, pour un même éclairement, la puissance délivrée sera différente selon la charge. Un contrôleur MPPT permet donc de piloter le convertisseur statique reliant la charge (une batterie par exemple) et le panneau photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge chaque instant.

La Figure (2.8) présente le schéma de principe d'un module photovoltaïque doté d'un étage d'adaptation DC-DC entre le GPV et la charge de sortie. Cette structure correspond à un système plus communément appelé système autonome. Il permet le plus souvent d'alimenter une batterie servant de stocke l'énergie pour une charge qui ne supporte pas les fluctuations de tension. Cet étage d'adaptation dispose d'une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui lui permet de rechercher le PPM que peut fournir un panneau solaire photovoltaïque. L'algorithme de recherche MPPT peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'implantation choisi et des performances recherchées. Cependant au final, tous les algorithmes performants doivent jouer sur la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé [16].

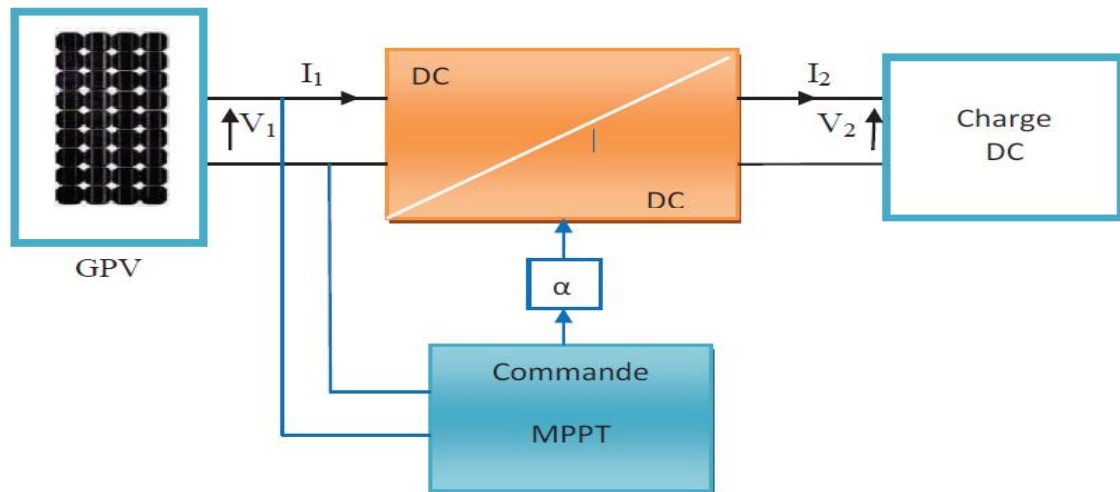


Figure (2.8) : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.

pour assurer le fonctionnement d'un GPV a son point de puissance maximale (PPM), des contrôleur MPPT sont utilisés, ces contrôleurs sont destinés a minimiser l'erreur entre la Puissance de fonctionnement et puissance maximale de référence variable en fonction des conditions climatiques baser sur des méthode optimale [17]

2.4.2 La méthode Perturbe & Observe (P&O) :

Le principe des commandes MPPT de type **P&O** consiste à perturber la tension VPV d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance PPV qui en résulte. Ainsi, comme l'illustre la figure (2.9), on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension VPV engendre un accroissement de la puissance PPV, cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM.

Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM.

Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique PPV(VPV), il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande.

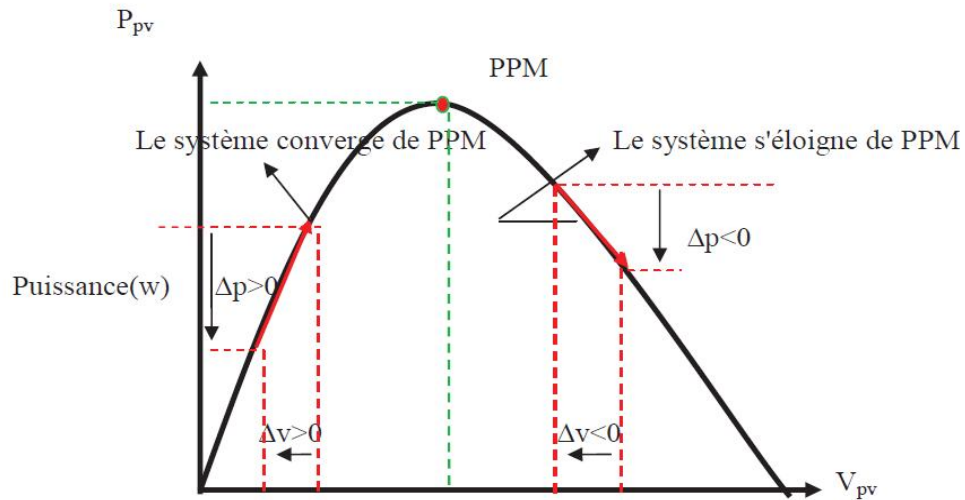


Figure (2.9): Schéma de converge vers le PPM par P&O .

La figure (2.10) représente l’algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l’évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant [18].

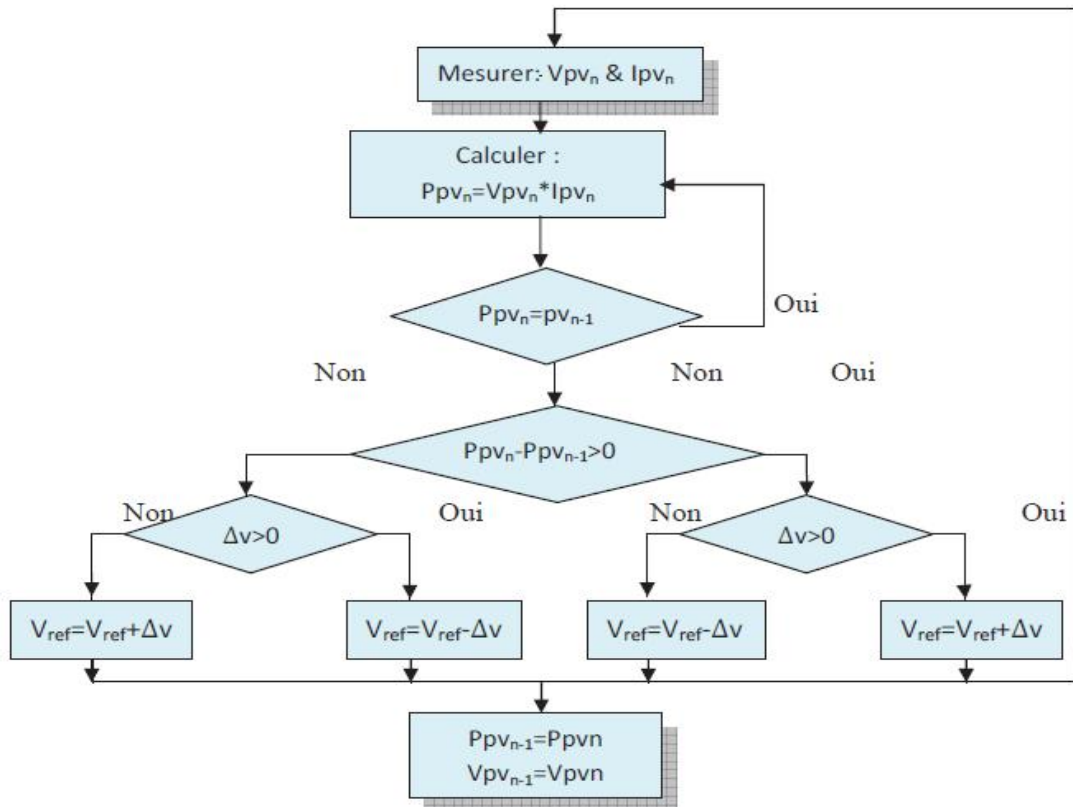


Figure (2.10) : Algorithme de MPPT a base de la méthode P&O [18]

Telle que :

Vpv_n : La nouvelle puissance

Ppv_{n-1} : L'enceint puissance dans le temps (t-1)

$$\Delta V = Vpv_n - Vpv_{n-1} \tag{2.17}$$

$$\Delta P = Ppv_n - Ppv_{n-1} \tag{2.18}$$

La méthode P&O est aujourd’hui largement utilisée de part sa facilité d’implémentation, cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu’elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM, une fois ce dernier atteint. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation. Cependant, une faible valeur d’incrément ralenti la recherche du PPM, il faut donc trouver un compromis entre la précision et la rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser [24].

2.4.3 Modélisation du contrôleur MPPT :

Que ce soit une commande analogique ou digitale le principe de régulation est basé sur la variation automatique du rapport cyclique d à la valeur adéquate de manière à maximiser la puissance à la sortie du panneau PV, avec un $\Delta d = 0.001$. ce nombre est expérimentalement choisi pour convenir à la poursuite du MPPT en terme vitesse, précision, et fiabilité.

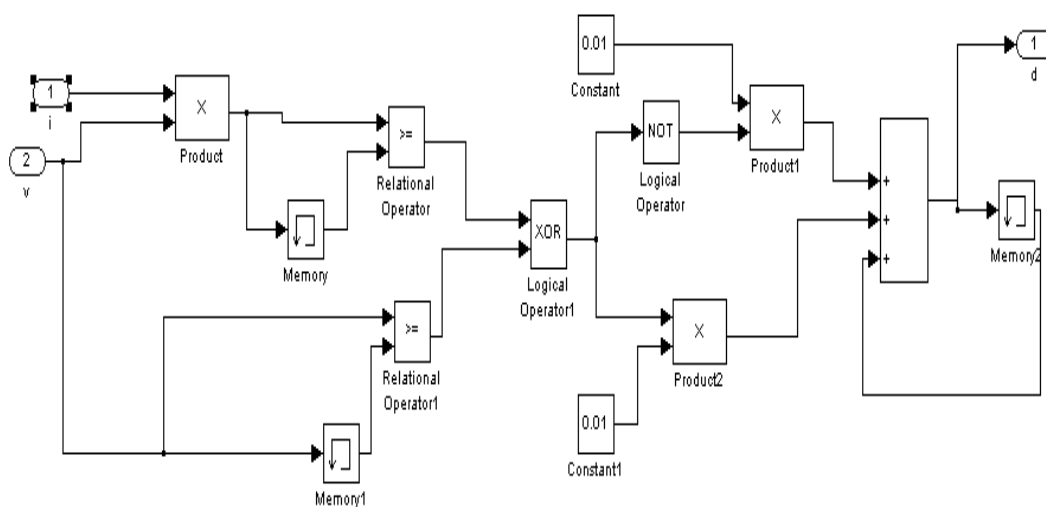


Figure (2.11): Schéma bloc du contrôleur MPPT par la méthode P&O sous Simulink.

2.5 Convertisseurs DC/DC

Pour la conversion de puissance, il est essentiel que le rendement soit maintenu élevé pour éviter la dissipation de la puissance et pour éviter les échauffements excessifs dans les composants électroniques. Pour cette raison toute la conversion de puissance échangée doit être réalisée autour des composants de stockage d'énergie (inductance et condensateurs) et les commutateurs. Les commutateurs de puissance utilisés dépendent du niveau de la puissance à convertir ou à commander. Les MOSFETS (transistors à effet de champ d'oxyde de métal) sont habituellement utilisés à la puissance relativement basse (quelques kW) et les IGBTs (transistors bipolaires à gâchette isolée) à des puissances plus élevées. Les thyristors ont été généralement utilisés et acceptés dans les plus hauts niveaux de puissance [19].

Trois topologies de base de circuit de conversion seront décrites dans les paragraphes suivants :

(Buck, Boost et Buck-Boost), utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités. Ce type de convertisseurs n'est constitué que par des éléments réactifs (Selfs, Capacités) qui, dans le cas idéal, ne consomment aucune énergie. C'est pour cette raison qu'ils sont caractérisés par un grand rendement [20].

Dans ces études, l'interrupteur du convertisseur est attaqué par un signal MLI (Modulation Large Impulsion), avec une fréquence F_s fixe et un rapport cyclique D variable.

2.5.1 Le hacheur survolteur (Boost) :

Le convertisseur Boost est connu par le nom d'élévateur de tension. Le schéma de la figure (2.12), représente le circuit électrique du Boost. Au premier temps (αT), le transistor (S) est fermé, le courant dans l'inductance croît progressivement, et au fur et à mesure, elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin de la première période. Ensuite, le transistor (S) s'ouvre et l'inductance (L) s'opposant à la diminution de courant (IL), génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge (R) à travers la diode (D).[21]

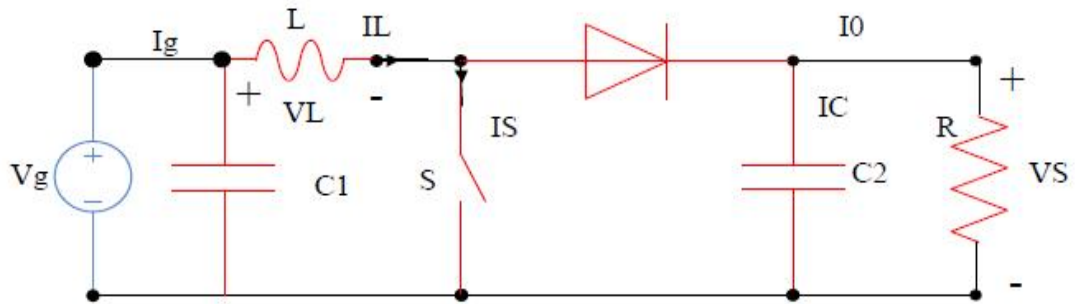


Figure (2.12) Circuit électrique de base du hacheur survolteur.

2.5.2 Hacheur dévolteur (Buck)

Le hacheur dévolteur, sous sa forme de base est présenté par la figure (2.13). Les composants clés sont l'inductance (L), le commutateur (Transistor) (S), la diode (D) et le condensateur (C).

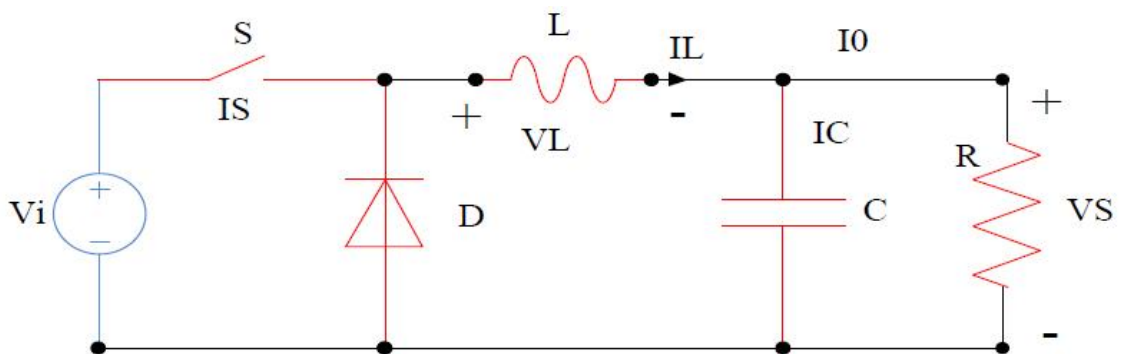


Figure (2.13) Circuit électrique de base du hacheur dévolteur.

Le commutateur peut être un transistor MOSFET ou un IGBT qui peut se commuter sur deux positions, marche ou arrêt rapidement. La tension de la source doit être plus grande que la tension aux bornes de la charge.

2.5.3 Le convertisseur Buck-Boost

La troisième topologie de base de ce convertisseur est donnée par la figure (2.14). Dans ce dispositif, la tension peut être augmentée ou diminuée selon le mode de commutation. Cependant, La tension de sortie est de signe opposé à la tension d'entrée. Tandis que, lorsque le transistor est sur la position (on) le courant dans l'inductance augmente, l'énergie est stockée ; et quand le commutateur tourne sur la position (off). La tension à travers l'inductance est renversée et l'énergie stockée se

transfert vers la charge via la diode. Dans ce cas, l'équation de la tension aux bornes de la charge décrivant le fonctionnement en conduction continue est donnée comme suit:

$$V_s = \frac{\alpha}{\alpha - 1} V_i \quad (2.19)$$

Le circuit électrique de base du hacheur dévolteur-survolteur, et les caractéristiques du courant et de la tension de charge sont données par la figure (2.15).

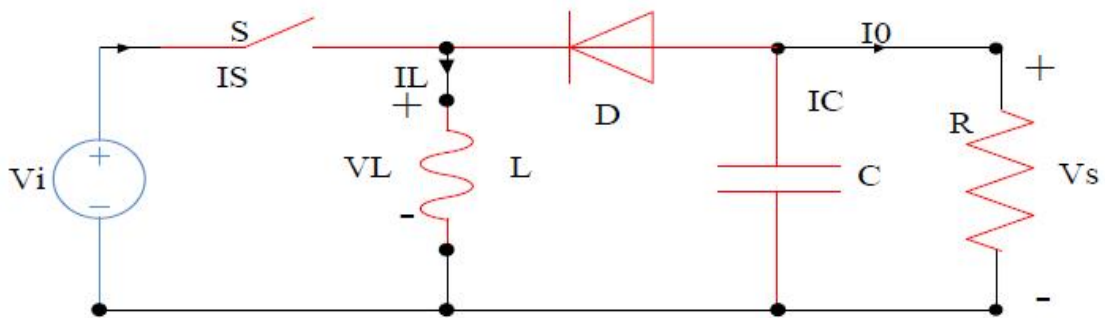


Figure (2.14).Circuit électrique de base du hacheur survolteur/dévolteur.

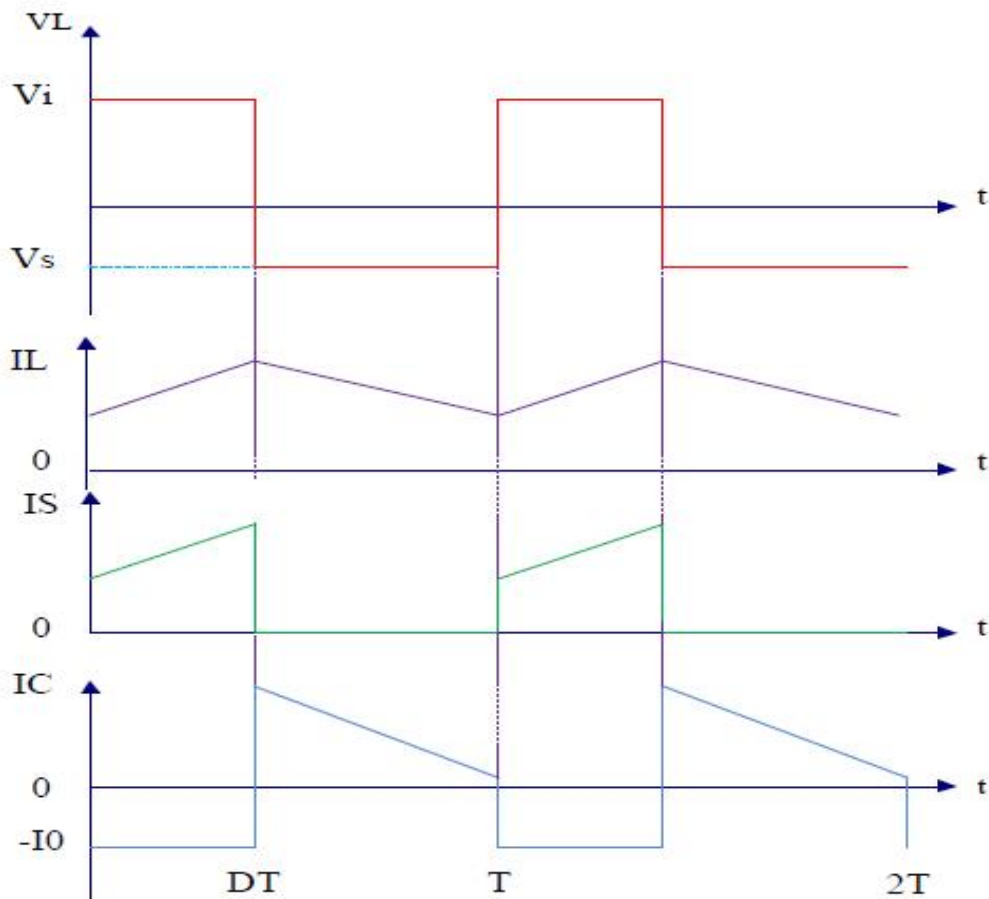


Figure (2.15) Caractéristique de la tension et du courant du Buck-Boost.

2.5.4 Modélisation de l'hacheur dévolteur-survolteur (buck-boost converter) :

Pour qu'un générateur photovoltaïque (PV) fonctionne dans les conditions optimales, il doit être doté d'un quadripôle d'adaptation. Cette adaptation se réalise en cherchant de façon automatique le point de puissance maximale (PPM) du générateur PV et ceci lorsque le système est placé dans un environnement où les conditions météorologiques (ensoleillement, température et charge) sont stables. Ce quadripôle peut être un convertisseur (continu/continu) : dévolteur - survolteur.

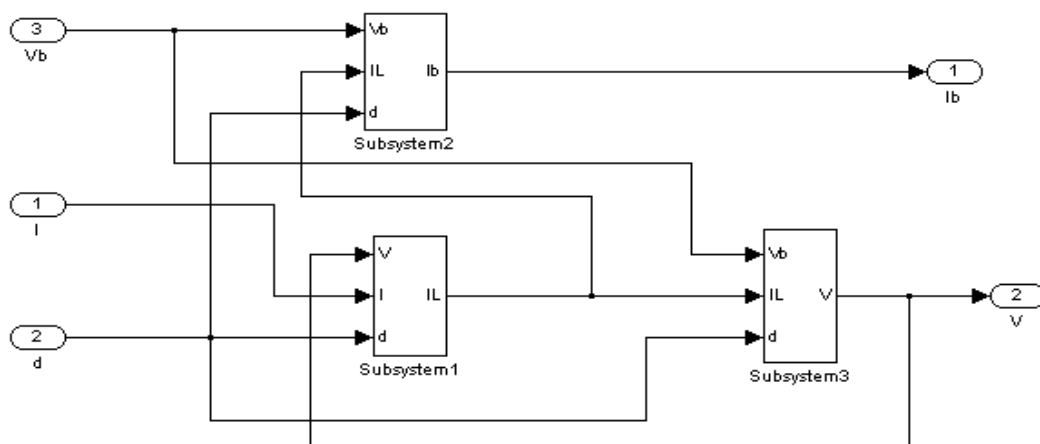


Figure (2.16): Le modèle Simulink du convertisseur (Buck boost).

2.6 Stockage d'énergie :

L'énergie électrique est une énergie qui ne peut être stockée qu'en faibles quantités.

Dans les systèmes isolés, des batteries sont souvent utilisées pour garantir l'équilibre production/consommation et pour lisser les variations de puissance.

Avant de passer à la description "modélisation de la batterie", il est utile de définir certaines notions sur les batteries.

Pour les systèmes isolés les batteries les plus couramment utilisées sont les batteries au plomb puisque leur rapport qualité-prix est satisfaisant et ont une capacité de stockage de longue durée (autodécharge faible).

Une batterie au plomb acide est un ensemble d'éléments de 2 volts, connectés en série pour obtenir la tension d'utilisation désirée. Ces éléments sont constitués de

plaques positives et négatives, assemblées en alternance. Ces dernières sont recouvertes de matières actives : dioxyde de plomb pour la positive et plomb spongieux pour la négative [22].

Ces électrodes plongent dans une solution d'acide sulfurique, la quantité de matières formées donne une capacité plus ou moins grande.

La capacité énergétique de la batterie, exprimée en wattheures « Wh » dépend de la quantité et de la nature des éléments chimiques présents dans la cellule [22].

La figure (2.17) représente une cellule électrochimique de base.

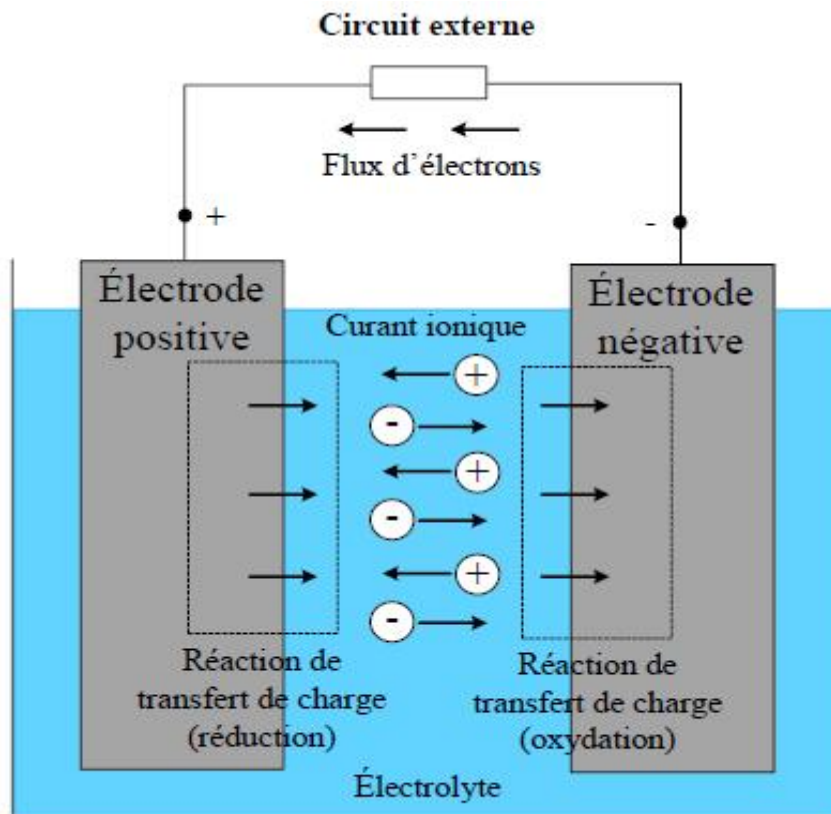


Figure (2.17) : Cellule électrochimique de base.

2.6.1 Modélisation de la batterie solaire :

On propose un modèle de circuit équivalent pour une batterie d'acide de plomb, une description mathématique donnée sous la forme d'une fonction de transfert comme suit [23] :

$$Z(s) = \frac{s^2 a_2 + s a_1 + a_0}{s^2 b_2 + s b_1 + b_0} \quad (2.20)$$

Pour la simulation cette équation a été représentée par un bloc simple de fonction de transfert qui accepte les coefficients des polynômes donnée directement (coefficients semi-empiriques).

Le model de la capacité C_b donne la quantité d'énergie que peut restituer la batterie, elle a été déterminée après un calcul fais par le fabricant et les données spécifiées de cette batterie sont donnée par lui sont comme suit :

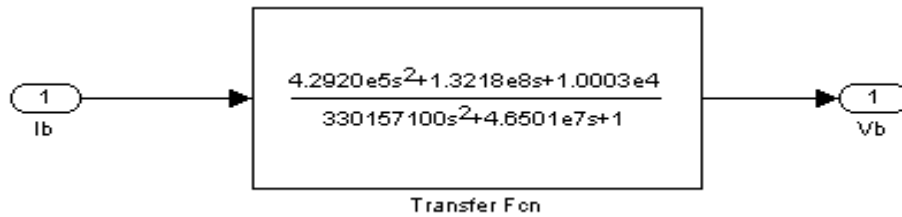


Figure (2.18): Schéma bloc de la batterie sous Simulink.

2.7 Simulation du système global :

Les opérations à effectuer dans le changement de l'environnement lors de la simulation sont :

- Les conditions STC.
- Changement de la température.
- Changement de l'insolation.

Le reste du système d'alimentation solaire à simuler comprend un panneau solaire de 36 cellules en série, un hacheur dévolteur-survolteur et une batterie.

2.7.1 Simulation du système avec contrôleur MPPT P&O :

2.7.1.1 Simulation dans les conditions (STC) :

Les deux figures au dessus présentent la simulation du système complet dans les conditions du test standard (STC) ; ou l'insolation égale 1000 W/m^2 et la température 25°C . Il s'agit de vérifier le comportement du contrôleur dans cet environnement.

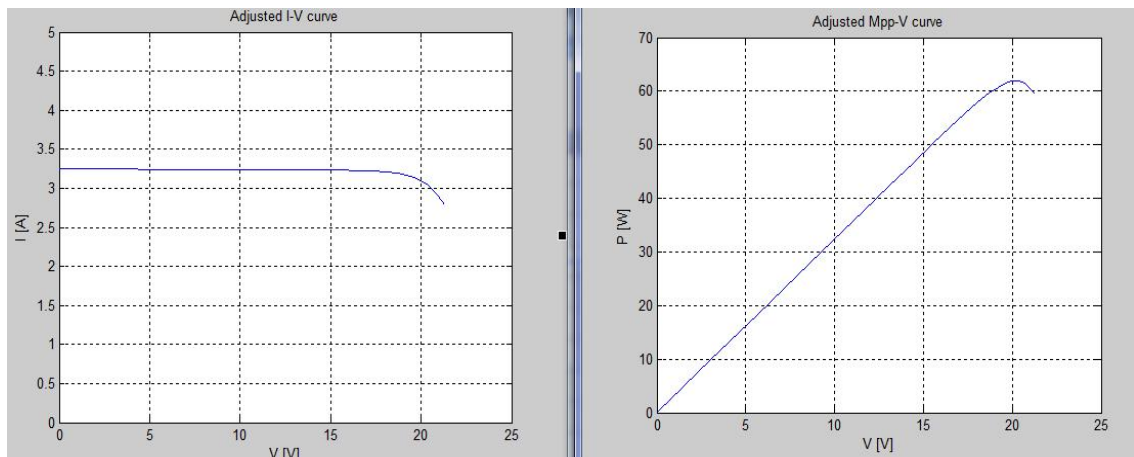


Figure (2.19): Résultats de la simulation dans les conditions STC

Les différentes grandeurs électriques (puissances, tensions et courants) se stabilisent autour des valeurs fixes:

- * La puissance fournie par le générateur PV se stabilise autour de 65 W
- * la tension et le courant se stabilisent respectivement autour de 21 V et 3.2 A;

2.7.1.2 -Simulation dans les conditions météorologiques variables :

1 - La température variable et l'insolation fixe :

Nous avons effectué une simulation où nous avons maintenu l'insolation constante au $1000W/m^2$ à différentes températures, on remarque que plus la température augmente plus la tension de circuit-ouvert diminue, par contre le courant photovoltaïque augmente légèrement

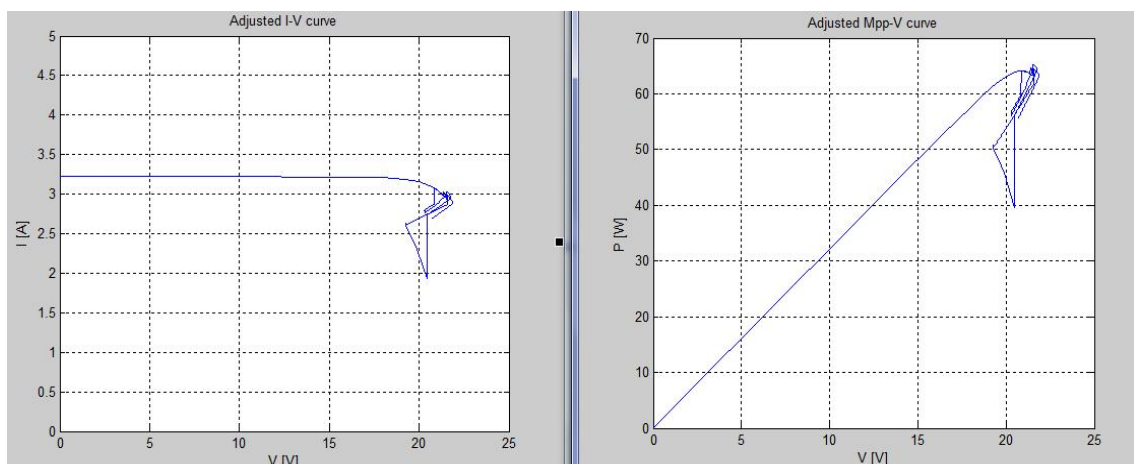


Figure (2.20) : Résultats de la simulation dans les conditions : E constant et T variable.

2- L'insolation variable et la température fixe :

Nous avons fait varier l'insolation en maintenant une température constante (au 25°C). La figure montre l'influence de l'irradiation sur la courbe I-V du module solaire. On remarque une légère augmentation de la puissance, et de la tension de circuit-ouvert.

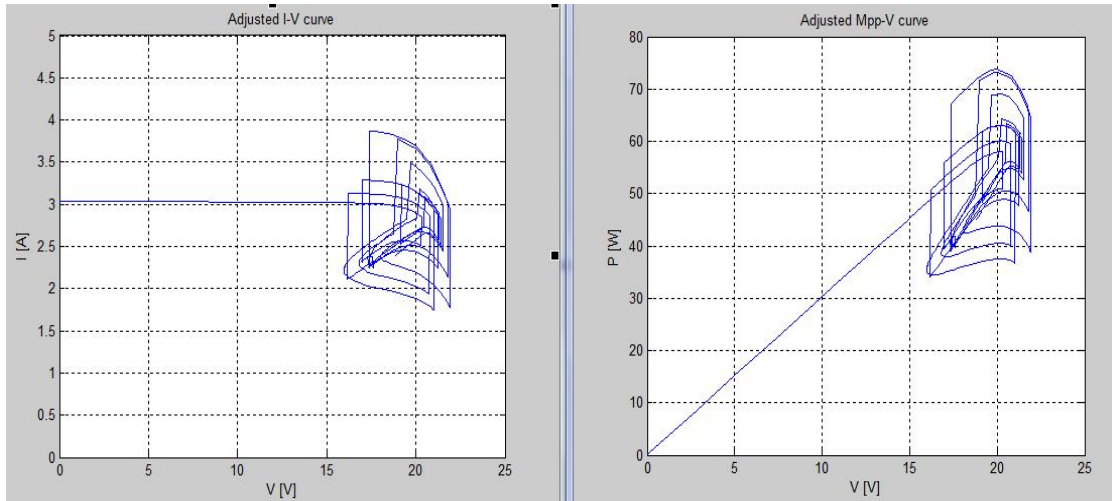


Figure (2.21): Résultats de la simulation dans les conditions : T constant et E variable.

3- Cas de changement de l'insolation et la température :

Dans ce cas on varie l'insolation et la température en même temps. On obtient les figures suivantes :

On remarque une légère augmentation de la puissance, et de la tension de circuit-ouvert.

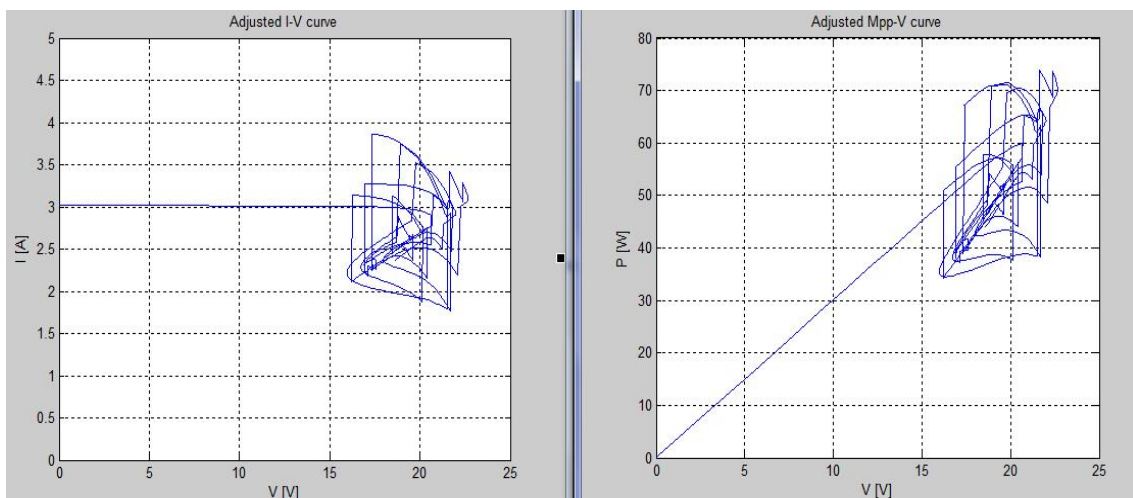


Figure (2.22): Résultats de la simulation dans les conditions : E variable et T variable.

4-Cas de Site réel de un jour de Tamanrasset (température insolation) :

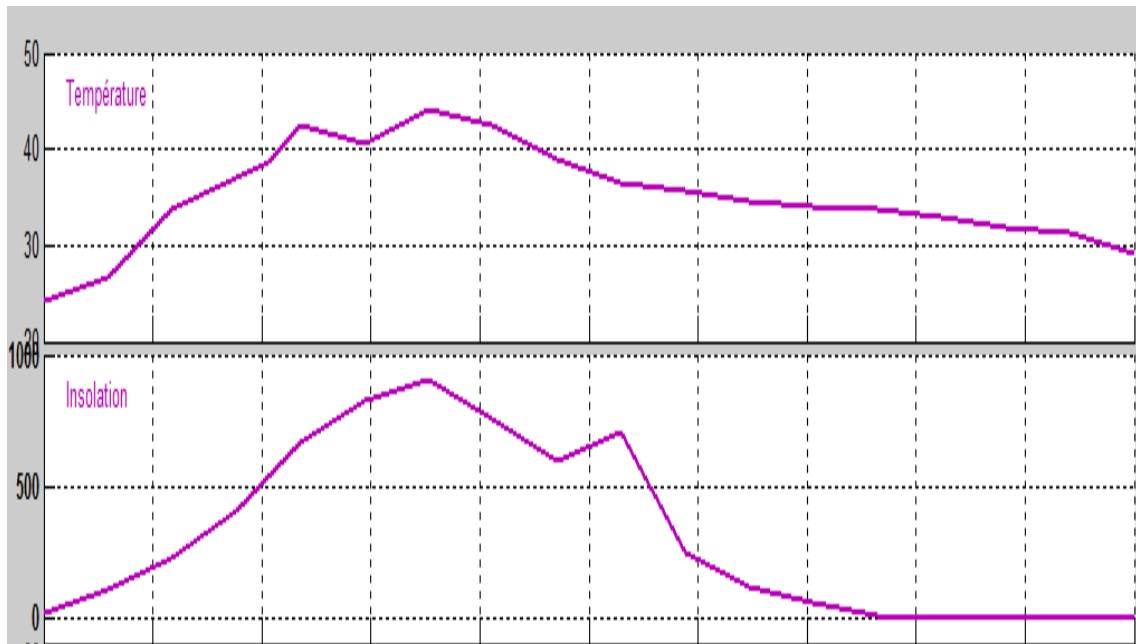


Figure (2.23): variation de température insolation par un jour.

❖ Résultats de la simulation :

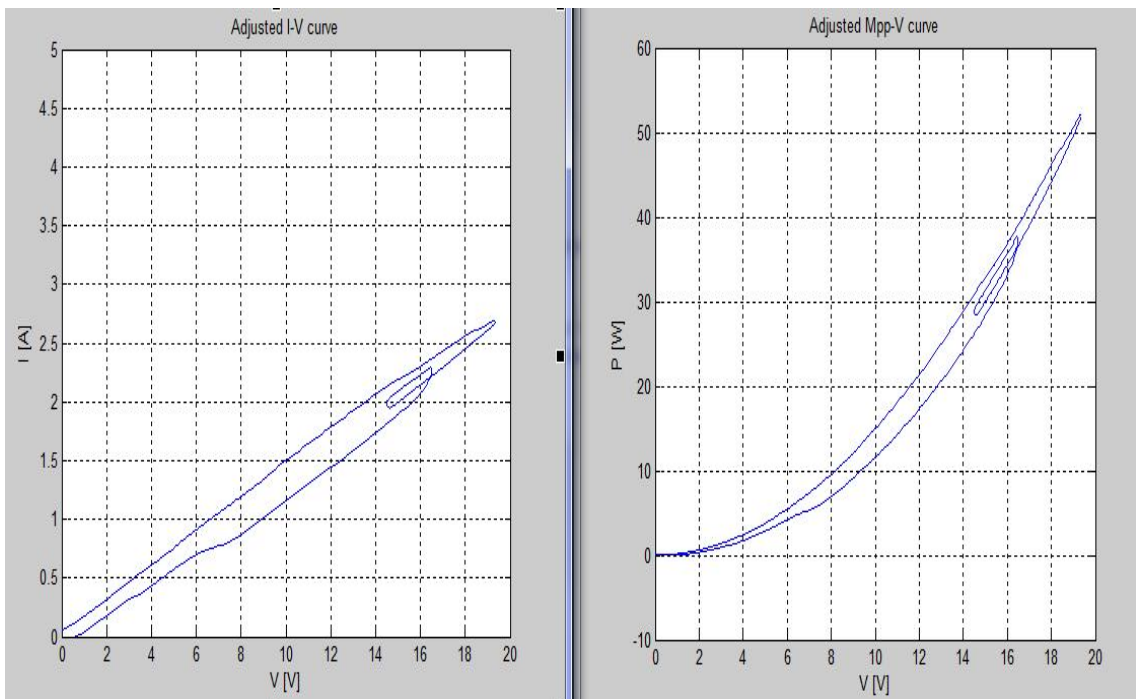


Figure (2.24): Résultats de la simulation dans le site réel.

2.8 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté les différents modèles du GPV, ensuite nous avons modélisé et simulé le modèle à deux exponentielles sous « Matlab/Simulink ».

A partir de la simulation nous avons montré l'influence des paramètres externes (température et ensoleillement) sur le GPV, puis nous avons constaté que les changements climatiques ont la plus grande influence sur le bon fonctionnement et le rendement de ce dernier.

En effet, la variation de l'éclairement et de la température modifie le point de puissance maximale ce qui réduit le rendement du GPV. Afin de faire fonctionner le GPV à son point de fonctionnement optimal, il est nécessaire de le doter d'un contrôleur MPPT (Maximum power point tracker) qui permet la poursuite du point PPM (Point de puissance maximale).

Chapitre 03

Dégradation des performances électriques avec le vieillissement



3.1 Introduction

L'influence de la dégradation de chacune des grandeurs physiques du modèle, à savoir l'augmentation de la résistance série, la diminution de la résistance shunt et celle de la transmissivité, est appréciée sur une durée de 20 ans correspondant à la durée de vie estimée des modules photovoltaïques. Les résultats sont présentés pour des conditions STC (éclairage incident de 1000 W.m^{-2} et température de cellule de 25°C).

3.2 Présentation de module Sharp NTS5E3E [25] :

Le module photovoltaïque **Sharp NTS5E3E** composé de 72 cellules en silicium monocristallin ($125.5 \text{ mm} * 125.5 \text{ mm}$) connectées en série, ayant une puissance maximal de 185 W est considéré. Ce module est protégé par une plaque en verre trempé transparent, une résine EVA, un film arrière imperméable et un encadrement en aluminium.

3-3. Dégradation de la transmissivité du verre et de l'EVA

Les caractéristiques courant-tension et puissance-tension en fonction des valeurs issues de la loi d'évolution de la transmissivité sont montrées par la figure (3.1)

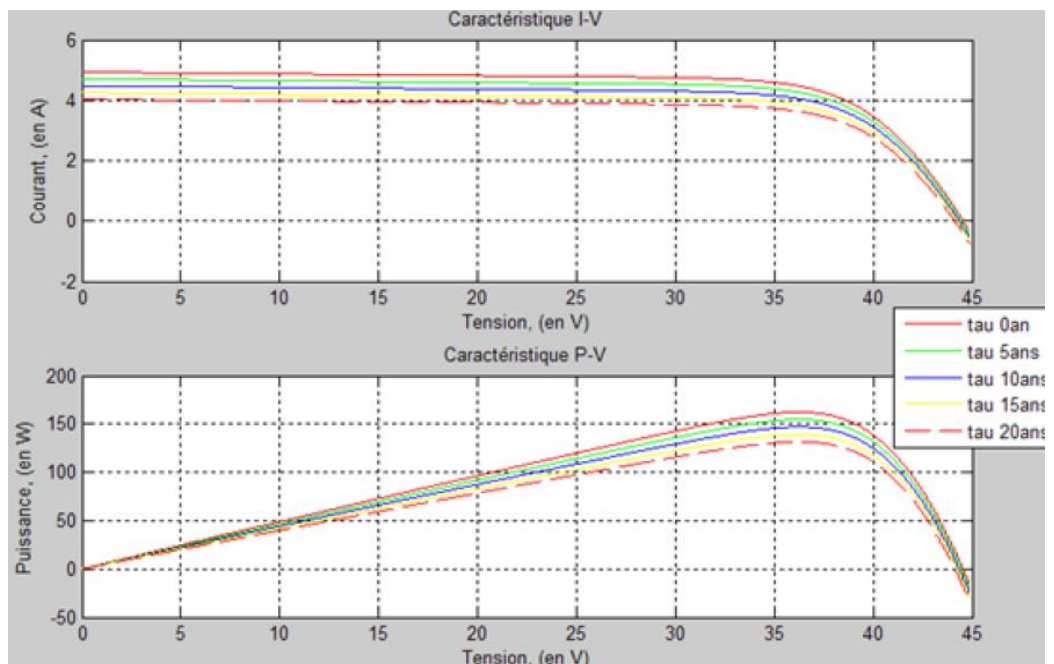


Figure (3.1) Caractéristiques I-V et P-V en fonction de la transmissivité.[25]

D'après La figure (3.1), on conclut que la transmissivité diminue pendant la durée de vie du panneau. Cette diminution de transmissivité conduit à une dégradation de la puissance maximale fournie de l'ordre de 19 % pendant les 20 ans de fonctionnement.

La durée de vie du module (année)	La valeur de la transmissivité(%)	La puissance(W)	Le rendement (%)
0 an	88	162.28	12.47
5 ans	84	154.64	11.8
10 ans	80	146.98	11.29
15 ans	76	139.30	10.70
20 ans	72	131.60	10.10

Tableau (3.1) : les valeurs des puissances et du rendement dans le cas dégradation de la transmissivité du verre et de l'EVA [25]

3-4. Dégradation de la résistance série

Les caractéristiques I-V et P-V en fonction des différentes valeurs de la résistance série issues de sa loi d'évolution sont données par la figure (3.2)

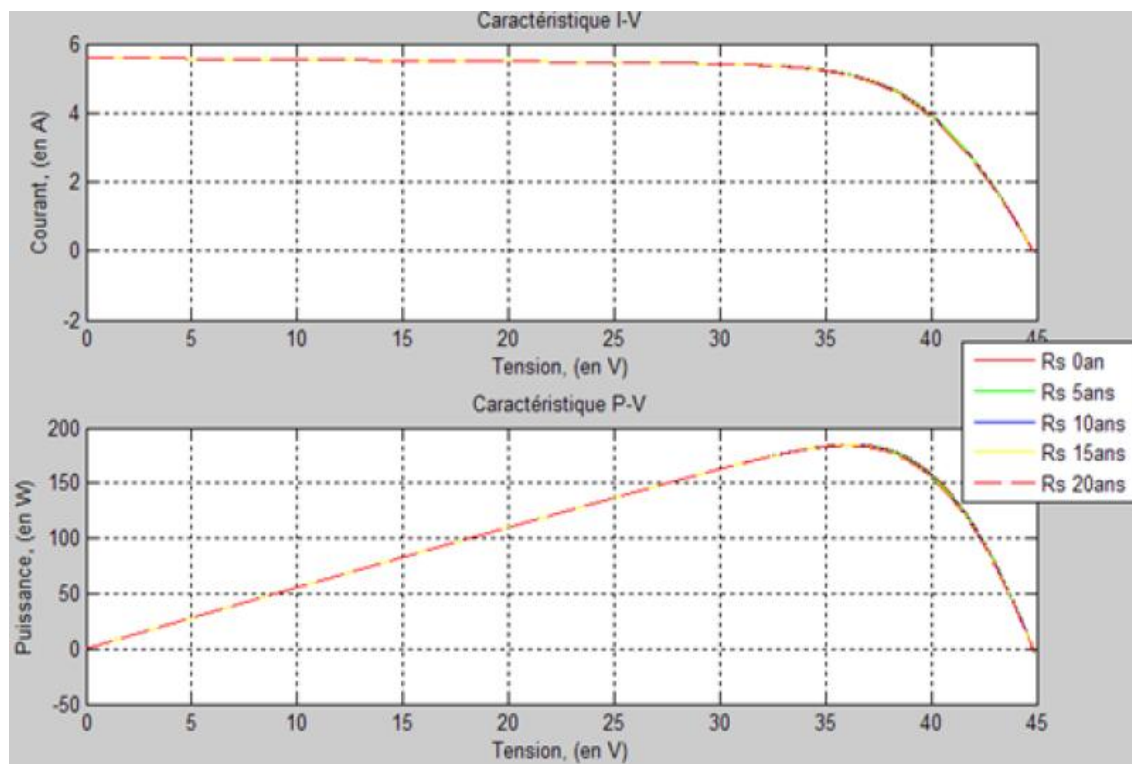


Figure (3.2) Caractéristiques I-V et P-V pour différentes valeurs de résistance série. [25]

On remarque que la résistance série augmente en fonction du temps (de la durée de vie du module). Cette augmentation de la résistance série provoque une diminution de la tension, donc de la puissance d'un taux de 0,65%

La durée de vie du module (année)	La valeur de la résistance série (Ω)	La puissance(W)	Le rendement (%)
0 an	0.525	185	14.22
5 ans	0.537	184.73	14.19
10 ans	0.549	184.43	14.17
15 ans	0.561	184.13	14.15
20 ans	0.573	183.83	14.13

Tableau (3.2) : les valeurs des puissances et du rendement dans le cas dégradation de la résistance série [25]

3.5. Dégradation de la résistance shunt

Les caractéristiques I-V et P-V en fonction des différentes valeurs de la résistance shunt issues de sa loi d'évolution sont données par la figure (3.3)

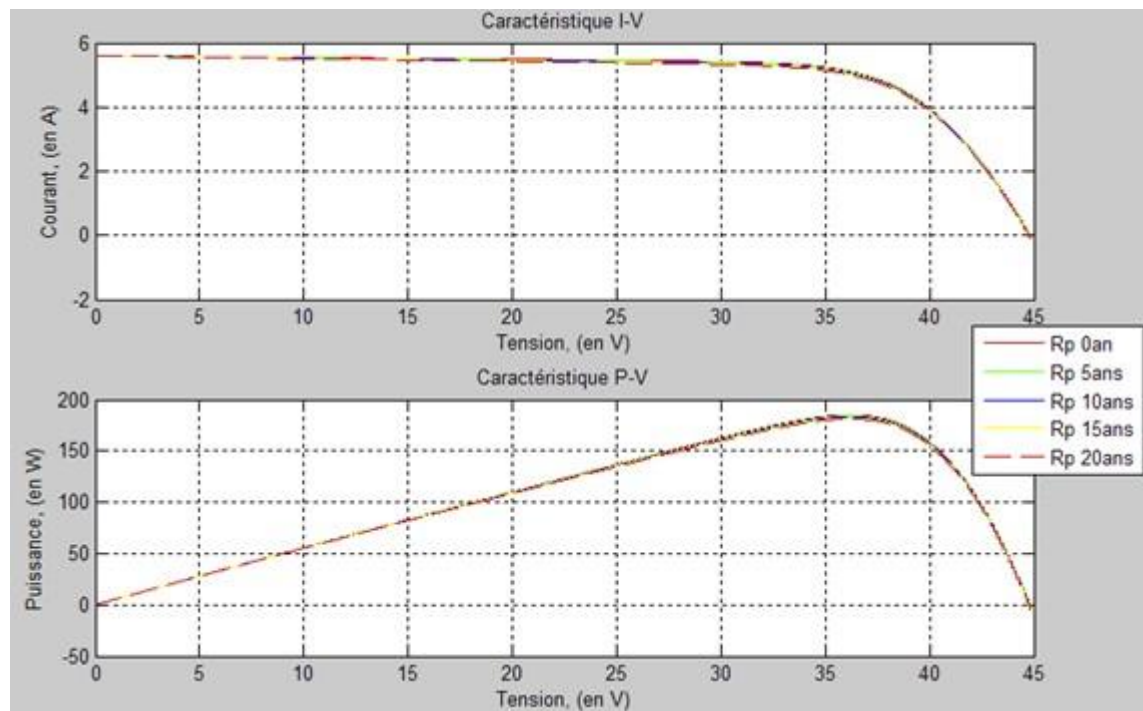


Figure (3.3) Caractéristiques I-V et P-V pour différentes valeurs de résistance shunt. [25]

Pendant la durée de vie du module, on remarque une diminution de la résistance shunt et du courant, qui à son tour fait baisser la puissance maximale d'environ 1,9%.

La durée de vie du module (année)	La valeur de la résistance shunt (Ω)	La puissance(W)	Le rendement (%)
0 an	182	185	14.22
5 ans	164.5	184.16	14.15
10 ans	150.1	183.3	14.08
15 ans	127.8	182.27	14.04
20 ans	117	181.35	13.93

Tableau (3.3) : les valeurs des puissances et du rendement dans le cas dégradation de la résistance shunt [25]

3-6. Dégradation avec les résistances série et shunt

Les caractéristiques I-V et P-V en fonction de la variation des deux résistances pendant la durée de vie du module sont données par la figure (3.4)

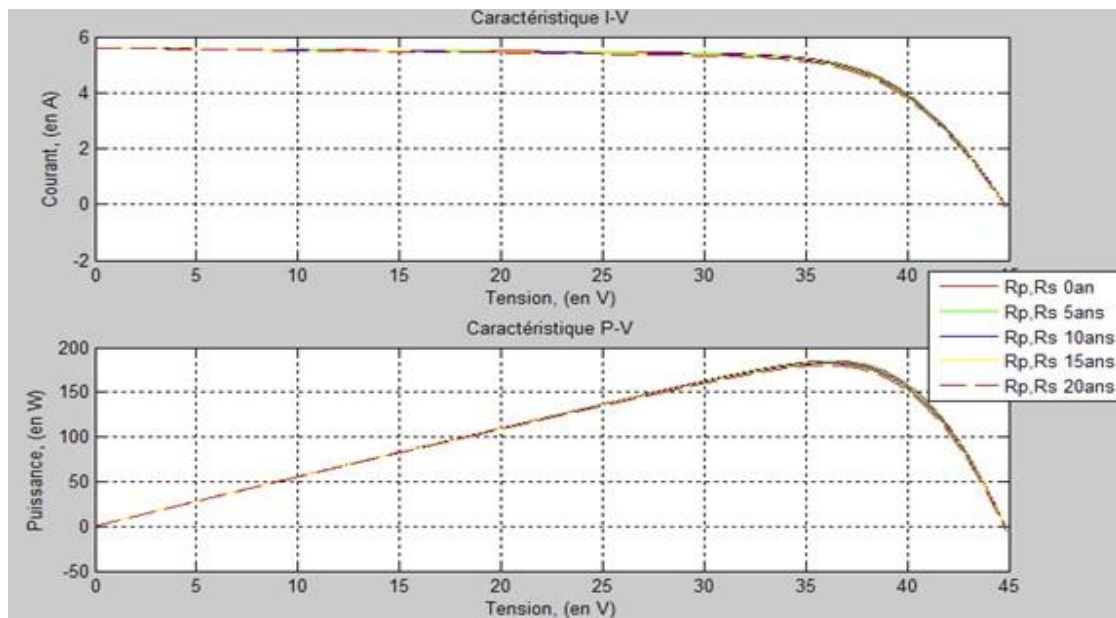


Figure (3.4) Caractéristiques I-V et P-V en fonction des deux résistances pour différents moments de la durée de vie du module. [25]

Avec le temps, la caractéristique courant-tension est abaissée mais relativement peu ainsi, la puissance ne se dégrade pas beaucoup avec le temps en fonction des

deux résistances d'environ 2,6% seulement pendant la durée de vie. Rappelons que ces résistances reproduisent l'altération des propriétés électriques au niveau du silicium et des électrodes.

La durée de vie du module (année)	La puissance(W)	Le rendement (%)
0 an	185	14.22
5 ans	183.87	14.13
10 ans	182.65	14.03
15 ans	181.41	13.94
20 ans	180.22	13.85

Tableau (3.4) : les valeurs des puissances et du rendement dans le cas dégradation avec les résistances série et shunt [25]

3-7. Dégradation globale de performance électrique

Les caractéristiques I-V et P-V du modèle global pour différents moments de la durée de vie du module en fonction des évolutions de R_s , R_p et τ en même, soit toutes les dégradations, sont montrées figure (3.5)

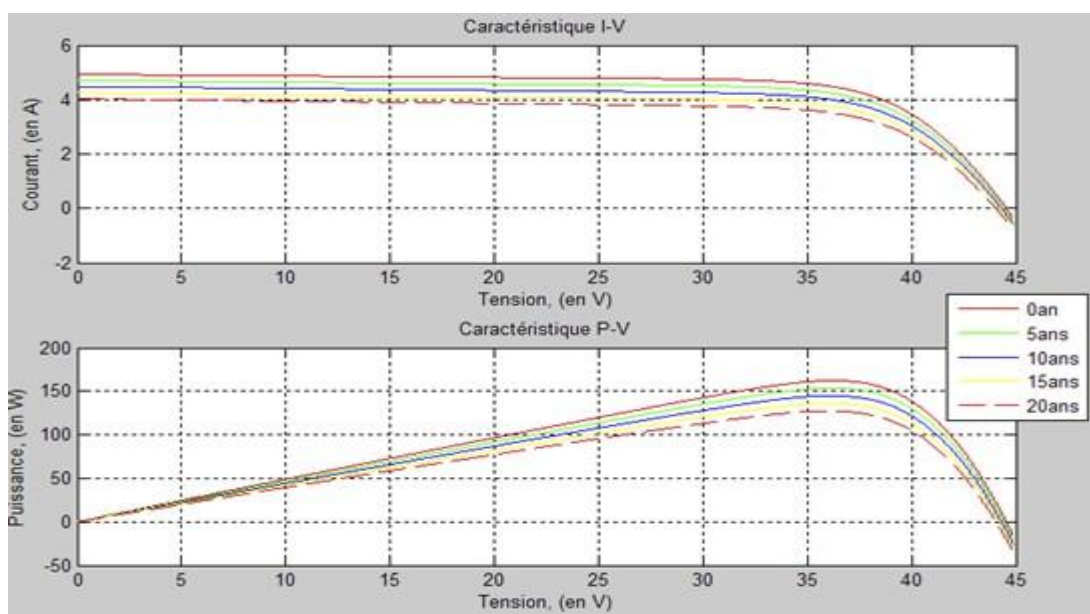


Figure (3.5) Les courbes I-V et P-V du model global pour différents moments de la durée de vie du module. [25]

La caractéristique courant-tension est bien plus abaissée en précisant

l'influence de la dégradation de la transmission du rayonnement incident à la jonction PN en silicium.

L'obscurcissement du verre, le brunissement de l'EVA et l'apparition de bulles avec le temps sont grandement responsables de cette baisse de puissance estimée ici à 21% pour les 20 ans.

La durée de vie du module (année)	La puissance(W)	Le rendement (%)
0 an	162.28	12.47
5 ans	153.56	11.80
10 ans	144.79	11.13
15 ans	136.01	10.45
20 ans	127.28	9.78

Tableau (3.5) : les valeurs des puissances et du rendement dans le cas dégradation globale de performance électrique [25]

3-8. Représentation de la dégradation du rendement

Pour valoriser nos résultats, on propose de quantifier et de montrer la baisse du rendement. Pour cela, on propose de déterminer le rendement pour chaque caractéristique courant-tension. L'évolution du rendement du module pendant toute sa durée de vie en fonction de la transmissivité, des résistances série et parallèle ainsi que la dégradation globale est indiquée figure (3.6).

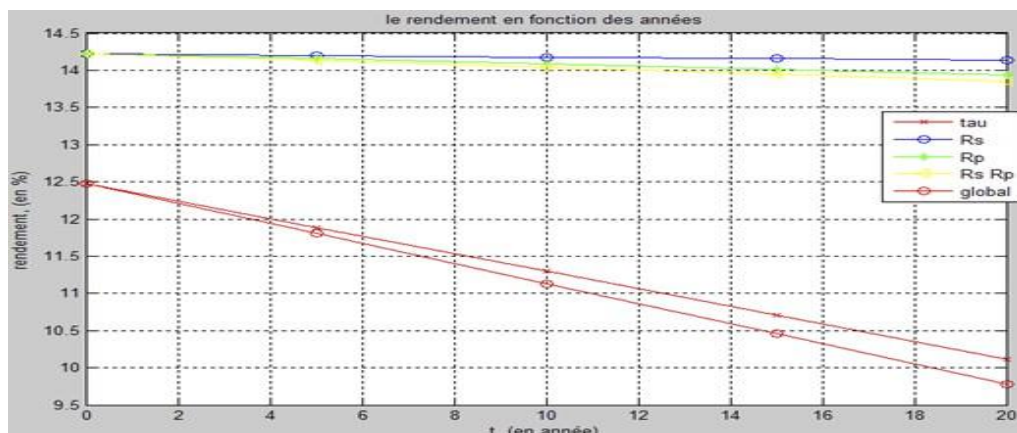


Figure (3.6) La dégradation du rendement du module pendant toute sa durée de vie en fonction de la transmissivité, des résistances série et parallèle ainsi que la dégradation globale.

[25]

Pendant la durée de vie du module estimé de 20 ans, le rendement subit une diminution d'environ 2,7%. Cette baisse du rendement est principalement due à la dégradation de la transmissivité. Une diminution relativement faible, quelques dixièmes de pourcent, est distinguée en fonction de la résistance série et shunt causée par l'altération des propriétés électrique

3-9 Résultats de simulation de notre panneau :

- Le module photovoltaïque est composé de 36 cellules en série de :
 - la tension de circuit ouvert $V_{co} = 24.68 \text{ V}$,
 - le courant de court-circuit $I_{cc} = 3.248 \text{ A}$,
 - le point de la puissance maximale PPM = 61.84W,
 - le courant pour lequel la puissance est maximale $I_m = 3.06 \text{ A}$,
 - la tension pour laquelle la puissance est maximale $V_m = 20.20 \text{ V}$.

1 er cas : $R_s = 15 \cdot 10^{-3} \Omega$ $R_p = 30 \Omega$ $P_m = 61.84 \text{ W}$

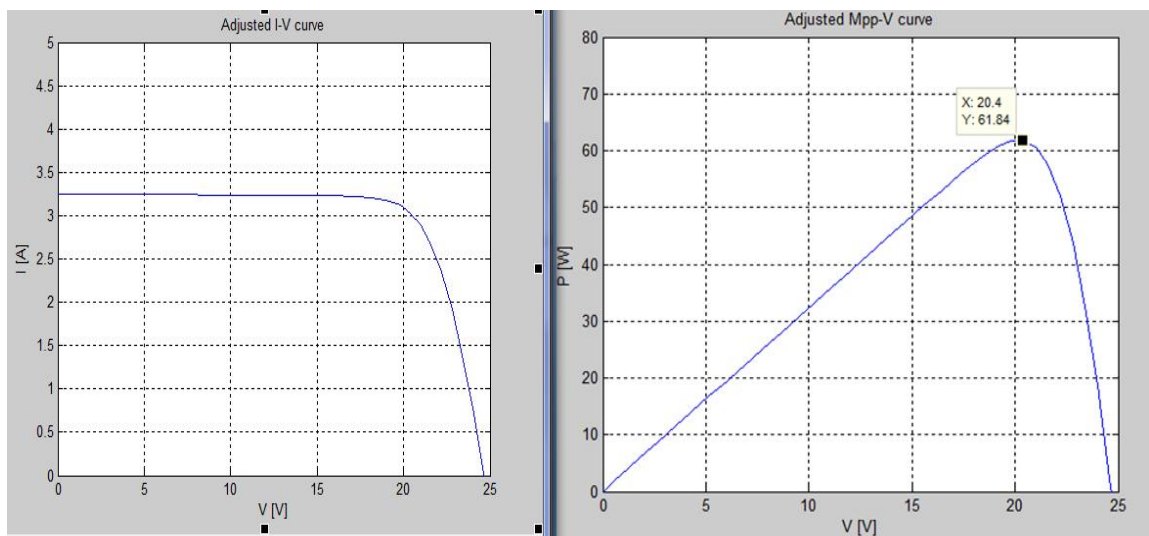


Figure (3.7) : Résulta de simulation dans le cas standard

2eme cas : Dégradation de la résistance série

$R_s = 25 \cdot 10^{-3} \Omega$ $R_p = 30 \Omega$ $P_m = 61.82 \text{ W}$

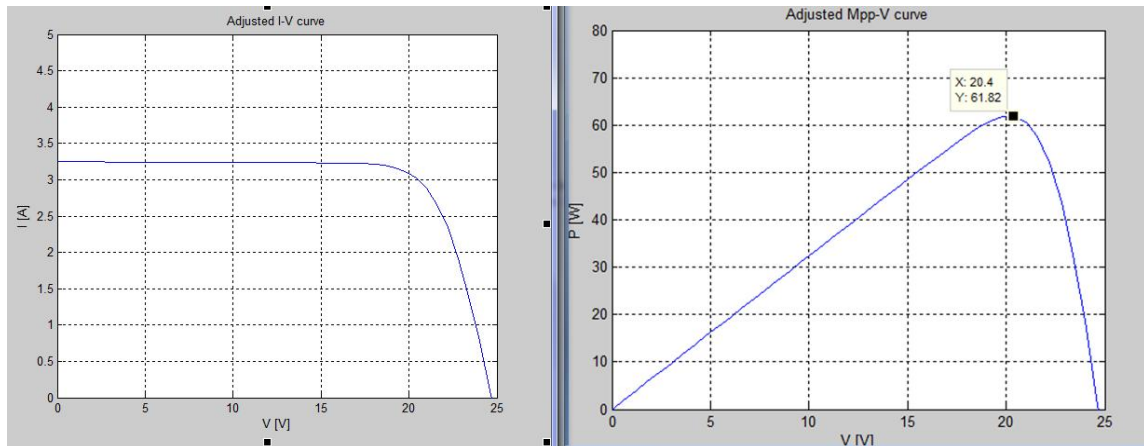


Figure (3.8) : Résulta de simulation dans le cas de dégradation de la résistance série

On remarque que si on augmente la résistance série (dégradation) de $15 \cdot 10^{-3} \Omega$ à $25 \cdot 10^{-3} \Omega$, la puissance délivré par le panneau passe de 61.84 W à 61.82 W. Cette augmentation de la résistance série provoque une diminution de la tension, donc de la puissance d'un taux de 0,03% par panneau.

3eme cas : Dégradation de la résistance shunt

$R_s = 15 \cdot 10^{-3} \Omega$; $R_p = 20 \Omega$; $P_m = 61.65 \text{ W}$

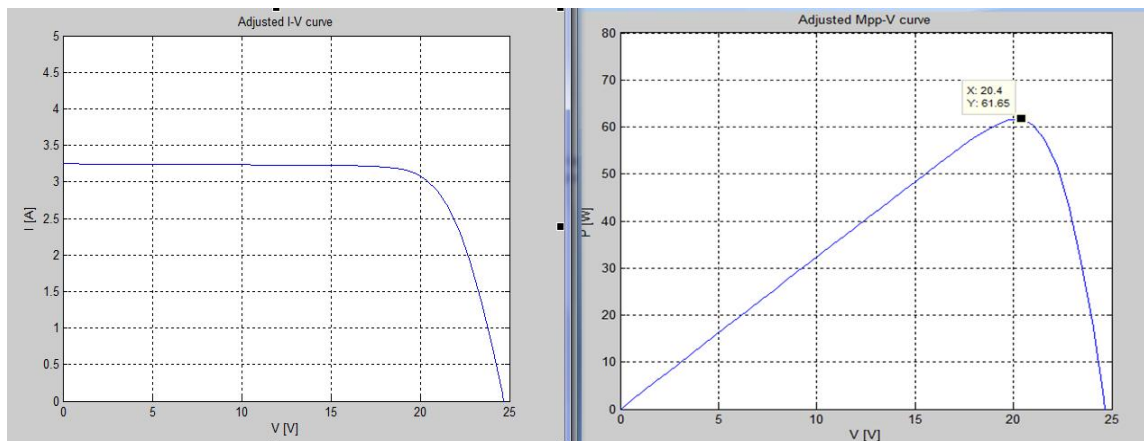


Figure (3.9) : Résulta de simulation dans le cas de dégradation de la résistance shunt

On remarque que si on diminue la résistance shunt (dégradation) (de 30Ω à 20Ω) la puissance délivré par le panneau diminue (de 61.84 W à 61.65 W).

4eme cas : Dégradation des résistances shunt et série

$$R_s = 25 \cdot 10^{-3} \Omega ; R_p = 20 \Omega ; P_m = 61.62 \text{ W}$$

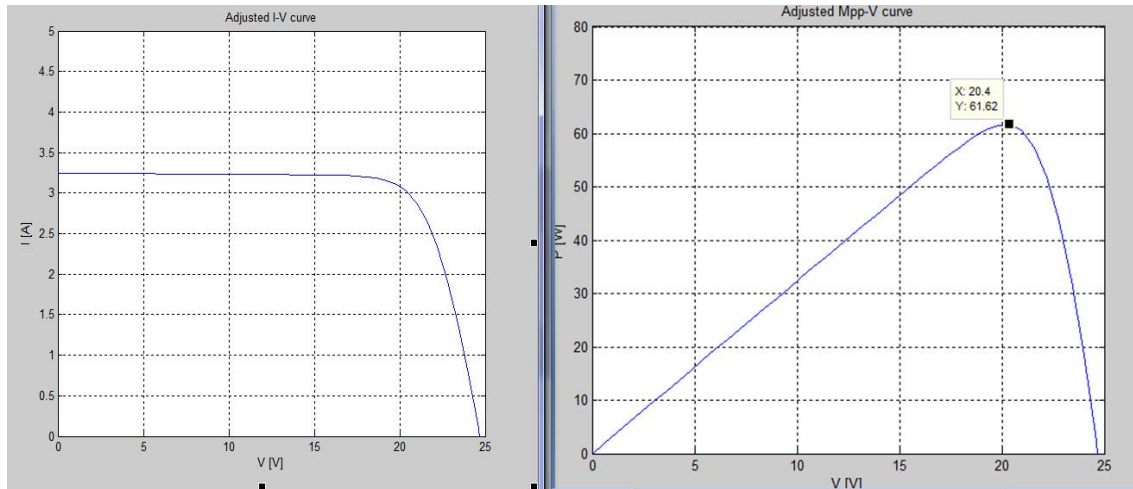


Figure (3.10) : Résulta de simulation dans le cas de dégradation des résistances shunt et série

Et quand on augmente la résistance série et diminue la résistance shunt (dégradation) la puissance délivré par le panneau diminue (de 61.84 W à 61.62 W). Soit un taux de 0.35%.

3.10 Conclusion

L'objectif de cette étude était de comparer l'influence du vieillissement des parties du module permettant la conversion photovoltaïque et celles assurant l'encapsulation sur la performance de production d'électricité.

La diminution de la transmissivité des matériaux d'encapsulation (verre et EVA) dégrade significativement la puissance produite sur 20 ans d'utilisation. Les résistances série et parallèle changent pendant la durée de vie et provoquent une diminution relativement faible de la puissance.

L'estimation réalisée ici montre que le point de puissance maximale est diminué d'environ 20% après 20 ans de fonctionnement. Ce modèle, relativement simple, permet de prédire le comportement du vieillissement des panneaux photovoltaïque et d'estimer la baisse de leurs performances.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le monde de l'énergie photovoltaïque, aussi bien au niveau de la recherche qu'au niveau de l'industrie connaît depuis quelques années une mutation profonde associée à l'intérêt croissant pour cette source d'énergie. Une industrie majeure est en cours de constitution comme le montre l'analyse de la situation et des évolutions. De façon intéressante et exemplaire, les possibilités d'innovation sont très grandes, portées par le bouillonnement des recherches en vue d'améliorer les filières et les technologies de convertisseurs existantes, et d'en consolider de nouvelles.

Le travail effectué dans le cadre de ce projet de fin d'études nous a permis d'étudier et de simuler le fonctionnement d'un système photovoltaïque face aux variations climatiques. On a donc, commencé par des généralités sur le générateur photovoltaïque dans le but d'étudier le fonctionnement et modéliser le système.

Dans le chapitre 02, Le model développé du système PV nous a permet de faire varier à volonté les paramètres météorologiques pour obtenir toutes les propriétés électriques du système photovoltaïque. L'ensemble des résultats obtenus dans la simulation montre que le convertisseur Continu-Continu et la commande MPPT effectuent correctement leurs rôles. La commande MPPT adapte le générateur PV à la charge pour un transfert de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

Le fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque, est étroitement lié aux conditions climatiques d'une part et à la charge utilisée d'autre part. Concernant les conditions climatiques, le panneau doit être placé dans une localité à forte insolation de sorte à extraire le maximum de puissance tout en tenant compte que l'augmentation de la température ambiante diminue le rendement du module.

Quant au chapitre 03 nous nous somme intéressé à l'influence des paramètres électriques (résistances série et shunt) et optique (transmissivité). En effet, l'altération des propriétés électriques engendre une perte de performance faible, le rendement ne diminuant que de quelques dixièmes de pourcent en 20 ans. Par contre, la réduction significative de la transmissivité due à l'altération du verre et de l'EVA (éthylène-vinyle-acétate) résulte en une baisse élevée, du rendement du module photovoltaïque.

Références

- [1] **Daniel LINCOT**, « La conversion photovoltaïque de l'énergie solaire », Découverte N° 344-345, Janvier-Février 2007, France.
- [2] **A. BELHAOUA** simulation et prise en charge des défauts des régulateurs photovoltaïques. Thèse d'ingénieur d'état en électronique. USTHB 2004.
- [3] **M. OUSAID**, « *Optimisation d'un Générateur Photovoltaïques par Réseaux de Neurones Artificiels : Application au Pompage Photovoltaïques* », Mémoire de Fin d'Études, École Nationale Polytechnique d'Alger, 2008.
- [4] **T. OBEIDI**, « *Commande des hacheurs MPPT par logique floue* », Mémoire de Magister, École Nationale Polytechnique d'Alger, 2006.
- [5] **O. THAMEUR**, « *Application des algorithmes génétiques dans la commande des hacheurs MPPT* », Mémoire de Magister, École Nationale Polytechnique d'Alger, 2006.
- [6] W. PALZ, « *L'électricité Solaire* », Dunod Unesco, Paris, France, 1981.
- [7] **B. Azoui** «Concept and realization of three-phase brushless DC motor (BLDCM) for solair application », Thesis docteur d'état Es-science, May 2002, university of Batna.
- [8] colloque national sur l'énergie solaire CNESOL 2006
- [9] Article de **M.Belmili Hocine** « Dimensionnement d'un system hybride PV/ éolien. » Unité de Développement des Équipements Solaires (UDES).
- [10] **Y. Pankow**, " Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension. Application au générateur photovoltaïque", Thèse de Doctorat de L'Ecole Doctorale de L'ENSAM ED432, 2004
- [11] " Énergie photovoltaïque " Guide d'énergie renouvelable 2002.
- [12] **J. Royer, T. Djiako** " Le pompage photovoltaïque", Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, Institut de l'Énergie des Pays ayant en commun l'usage du Français, Québec CANADA.
- [13] **Luc Chancelier**-Eric Laurent« électricité photovoltaïque »Collection 'Le point sur'
- [14] **M. ARROUF**, « Optimisation de l'ensemble onduleur, moteur et pompe branché sur un générateur photovoltaïque », Thèse de Doctorat, Université Mentouri de Constantine, 2006.

- [15] **J.M. KOO**, «*Development of a flat-plate solar collector design program*», Master Thesis, University of Wisconsin, 1999.
- [16] **H. HADI**, «*Photovoltaic water pump system*», PhD thesis university of Kochi, 2003.
- [17] **S.ABADA** ' Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur sepic', Mémoire Maître es Sciences, Université Laval, 2011.
- [18] **C. CABAL** 'Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque ', Thèse de doctorat université de Toulouse III ,2008.
- [19] **V.Boitier, P. Maussion, C. CABAL** 'Recherche du maximum de puissance sur les générateurs photovoltaïques', université de Toulouse, revue 3E.I, N°54, pp 90-96, septembre 2008.
- [20] **A. Lyes**, "Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque," UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU Mémoire de Magister, 2011.
- [21] **A.Saadi**, "Etude comparative entre les techniques d'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque," Université de Biskra Mémoire de Magister, 2000.
- [22]**Mme.OBEIDI**, "Commande des hacheurs MPPT par logique floue", École Nationale Polytechnique Mémoire de Magister, 2006.
- [23] **Ionel Vechiu**, « Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome », Thèse de Doctorat, Université du Havre, Décembre 2005.
- [24] **K.Amellel –K.Laroussi** « Optimisation de fonctionnement du générateur Photovoltaïque : réalisation et simulation d'un MPPT a base du microcontrôleur pic 16f877a »PFE 2008, université de Blida.
- [25] **Radhia DOUMANE** « Modélisation du vieillissement d'un module Photovoltaïque » Mémoire de Magister juin 2011