

République Algérienne Démocratique et Populaire

**Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la
Recherche Scientifique**



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued



FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies




Filière : Génie mécanique

Spécialité : Énergétique

Thème

**Modélisation et simulation d'un générateur
photovoltaïque**

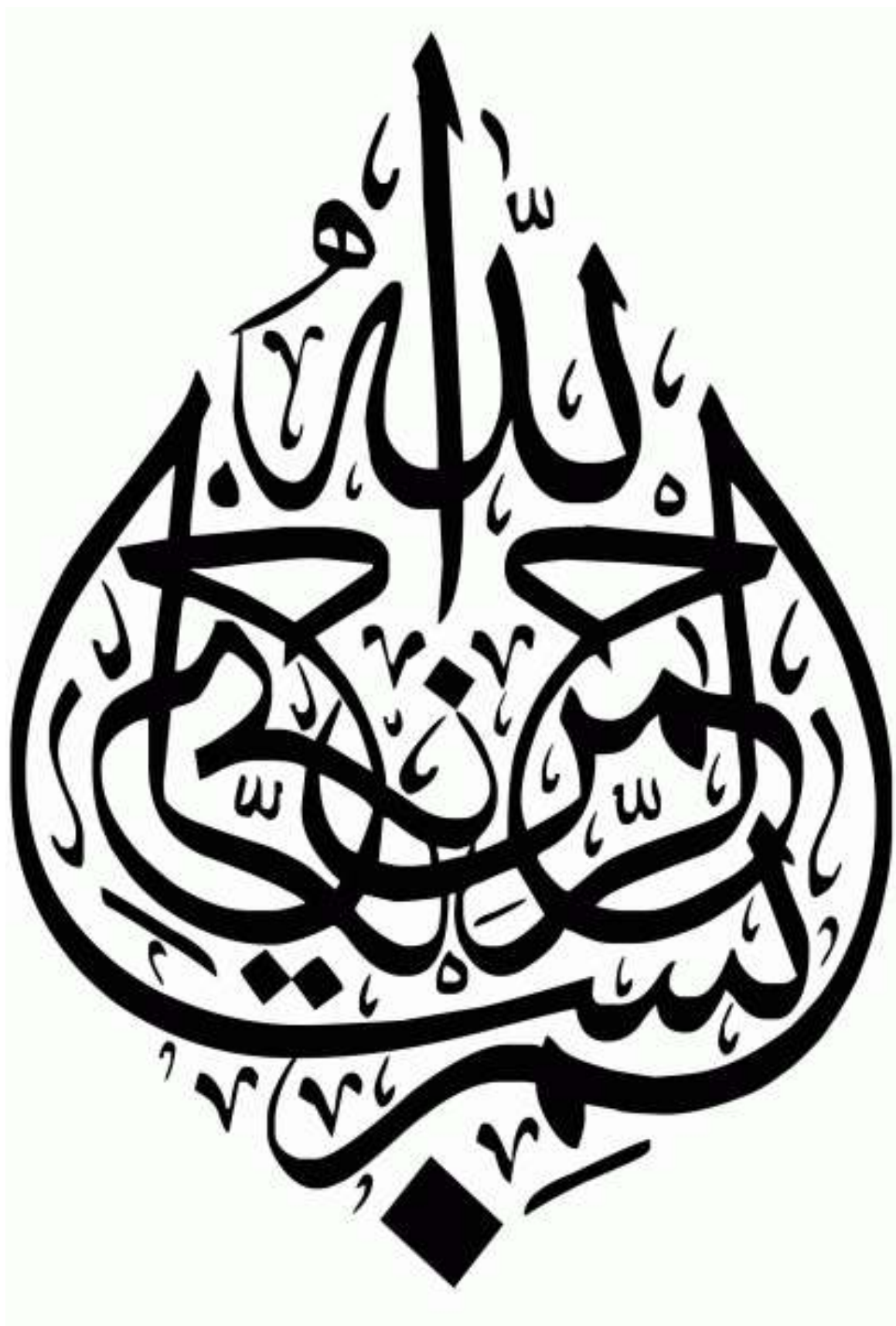
Réalisé par :

-  **DRIHEM Abdelfattah**
-  **HAMMAD Mohammed Taher**
-  **TOUAHRIA Abdelatif**

Encadré par :

Dr. LAOWAMER Mosbah

Année Universitaire 2020/2021



Remerciements

Tout d'abord, je remercie dieu -ALLAH- de tout puissant de m'avoir donné le courage et

la patience durant toutes ces années d'études.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude et mes sincères remerciements à Monsieur

Dr : LAOWAMER Mosbah, Docteur à L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued, pour avoir dirigé ce travail.

Mes sincères remerciements aux messieurs les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en participant au jugement de ce travail.

Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont aidé à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous aidés de près ou de loin à accomplir ce travail.

En fin je remercie tout particulièrement mes parents, pour leur soutien inconditionnel tout au long de ces longues années d'études.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

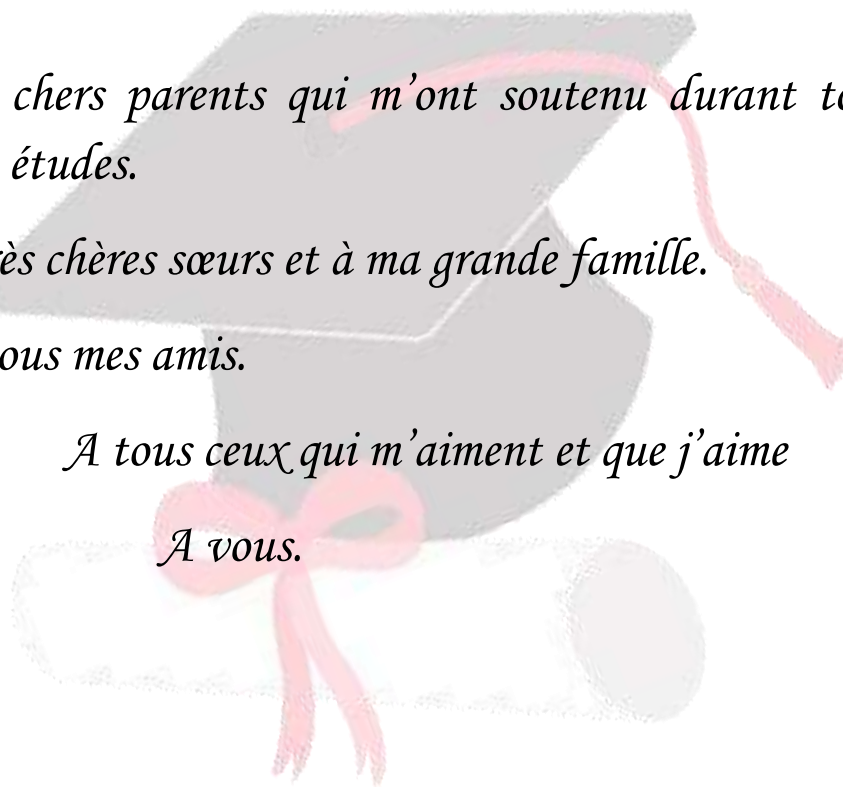
A mes très chers parents qui m'ont soutenu durant toute la durée de mes études.

A mes très chères sœurs et à ma grande famille.

A tous mes amis.

A tous ceux qui m'aiment et que j'aime

A vous.



Résumé

Résumé

Le système photovoltaïque PV composé de modules est considéré comme l'unité de conversion de puissance fondamentale d'un système de générateur PV. Le générateur photovoltaïque a des caractéristiques non linéaires, des modèles courants et simples de panneaux solaires ont été développés et intégrés à de nombreux logiciels d'ingénierie, notamment Matlab/Simulink. Cependant, ces modèles ne sont pas adaptés aux applications impliquant un système énergétique hybride car ils nécessitent un réglage flexible de certains paramètres du système et ne sont pas facilement compréhensibles pour les lecteurs eux-mêmes.

En outre, il est également avantageux pour étudier le fonctionnement du générateur photovoltaïque à partir de différentes conditions de travail (température variable, irradiation).

Par conséquent, ce travail présente une procédure étape par étape pour la simulation de cellules/modules avec les outils Tag dans Matlab/Simulink. Un panneau solaire 1STH-215-P est utilisé comme modèle de référence.

Mots clés : module photovoltaïque, MATLAB Simulink, caractéristiques PV, configuration du module.

Abstract

The photovoltaic PV system composed of modules is considered to be the fundamental power conversion unit of a PV generator system. The photovoltaic generator has non-linear characteristics, common and simple models of solar panels have been developed and integrated into many engineering software, including Matlab / Simulink. However, these models are not suitable for applications involving a hybrid energy system as they require flexible adjustment of certain system parameters and are not easily understood by the readers themselves.

In addition, it is also advantageous to study the operation of the photovoltaic generator from different working conditions (variable temperature, irradiation).

Therefore, this work presents a step-by-step procedure for simulating cells / modules with Tag tools in Matlab / Simulink. A 1STH-215-P solar panel is used as a reference model.

Keywords: photovoltaic module, MATLAB Simulink, PV characteristics, module configuration..

الملخص

يعتبر النظام الكهروضوئي المكون من وحدات وحدة تحويل الطاقة الأساسية لنظام المولد الكهروضوئي. يتميز المولد الكهروضوئي بخصائص غير خطية ، وقد تم تطوير نماذج مشتركة وبسيطة من الألواح الشمسية ودمجها في العديد من البرامج الهندسية ، بما في ذلك Matlab / Simulink. ومع ذلك ، فإن هذه النماذج ليست مناسبة للتطبيقات التي تتضمن نظام طاقة هجيناً لأنها تتطلب تعديلاً مرئياً لمعاملات نظام معينة ولا يسهل فهمها من قبل القراء أنفسهم. بالإضافة إلى ذلك ، من المفيد أيضاً دراسة تشغيل المولد الكهروضوئي من ظروف عمل مختلفة (درجة حرارة متغيرة ، تشعيع).

لذلك ، يقدم هذا العمل إجراءً خطوة بخطوة لمحاكاة الخلايا / الوحدات باستخدام أدوات العلامات في Matlab / Simulink. يتم استخدام الألواح الشمسية STH-215-P1 كنموذج مرجعي.

الكلمات المفتاحية: الوحدة الكهروضوئية ، MATLAB Simulink ، الخصائص الكهروضوئية ، تكوين الوحدة.



*Table
des
Matières*

Sommaire

Remerciement

Dédicace

Résumé

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction Générale

A

CHAPITRE I: Généralité sur le photovoltaïque

I.1. Introduction	1
I.2. L'énergie solaire	1
I.3. Principes de calcul de l'énergie solaire	3
I.3.1. La latitude (f)	3
I.3.2. La longitude (l)	3
I.3.3. L'altitude	3
I.3.4. La déclinaison (δ)	3
I.3.5. Le temps solaire vrai (TSV)	4
I.3.6. La durée et le taux d'insolation	4
I.3.7. L'angle horaire	4
I.3.8. Position du soleil	5
I.4. Notions préliminaires sur le rayonnement solaire	6
I.4.1. Rayonnement direct	6
I.4.2. Rayonnement diffus	6
I.4.3. Rayonnement réfléchi	6
I.4.4. Rayonnement global	7
I.5. Terminologie « photovoltaïque » - les dates importantes	7
I.6. Cellules photovoltaïques	8
I.6.1. Type des cellules photovoltaïques	8
I.6.2. Principe de fonctionnement d'une cellule au silicium cristallin	10
I.7. Module photovoltaïque	11

I.8. Panneau photovoltaïque	12
I.9. Modélisation d'une cellule photovoltaïque	14
I.9.1. Modèle de cellule	14
I.9.2. Modèle de simulation	18
I.10. Influence de l'éclairement et de la température	18
I.10.1. Influence de l'irradiation	18
I.10.2. Influence de la température	19
I.11. Avantages et inconvénients d'une installation PV	19
I.11.1. Avantage	19
I.11.2. Inconvénient	20
I.12. Conclusion	20

CHAPITRE II: Convertisseurs de puissance avec le système PV

II.1. Introduction	22
II.2. Convertisseurs DC-DC	22
II.2.1. Types des convertisseurs DC-DC (les hacheurs)	22
II.2.1.1. Convertisseur Boost	23
II.2.1.2. Convertisseur Buck	26
II.2.1.3. Convertisseur Buck-Boost	29
II.3. Convertisseurs DC-AC dans les systèmes PV	33
II.3.1. Définition d'un onduleur	33
II.3.2. Principe de fonctionnement d'un onduleur	33
II.3.3. Types d'onduleurs	33
II.3.3.1. Onduleur Monophasé	33
II.3.3.2. Onduleur triphasée	35
II.4 Conclusion	36

CHAPITRE III: Modélisation et Simulation de GPV

III.1. Introduction	37
III.2. Caractéristiques de Module PV Soltech 1-STH-215-P	37
III.3. Caractéristiques de convertisseur	41
III.4. Simulation du GPV avec MPPT et un convertisseur DC-DC	42
III.4.1. L'organigramme de l'algorithme MPPT	42
III.4.2. Schéma bloc de Simulation	43
III.5. Fonctionnement sous conditions standards constantes	44

III.5.1. Résultats de la simulation à la sortie du GPV	44
III.5.2. Résultats de la simulation à la sortie du Convertisseur	45
III.5.3 Interprétation des résultats	46
III.6. Fonctionnement sous conditions environnementales variables	46
III.6.1 Eclairage variable et température constante	46
III.6.1.1 Résultats de la simulation à la sortie du GPV	47
III.6.1.2 Résultats de la simulation à la sortie du Convertisseur	48
III.6.1.3. Interprétation des résultats	49
III.6.2 Température variable et éclairage constant	50
III.6.2.1 Température variable et éclairage constant par profil lent	50
III.6.2.2 Température variable et éclairage constant par profil rapide	53
III.6.2.3. Interprétation des résultats	57
III.7. CONCLUSION	58
Conclusion Générale	60
Bibliographies	



*Liste des
figures*

LISTE DES FIGURES

Figure		Page
CHAPITRE I: Généralité sur le photovoltaïque		
I.1	Position du soleil.	5
I.2	Des cellules photovoltaïques	9
I.3	Structure d'une cellule photovoltaïque	10
I.4	Caractéristiques courant-tension de la cellule photovoltaïque	11
I.5	Module photovoltaïque	12
I.6	Câblage des cellules dans un module	12
I.7	Panneau photovoltaïque	13
I.8	Boite de dérivation	13
I.9	Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque	14
I.10	Modèle de simulation d'un générateur PV	18
I.11	Evolution de la caractéristique (I-V) et (P-V) du module en fonction de l'irradiation	18
I.12	Evolution de la caractéristique (I-V) (P-V) du module en fonction de la température	19
CHAPITRE II: Convertisseurs de puissance avec le système PV		
II.1	convertisseur boost	24
II.2	Formes typiques d'onde du convertisseur boost	24
II.3	convertisseur buck	27
II.4	signaux typiques de convertisseur buck	27
II.5	Circuit électrique de base du hacheur survolteur/dévolteur	30
II.6	Caractéristique de la tension et du courant du Buck-Boost	30
II.7	Schéma de principe d'un onduleur monophasé en Demi-pont	33
II.8	Schéma de Principe d'un Onduleur Monophasé En Pont	34
II.9	Circuit de puissance d'un onduleur de tension triphasé	35
CHAPITRE III: Modélisation et Simulation de GPV		
III.1	Caractéristiques P(V) et I(V) de GPV sous STC	38
III.2	L'influence de l'éclairement sur les caractéristiques P(V), I(V)	39
III.3	L'influence de la température sur les caractéristiques P(V), I(V)	40
III.4	L'organigramme de l'algorithme MPPT	42
III.5	Schéma MATLAB-SIMULINK avec une commande MPPT (P&O) et un convertisseur (DC/DC)	43
III.6	Puissance de sortie GPV	44
III.7	Tension de sortie GPV	44
III.8	Puissance de sortie Convertisseur	45
III.9	Tension de sortie Convertisseur	45
III.10	Schéma bloc de simulation avec variation de l'éclairement et température constante	46
III.11	Variation de l'éclairement en fonction du temps	47

LISTE DES FIGURES

III.12	Puissance de sortie GPV pour éclairnement variable	47
III.13	Tension de sortie GPV pour éclairnement variable	48
III.14	Puissance de sortie convertisseur pour éclairnement variable	48
III.15	Tension de sortie convertisseur pour éclairnement variable	49
III.16	Schéma bloc de simulation avec variation de la température et éclairnement constant profil lent en utilisant repeating sequence	50
III.17	Variation de la température en fonction du temps par profil lent	50
III.18	Puissance de sortie GPV pour température variable	51
III.19	Tension de sortie GPV pour température variable	51
III.20	Puissance de sortie Convertisseur pour température variable	52
III.21	Tension de sortie Convertisseur pour température variable	52
III.22	Schéma bloc de simulation avec variation de la température et éclairnement constant profil lent en utilisant repeating sequence stair	53
III.23	Variation de la température en fonction du temps par profil rapide	53
III.24	Puissance de sortie GPV pour température variable	54
III.25	Tension de sortie GPV pour température variable	54
III.26	Puissance de sortie Convertisseur pour température variable	55
III.27	Tension de sortie Convertisseur pour température variable	55
III.28	Variation de la puissance avec la variation de la température de 70C°-100C° à la sortie de GPV	56
III.29	Variation de la puissance avec la variation de la température de 70C°-100C° à la sortie de Convertisseur	56

LISTE DES TABLEAUX

Tableau		Page
<i>CHAPITRE I: Généralité sur le photovoltaïque</i>		
<i>I.1</i>	Evénements notables dans l'histoire du photovoltaïques	7
<i>I.2</i>	Les caractéristiques électriques de ce module photovoltaïque "1STH-215-P"	18
<i>CHAPITRE III: Modélisation et Simulation de GPV</i>		
<i>III.1</i>	Caractéristiques de panneau PV Soltech 1-STH-215-P	37
<i>III.2</i>	Caractéristiques du convertisseur	41

Notations

et

Symboles

Acronymes

PV: Photovoltaïque.

GPV: Générateur Photovoltaïque.

FF: Facteur de forme.

N_s : Nombre de cellules en série.

N_p : Nombre de cellules en parallèle.

MPP : Maximum power point

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

P&O: Perturbation et Observation.

DC: Courant Continu (Direct Current).

AC: Courant Alternatif (Alternative Current).

Symboles

h : Constante de Planck ($6.62.10^{-34}$ j.s).

E_g : Energie de la bande interdite (eV).

S : Surface du module photovoltaïque (m²).

E : Eclairement (W/m²).

I_{ph} : Le photo-courant (A).

I_{sat} : Courant de saturation (A).

R_p : Résistances parallèle shunt. (Ω)

R_S : Résistance série (Ω).

T_c : Température de jonction ($^{\circ}$ K).

G : L'éclairement de référence (1000 W/m²).

T_{ref} : La température de référence (298 $^{\circ}$ K).

α : Le coefficient de courant en fonction de température (A/ $^{\circ}$ C).

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

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

FF : Facteur de forme.

N_s : Nombre de modules dans le panneau en série.

N_p : Nombre de modules dans le panneau en parallèle.

P_{max} : La puissance maximale produite PV (W).

V_{max} : Tension qui correspond à la puissance maximale (V).

I_{max}: Courant qui correspond à la puissance maximale (A).

V_{opt} : Tension optimale (V).

I_{opt} : Courant optimum (A).

V_{co} : Tension à circuit ouvert (V).

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

K : coefficient de Boltzman ($1.38 \cdot 10^{-23}$ J / K)

T_{amb} : Température ambiante (C°)

T_c : Température de la cellule (C°)

Introduction

Générale

INTRODUCTION GENERALE

L'énergie solaire est l'une des sources d'énergie renouvelables les plus importantes car elle est écologique, durable et sans coût de carburant. Par conséquent, les études et les applications liées aux systèmes photovoltaïques sont en constante augmentation. Les modules photovoltaïques sont des structures semi-conductrices qui convertissent l'énergie solaire en énergie électrique. Les systèmes photovoltaïques ont été utilisés dans de nombreuses applications telles que les systèmes satellitaires, les systèmes de communication, les pompes à eau, les applications de véhicules électriques et les centrales solaires.

Les deux facteurs les plus importants qui déterminent les sorties d'énergie du PV sont le rayonnement et la température de la cellule. Les performances des cellules photovoltaïques données dans les fiches techniques sont définies dans des conditions d'essai standard (rayonnement 1000W/m^2 et température 25°C). D'autre part, c'est nécessaire de connaître les caractéristiques des panneaux photovoltaïques pour différentes conditions environnementales, car ils sont confrontés à des conditions inhabituellement changeantes lorsqu'ils sont utilisés dans un environnement réel.

Le module PV représente l'unité de conversion de puissance fondamentale d'un système de générateur PV. La caractéristique de sortie du module PV dépend de l'irradiation solaire et de la température de la cellule. Étant donné que le module PV a des caractéristiques non linéaires, il est nécessaire de le modéliser pour la conception et la simulation du suivi du point de puissance maximale (MPPT) pour les applications du système PV.

Un module PV se compose généralement d'un certain nombre de cellules PV en série. Une cellule PV a une tension-courant non linéaire (V-I) caractéristique qui peut être modélisée à l'aide de sources de courant, de diode(s) et de résistances. Le modèle a une ou deux diodes sont largement utilisés pour simuler les caractéristiques PV. Le fabricant renseigne sur les caractéristiques électriques du PV en précisant certains points dans ses caractéristiques V-I qui sont appelés points remarquables.

Ce travail est organisé en trois chapitres :

Dans le chapitre I, nous avons présenté des généralités sur la technologie du système photovoltaïque et de leur fonctionnement, En commençant par le principe du fonctionnement de la cellule ainsi que les avantages et inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque.

L'objectif de chapitre II est de présenter le principe et les types du convertisseur DC-DC à utiliser dans les applications de systèmes d'alimentation photovoltaïque, avec ses avantages et inconvénients.

Ensuite dans le chapitre III nous avons fait l'étude et la simulation par MATLAB-SIMULINK du convertisseur DC-DC et son commande MPPT pour chercher et suivre le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale.

Finalement, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale qui résume notre étude.

CHAPITRE I

*Généralité sur le
photovoltaïque*

I.1. Introduction :

L'électricité, forme propre de l'énergie par excellence, est aujourd'hui produite, à près de 80 %, à partir de combustibles fossiles (pétrole, gaz,...) ou fissiles (nucléaire), ressources épuisables et polluantes à la fois. Pour un développement durable, les ressources énergétiques renouvelables sont « propres » et inépuisables, donc capables à long terme de satisfaire la majeure partie de nos besoins [1].

La prise de conscience que les coffres forts de la nature s'épuisent inexorablement est récente, mais les comportements sont longs à modifier. Sauf pour le bois, il faut des millions d'années pour que la nature fabrique des combustibles comme le charbon, le pétrole, ou le gaz naturel. Les énergies renouvelables sont des énergies issues du soleil, du vent, de la géothermie, des chutes d'eau, des marées ou de la biomasse ; leur exploitation n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes : ce sont les énergies de l'avenir ! [2].

Les cellules photovoltaïques (PV) ouvrent la possibilité de produire de l'électricité directement à partir du rayonnement solaire, sans nécessiter ni pièces mobiles, ni production de chaleur et sans entraîner de pollution atmosphérique, locale ou globale [3]. Ainsi que l'énergie produite est continu donc elle peut être stocké facilement pour l'utilisé une autre fois.

Dans ce chapitre nous présentons premièrement la définition de l'énergie solaire suivie de la construction des cellules photovoltaïques. Puis nous nous intéressons à présenter le principe de fonctionnement. Enfin nous abordons les différents types des cellules photovoltaïques.

I.2. L'énergie solaire :

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (kWc/m^2) 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 [4].

I.3. Principes de calcul de l'énergie solaire :

Avant d'entrer dans le calcul de l'irradiation solaire, certains principes de base et définitions méritent d'être rappelés, notamment plusieurs variables qui seront mentionnées à plusieurs reprises par la suite.

I.3.1. La latitude (f) :

C'est l'angle formé par le plan équatorial et la direction reliant le lieu considéré, au centre de la terre. Les latitudes de l'hémisphère Nord sont affectées d'un signe positif et celles de l'hémisphère Sud d'un signe négatif [5].

I.3.2. La longitude (l) :

Représente l'angle formé par le plan méridien de lieu considéré et le plan méridien origine. Ce dernier passe par l'observatoire de Greenwich et a pour longitude 00. Les longitudes situées à l'est de ce méridien sont positives et celles situées à l'Ouest négatives [5].

I.3.3. L'altitude :

L'altitude est l'élévation d'un lieu par rapport au niveau de la mer, mesurée en mètre (m).

I.3.4. La déclinaison (δ) :

C'est l'angle entre la direction du soleil et le plan équatorial Elle traduit l'inclinaison du plan équatorial par rapport au plan écliptique. La déclinaison varie entre -23.45° (le 21 décembre) et $+23.45^\circ$ (le 21 juin) (fig.I.1). Cet angle varie très peu pendant une journée, ce qui permet d'approcher le mouvement quotidien du soleil par une rotation sur cône d'axe l'équateur [5], [6].

$$\delta = 23.45 \cdot \sin \left(2\pi \frac{284 + n}{365} \right) \quad (\text{I. 1})$$

Où : n est le numéro de jour dans l'année.

I.3.5. Le temps solaire vrai (TSV):

Défini par l'angle horaire ρ entre le plan méridien passant par le centre du Soleil et le méridien du lieu considéré. Il est compté de 0 à 24h à partir du midi vrai lorsque le Soleil culmine en un lieu donné [7].

La vitesse de la Terre sur sa trajectoire étant soumise à des variations, le jour solaire vrai n'est pas constant. Ainsi, un temps solaire moyen a été retenu comme unité de temps, le jour solaire moyen est défini [7].

$$TSV = 12 + \frac{\rho}{15} \quad (I.2)$$

I.3.6. La durée et le taux d'insolation:

Par ciel claire et pendant la durée de jour d'enseillement S_0 (de lever au coucher du soleil), le sol reçoit le rayonnement solaire maximal. Mais la durée effective d'enseillement S d'une journée ordinaire est inférieure à cette durée maximale [6].

Le taux d'insolation est donné par l'expression:

$$\sigma = \frac{S}{S_0} \quad (I.3)$$

La durée maximale S_0 est calculée par l'expression suivante [7] :

$$S_0 = \left(\frac{2}{15}\right) \cos^{-1}(-\tan f \cdot \tan \delta) \quad (I.4)$$

Avec δ : La déclinaison

f : La latitude du lieu

I.3.7. L'angle horaire :

C'est l'angle formé entre le plan méridien passant par le soleil et le plan méridien du lieu obtenu par le déplacement angulaire du soleil autour de l'axe polaire, dans sa course d'Est en Ouest, par rapport au méridien local. La valeur de l'angle est nulle à midi solaire, négative le matin, positive en après-midi et augmente de 15° par heure (donc un tour de 360° en 24 heures) [6].

I.3.8. Position du soleil :

La direction du soleil dans le ciel est repérée par l'intermédiaire de deux angles :

- La hauteur angulaire (h) : Qui détermine la longueur de la traversée de la l'atmosphère est l'angle formé par la direction de soleil et le plan horizontal. Sa valeur sera comprise entre 00 (au lever et au coucher) et maximum au zénith (midi en temps solaire vrai) [5], [6].

Quand le sinus est négatif, c'est que le soleil n'est pas encore levé (la durée des journées varie dans l'année). Il faut donc écrêter cette variable

$$\sin(h) = \sin(\mathbf{f})\sin(\rho) + \cos(\mathbf{f})\cos(\rho)\cos(\delta) \quad (\text{I.5})$$

L'angle horaire ρ_s au lever de soleil s'obtient en écrivant $\sin(h) = 0$:

$$\cos(\rho_s) = -\tan(\mathbf{f})\tan(\delta) \quad (\text{I.6})$$

Où (δ) la déclinaison calculée d'après l'équation (1.1) et (\mathbf{f}) la latitude du lieu.

- Azimut du soleil (β) : Angle que fait la projection de la direction du soleil avec la direction du sud. Cet angle étant orienté positivement vers l'Ouest [5], [6].

$$\sin(\beta) = \frac{\cos(\delta) \sin(\rho)}{\cos(h)} \quad (\text{I.7})$$

Ces deux angles sont représentés sur la figure 1.2.

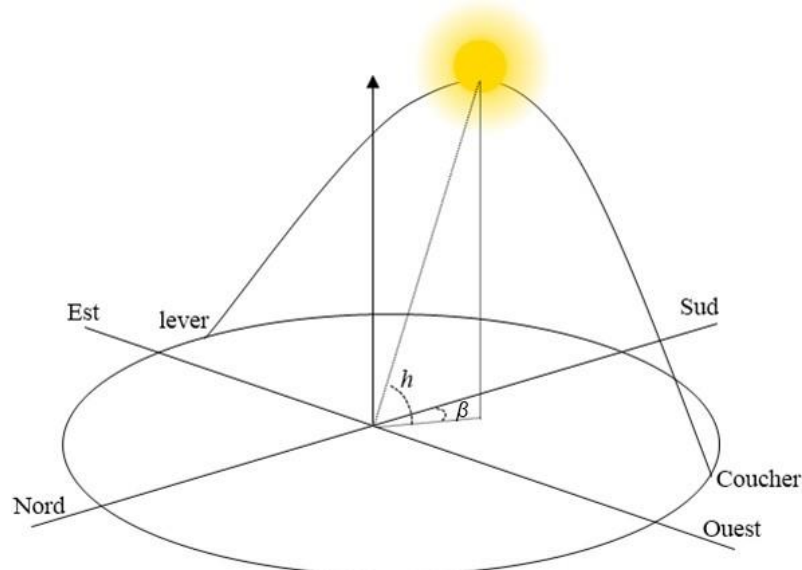


Fig.I. 1: Position du soleil.

Pour le site de Ouargla, les spécifications sont données par les grandeurs météorologiques suivantes [6]:

- La latitude : 31N
- La longitude : 5°24'E
- L'altitude : 141m
- Albédo : 0.35

I.4. Notions préliminaires sur le rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet ($0.2 \mu m$) à l'infrarouge lointain ($2.5 \mu m$). On utilise la notion AM pour Air Mass afin de caractériser le spectre solaire en termes d'énergie émise [5]. Pour tenir compte de la distance traversée par les rayons, il est nécessaire d'introduire une notion de masse d'air (AM) elle correspond à la longueur relative du parcours à travers l'atmosphère terrestre traversée par le rayonnement solaire direct. La masse d'air est exprimée un multiple du trajet parcouru en un point au niveau de la mer, le soleil étant directement à l'aplomb [8].

Au niveau du sol le rayonnement global reçu par une surface plane d'inclinaison quelconque est constitué de trois composantes principales :

I.4.1. Rayonnement direct :

Flux solaire sous forme de rayons parallèles provenant de disque soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère. [9].

I.4.2. Rayonnement diffus :

C'est la partie du rayonnement provenant du soleil, ayant subi multiples réflexions (dispersions), dans l'atmosphère. [9].

I.4.3. Rayonnement réfléchi :

C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend directement de la nature du sol (nuage, sable...). Il se caractérise par un coefficient propre de la nature de lien appelé Albédo (s) $0 \leq s \leq 1$ [5].

I.4.4. Rayonnement global :

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

I.5. Terminologie « photovoltaïque » - les dates importantes :

Le terme « photovoltaïque » vient du grec «phos, photo» qui désigne la lumière et de «voltaïque», mot dérivé du physicien italien Alessandro VOLTA, connu pour ses travaux sur l'électricité. Une cellule photovoltaïque est donc une machine à produire de l'électricité sans mouvement circulaire, sans vapeur d'eau sous pression, sans turbine, sans refroidissement (sauf dans le cas des systèmes à concentration). Dès qu'elle est éclairée par de la lumière, elle se met à fonctionner. Le Tableau 1 résume les événements importants de l'histoire du photovoltaïque [10].

1839	Le physicien français Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque
1883	Fritts réalise des cellules solaires de grande surface à base de Se
1954	Des rendements de 6% sont obtenus : Si (Bell Lab, USA) and Cu ₂ S/CdS (Air Force, USA)
1955	Hoffman électroniques (USA) propose des cellules Si à 2 % de rendement à \$1500/W
1958	Kearns et Calvin ont démontré l'effet photovoltaïque d'une cellule à base de MgPh
1970	Première cellule solaire à hétérostructures GaAs élaborée par Alferov, Andree et al. en URSS
1973	Première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université Delaware, USA ; à base de Cu ₂ S
1980	La première cellule à base de Cu ₂ S/CdS délivrant un rendement > 10%
1982	Première unité de production de 1 MW (Californie, USA) avec des cellules Arco Si
1985	Les cellules à base de Si donnent un rendement > 20% sous le rayonnement solaire
1994	Des rendements > 30 % avec des cellules à concentration multijonctions à base de GaInP/GaAs (NREL, USA)
1996	Les cellules solaires hybrides à colorants atteignent un rendement de 11% (EPFL, Switzerland)
1998	Cellules couches minces Cu(InGa)Se ₂ atteignent un rendement de 19% (NREL, US)
2002	Le photovoltaïque installé mondial cumulatif atteint 2000 MW
2007	Cellules solaires organiques en structure tandem avec un rendement de 6,5 % (UCSB, USA)
2008	Un rendement homologué de 5,9% sur une surface active de 2 cm ² obtenu par Heliatek, BASF et l'Institut de photovoltaïque appliquée (IAPP) de l'Université technique de Dresde (Allemagne)
2009	Cellule polymère simple jonction avec un rendement de 6,1 % à base de PCDTBT et PC70BM (UCSB, USA)
	Cellule polymère simple jonction avec un rendement de 7,4 % à base de PBDTTT-CF et PC70BM (Solarmer Energy Inc., University of California, University of Chicago, USA)

Tab.I. 1: Evénements notables dans l'histoire du photovoltaïques [10].

Cellule solaire et photopile sont des termes équivalents qui désignent généralement des capteurs de petite taille, utilisés soit tels quels, soit en assemblage dans un panneau solaire, ou module photovoltaïque.

Quant au mot photogénérateur, il regroupe l'ensemble de ces composants d'énergie lumière en électricité, c'est pourquoi nous l'utiliserons pour les exposés d'ordre général [11].

I.6. Cellules photovoltaïques :

Les cellules solaires sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque » [5], car le soleil est la source lumineuse la plus intense de notre planète, et la plupart des applications sont en plein air. Mais certains préfèrent l'expression énergie lumière, pour insister sur le fait que toute source de lumière, même artificielle (ampoules, tubes fluorescents...), peut générer de l'électricité à travers une cellule solaire [11].

I.6.1. Type des cellules photovoltaïques :

Dans cette partie, nous présentons les différentes cellules photovoltaïques en donnant leurs caractéristiques principales selon le type de matériaux utilisés.

a) Cellules inorganiques :

- Cellule silicium

Le silicium polycristallin présente une couleur grise. Il est constitué d'une mosaïque de cristaux monocristallins de silicium, d'orientation et de tailles différentes (fig.I.2.a). Le silicium monocristallin ainsi obtenu, sous forme de lingots circulaires, est constitué d'un seul type de cristal et présente une couleur uniforme grise (fig.I.2.b). Le silicium monocristallin, plus élaboré que le silicium polycristallin, présente un rendement (conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique) supérieure. Sa production demande cependant une plus grande dépense énergétique [12].

- Cellules en couches minces :

D'autres filières sont en cours de développement dans le secteur photovoltaïque inorganique comme les cellules dites de seconde génération composées de couches minces de matériaux inorganiques (fig.I.2.c). Les matériaux photoactifs les plus utilisés en couche minces sont le silicium amorphe (a-Si), le diséléniure de cuivre indium (CIS), le tellure de cadmium (CdTe). L'avantage principal des cellules photovoltaïques composées de couches minces de matériaux inorganiques est le faible coût de production par rapport à celui des cellules composées de silicium épais [13].

b) Cellules de Grätzel :

La couche active de ces cellules est composée d'une matrice poreuse de nano-cristallites d'oxyde métallique semi-conducteur (TiO_2 , ZnO , SnO_2 , Nb_2O_5) recouverte d'une monocouche de colorant (complexe de ruthenium ou de ditetrabutylammonium). En absorbant les photons le colorant va libérer un électron dans la bande de conduction de l'oxyde métallique. Le colorant oxydé va être ensuite réduit par l'électrolyte liquide qui est en général une solution d'iode (I_2). Ces cellules ont un coût de production un peu plus élevé que les cellules photovoltaïques tout polymère mais les rendements de conversion photoélectriques avoisinent les 10% [13].

c) Cellules organiques :

Les cellules connaissent un développement rapide et leur rendement de conversion ont franchi récemment la barre des 8%. Les matériaux les plus répondus dans le domaine du photovoltaïque organique à base de polymères est le mélange poly(3-hexylthiophene) (P3HT) le 6,6-phenyl-C61-butyric acide méthyl ester(PCBM) (fig.I.2.d) [14].

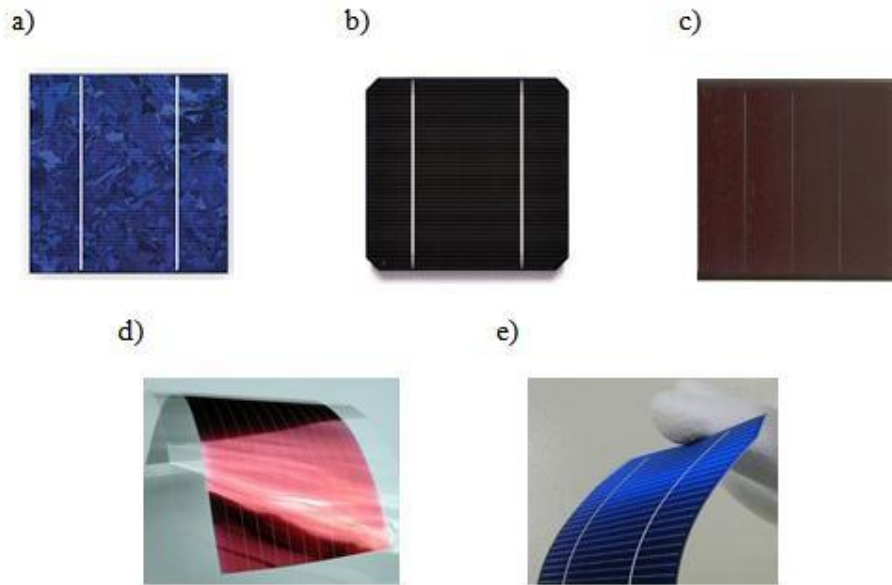


Fig.I. 2: Des cellules photovoltaïques

d) Cellules hybrides :

Les cellules hybrides sont composées d'un semi-conducteur organique et d'un semi-conducteur inorganique comme l'oxyde de titane (TiO_2), l'oxyde de zinc (ZnO) ou le sélénium de cadmium (CdSe). Le principal avantage de ces cellules par rapport aux cellules

organiques est l'absence de 6,6-phenyl-C61-butyric acide méthyl ester (PCBM) ou de fullerène (C60) qui sont les matériaux les plus sensibles à l'oxygène, ce qui permet d'améliorer nettement la stabilité des cellules à l'air ambiant (fig.I.2.e). t. De plus ces cellules bénéficient des qualités des matériaux organiques comme la souplesse et la facilité de mise en forme et des qualités des matériaux inorganiques comme les mobilités élevées des charges électriques [13].

I.6.2. Principe de fonctionnement d'une cellule au silicium cristallin :

Le but des cellules photovoltaïques est de convertir l'énergie lumineuse provenant du Soleil en énergie électrique. Ceci se fait en trois étapes [15]:

- Absorption des photons de la lumière solaire.
- Conversion de l'énergie reçue par les photons en énergie électrique (particules électriques libres).
- Collecte les particules dans un circuit électrique externe.

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

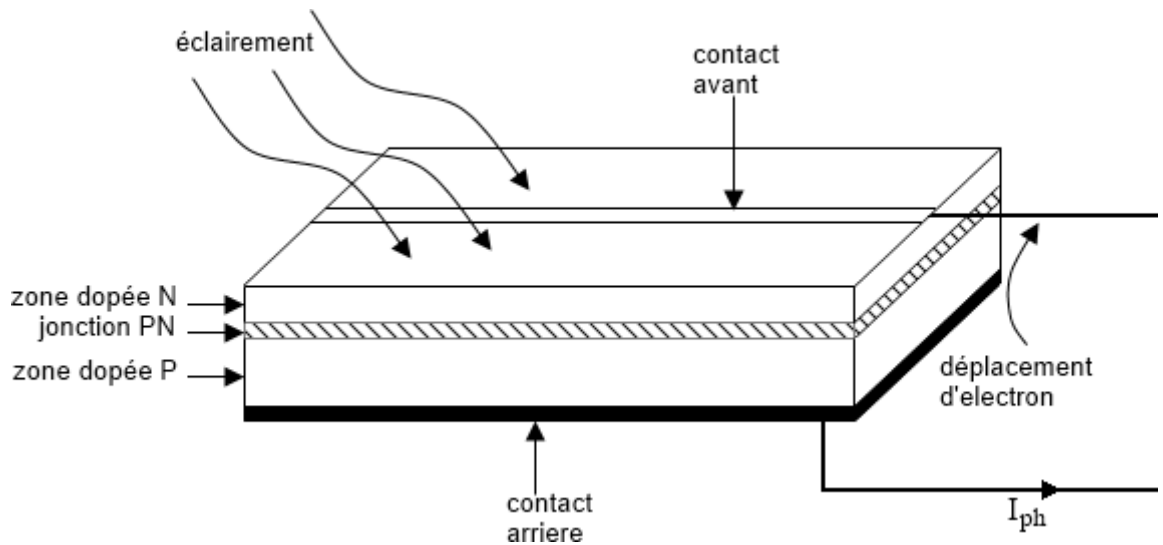


Fig.I. 3: Structure d'une cellule photovoltaïque

En résumé, technologiquement, un capteur PV est proche d'une diode PN de par sa constitution, les matériaux utilisés, et les phénomènes physiques identiques mis en œuvre. Le comportement d'une cellule PV peut donc se modéliser comme celui d'une mauvaise jonction PN autant en statique qu'en dynamique lorsque cette dernière n'est pas éclairée. Pour tenir compte du courant engendré par l'éclairage de la cellule et des différentes résistances modélisant les pertes dues à la connectique, trois termes sont ajoutés I_{sc} , R_S et R_P [16].

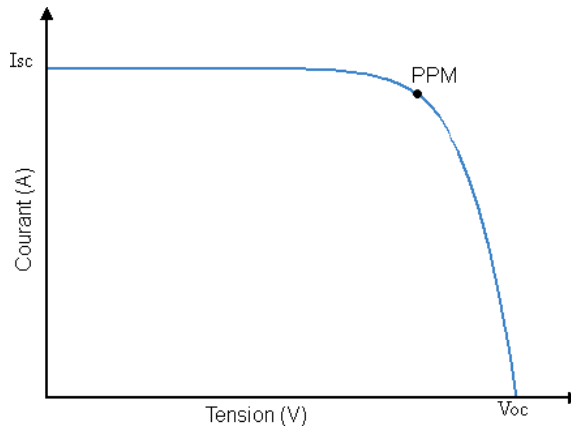


Fig.I. 4: Caractéristiques courant-tension de la cellule photovoltaïque

A partir de la caractéristique $I(V)$ sous éclairage de la cellule photovoltaïque, on déduit les paramètres électriques propres à la cellule et notamment :

- I_{sc} : Courant de court-circuit (obtenu pour $V = 0$)
- V_{oc} : Tension en circuit ouvert (obtenu pour $I = 0$)
- Le point de fonctionnement optimal PPM (la puissance maximale de la cellule).

I.7. Module photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance vis-à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés, délivre au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au volt (tension de jonction PN). Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un panneau photovoltaïque. En effet, les modules PV sont composés d'un ensemble de cellules mises en série, réalisant la conversion proprement dite de la lumière du soleil en électricité. Ils sont eux-mêmes associés en série et parallèle pour former un champ photovoltaïque d'une puissance crête définie selon des conditions spécifiques d'éclairage, de température et de

spectre solaire. La plupart des modules commercialisés sont constitués de deux à quatre réseaux de cellules en silicium cristallins connectés en série [18].



Fig.I. 5 : Module photovoltaïque

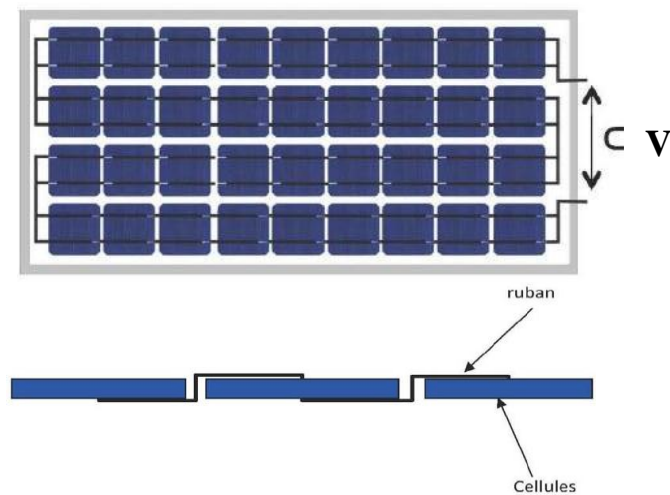


Fig.I. 6 : Câblage des cellules dans un module

Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes :

- Protection des cellules contre les agents atmosphériques
- Protection mécanique et support.
- Connexion électrique entre cellules et avec l'extérieur [5].

I.8. Panneau photovoltaïque :

Le panneau solaire ou (champ solaire) se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique [5].



Fig.I. 7: Panneau photovoltaïque

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



Fig.I. 8 : Boite de dérivation.

La boîte de dérivation est composée également d'un circuit imprimé sur lequel se trouvent :

- Des diodes schotcky séries, placée sur un radiateur, sur chaque entrée, qui empêchent aux batteries de se décharger dans les panneaux.
- Des fusibles de protections qui empêcheront aux batteries de se décharger dans les modules en cas de destruction des diodes antiparallèles.
- Des diodes lumineuses, en parallèle sur chaque fusible de protection. Ces diodes permettant de contrôler individuellement chaque branche de modules. Par exemple une boîte à 4 entrées de 24 Volts sera constituée de deux branches de deux modules, il y aura donc deux diodes qui permettront de constater le fonctionnement de chaque branche.
- Une protection parafoudre (Transil ou VDR) en sortie de la boîte.

Le câblage de ces boîtes permet d'avoir une sortie en 12,24 ou 48 volts selon les modules, elles sont équipées de deux à douze entrées, selon les tensions de sortie. La quantité d'électricité dans l'ensemble des composants des panneaux PV dépend :

- des besoins en électricité.
- la taille du panneau.
- L'ensoleillement du lieu d'utilisation.
- La saison d'utilisation [5].

I.9. Modélisation d'une cellule photovoltaïque :

I.9.1. Modèle de cellule :

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

Une cellule photovoltaïque a un comportement équivalent à une source de courant shuntée par une diode (fig.I.9). Le modèle est complété par une résistance série R_s due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts face avant et arrière et une résistance parallèle ou shunt R_p qui provient des contacts métalliques et des résistances de fuite sur la périphérie de la cellule

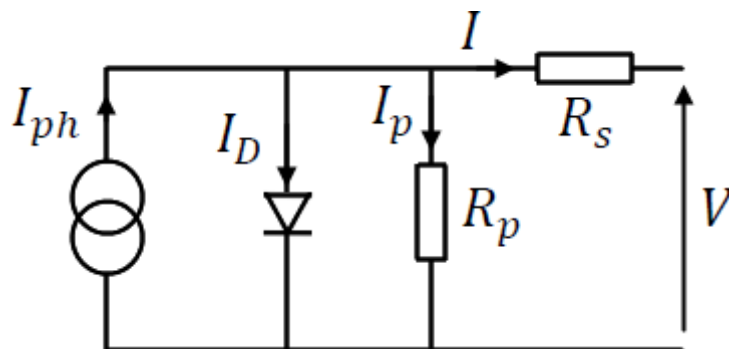


Fig.I. 9: Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

En notant :

$$I = I_{ph} - I_D - I_p \quad (I.8)$$

Avec:

$$I_D = I_0 \left[\exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{nV_T}\right) - 1 \right] \quad (I.9)$$

$$I_p = \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (I.10)$$

$$I_0 = I_{SC} / \left[\exp\left(\frac{V_{0C}}{nV_T}\right) - 1 \right] \quad (I.11)$$

$$I_{SC} = I_{SCR} \left(\frac{G}{1000} \right) \quad (I.12)$$

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad (I.13)$$

Où

I : Courant fourni par la cellule.

V : Tension aux bornes de la cellule

I_D : Courant de diode.

I_{ph} : Photocourant, dépendant de l'intensité de l'irradiation.

I_p : Le courant dérivé par la résistance parallèle.

I_0 : Courant de saturation de diode, dépendant de la température

I_{SC} : Le courant de court-circuit de référence

V_{0C} : La tension de circuit ouvert

V_T : La tension thermique

I_{SCR} : Courant de court-circuit de référence.

R_p : Résistance en parallèle, représentant l'admittance parallèle du générateur de courant

R_s : Résistance en série, modélisant les pertes ohmiques du matériau et des contacts

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

q : Charge d'électron $1.602 \cdot 10^{-19} C$,

K : Constante de Boltzmann $1.381 \cdot 10^{-23} J/K$

n : Facteur de non idéalité de la jonction comprise entre 1 et 5 dans la pratique.

T : La température effective de la cellule en kelvin.

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{nV_T}\right) - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (I. 14)$$

La photopile réelle à une résistance série R_s dont l'influence est plus forte lorsque l'appareil fonctionne dans la région de source de tension, et une résistance parallèle R_p ayant une influence plus grande dans la région de fonctionnement en source de courant.

La caractéristique (I-V) de la photopile représentée sur la figure I.4 dépend de ses caractéristiques internes (R_s, R_p) et des facteurs externes comme l'irradiation et la température. Dans les modèles photovoltaïques, on suppose généralement que $I_{ph} = I_{sc}$ parce que dans la photopile réelle, la résistance série est faible et la résistance parallèle est élevée [7].

Donc l'équation (I. 14) devienne :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{nV_T}\right) - 1 \right] \quad (I. 15)$$

Calcul de la résistance série dans le point

$$dI = 0 - I_0 \left(\frac{dV + dI \cdot R_s}{nV_T} \right) \left[\exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{nV_T}\right) \right] \quad (I. 16)$$

$$R_s = - \frac{dV}{dI} - \frac{V + I \cdot R_s}{I_0 \exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{nV_T}\right)} \quad (I. 17)$$

Enfin, pour résoudre l'équation de caractéristique non linéaire, on utilise la méthode de Newton décrite par :

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (I. 18)$$

Où :

$f'(x_n)$: Le dérivé de la fonction $f(x_n)$

x_n : La présente itération.

x_{n+1} : L'itération suivante.

Ainsi, on se pose que $I_{ph} = I_{sc}$, l'équation (I. 15) devient sous la forme suivante :

$$f(I) = I_{sc} - I - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{nV_T}\right) - 1 \right] = 0 \quad (I. 19)$$

En remplaçant dans l'équation (I. 18), on calcule le courant (I) par les itérations [11] :

$$I_{n+1} = I_n - \frac{I_{sc} - I_n - I_0 \cdot \exp\left(\frac{V + I_n \cdot R_s}{nV_T}\right) - 1}{-1 - I_n \left(\frac{R_s}{nV_T} \right) \cdot \exp\left(\frac{V + I_n \cdot R_s}{nV_T}\right)} \quad (I. 20)$$

Les équations précédentes ne sont valables que pour un mode de fonctionnement optimal. Pour généraliser notre calcul pour différents éclairagements et températures, nous utilisons le modèle qui déplace la courbe de référence à de nouveaux emplacements.

$$I_{sc}(T) = I_{scR}(T_R) \cdot [1 + \alpha(T - T_R)] \quad (I. 21)$$

$$I_0(T) = I_0(T_R) \cdot \left(\frac{T}{T_R}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \left[\exp\left(\frac{-q \cdot E_g}{nK}\right) \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_R}\right) \right] = 0 \quad (I. 22)$$

Où

α : Le coefficient de variation du courant en fonction de la température.

T_R : La température de référence, 298k (25°C).

E_g : L'énergie de la bande interdite (gap) du semi-conducteur (en eV) $E_g \approx 1,12eV$ pour le silicium poly-cristallin à 25°C

Pour réaliser cette modélisation, nous avons utilisé MATLAB comme outil de tests et de simulation. Nous avons choisi le modèle photovoltaïque BP SX 150 de BP Solaire. La série SX de BP Solaire fournit une puissance photovoltaïque rentable destinée à un usage général par exploitation directe de charges courant continu, ou de charges courant alternatif sur les

systèmes munis d'onduleur. Le module est composé de 72 cellules solaires multi cristallines en silicone connectées en série pour produire une puissance maximale de 150 W [6].

Les caractéristiques électriques de ce module photovoltaïque a la température 25° et l'irradiation 1000 W/m² sont données dans le tableau suivant :

Puissance maximale P_{max}	215W
Tension nominale V_m	29V
Courant nominale I_m	7.35 A
Courant de court-circuit I_{sc}	7.84 A
Tension à circuit ouvert V_{oc}	36.6V

Tab.I. 2 Les caractéristiques électriques de ce module photovoltaïque "ISTH-215-P"

I.9.2. Modèle de simulation :

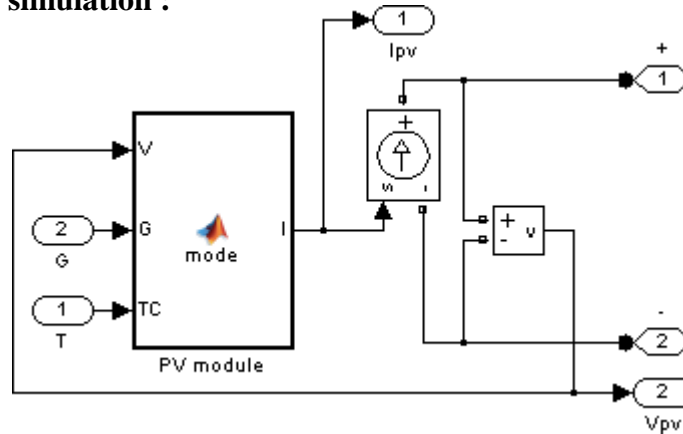


Fig.I. 10 : Modèle de simulation d'un générateur PV

I.10. Influence de l'éclairement et de la température :

Les caractéristiques d'un panneau dépendent de l'éclairement et de la température. Selon la technologie du générateur photovoltaïque, les variations des paramètres seront différentes.

I.10.1. Influence de l'irradiation :

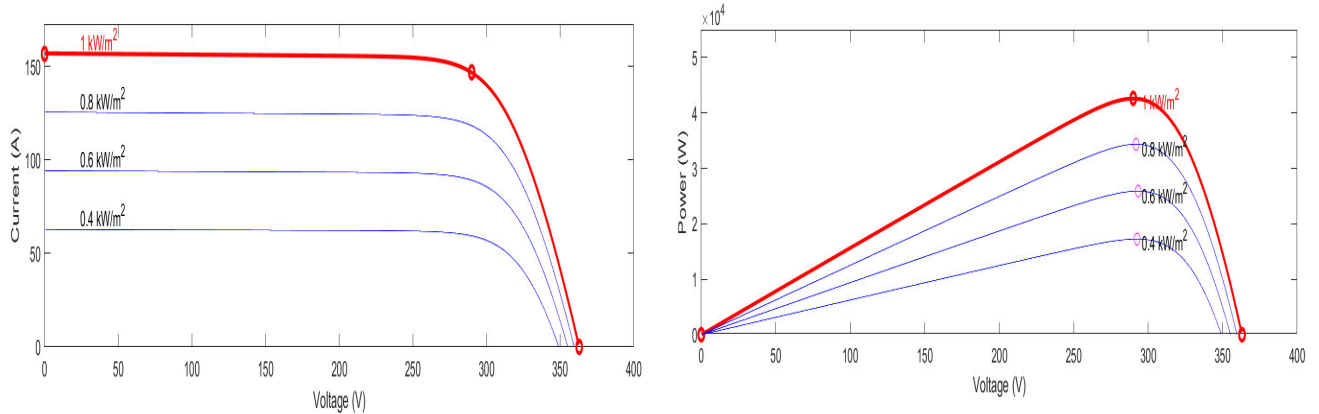


Fig.I. 11: Evolution de la caractéristique (I-V) et (P-V) du module en fonction de l'irradiation

Le courant I_{SC} varie directement avec le rayonnement lumineux (la relation est proportionnelle), la tension restant relativement constante. On remarque dans la figure (fig.1.11) que le courant optimal est très sensible à l'éclairement. Par contre la tension optimal varie très peu avec l'éclairement.

I.10.2. Influence de la température :

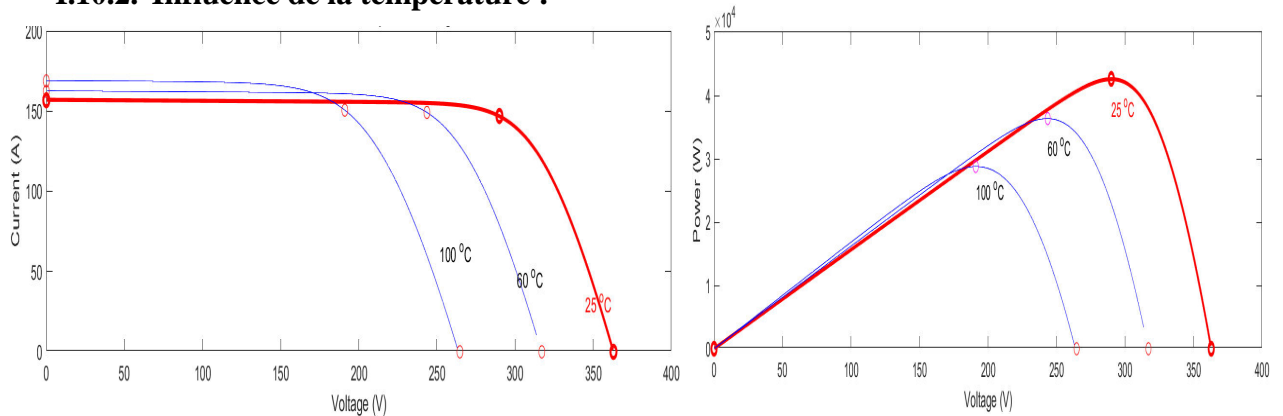


Fig.I. 12: Evolution de la caractéristique (I-V) (P-V) du module en fonction de la température

Quand la température diminue, la tension à vide augmente, mais le courant de court-circuit diminue dans des proportions moindres (Fig.I.12). La diminution du courant de saturation est la principale cause de la chute de courant à basse température.

Aussi, on considère en première approximation que le fonctionnement optimal du générateur PV correspond sensiblement à un fonctionnement à tension optimale constante.

I.11. Avantages et inconvénients d'une installation PV

I.11.1. Avantage :

- D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliWatt au MégaWatt.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.

- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions [5].

I.11.2. Inconvénient :

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % (soit entre 10 et 15 MW/km^2 par an pour le BENELUX) avec une limite théorique pour une cellule de 28%. · Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Tributaire des conditions météorologiques.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.
- Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur [5].

I.12. Conclusion :

Le monde de la conversion photovoltaïque connaît depuis quelques années une évolution profonde associée à l'intérêt croissant pour l'énergie photovoltaïque. Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes notions qui entrent dans l'énergie solaire et la constitution d'un système photovoltaïque et nous avons exploré le principe de la conversion photovoltaïque et les technologies utilisées ainsi que les différents types des cellules photovoltaïques.

Les caractéristiques d'un module solaire montrent bien que la puissance maximale générée dépend fortement de l'intensité des radiations solaires ainsi que de la température. Le module solaire ne peut générer sa puissance maximale que pour une certaine tension et courant de fonctionnement.

CHAPITRE II

*Convertisseurs de puissance
avec le système PV*

II.1. Introduction :

Le convertisseur est un appareil servant à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnent soit à une tension continue différente, soit à une tension alternative. Donc à partir de ce dernier on englobe deux types différents d'appareils électroniques placés entre générateur photovoltaïque et charges : Convertisseur continu-continu qui fait office d'interface entre générateur et charge.

- Le convertisseur élément essentiel entre les panneaux solaires et la charge. On va s'intéresser dans notre travail aux convertisseurs continu- continu.
- Pour transférer de l'un à l'autre le maximum de puissance. Les convertisseurs continus – alternatifs qui transforment l'énergie de type continu.

Un GPV présente des caractéristiques I-V non linéaires qui admettent un seul point de fonctionnement optimal dans les conditions homogènes d'éclairement et de température. Une adaptation d'impédance s'impose et cela peut se faire par un couplage direct d'une charge adaptée ou en insérant entre le GPV et la charge électrique un dispositif électronique. Ce dispositif n'est autre qu'un convertisseur statique ;

Dans le but de concevoir une interface de puissance plus performante, une étude détaillée est faite sur les convertisseurs statiques DC-DC non isolés en mode de conduction continu.

Dans ce chapitre, on s'intéresse à l'étude des convertisseurs DC/DC types et convertisseurs DC/AC

II.2. Convertisseurs DC-DC :

Les hacheurs sont des convertisseurs de type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé. Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle qu'on a de bons rendements pour les hacheurs [19].

II.2.1. Types des convertisseurs DC-DC (les hacheurs) :

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 Flyback, 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 [20].

Les topologies non isolées ne comportent pas de transformateurs d'isolement. Elles sont généralement utilisées dans l'entraînement des moteurs à courant continu [20]. Ces topologies sont encore classées en trois catégories : - Abaisseurs (Buck); - Elévateurs (Boost); - Elévateurs - Abaisseurs (Buck - Boost)

La topologie Buck est employée pour les faibles tensions. Dans les applications PV, le convertisseur Buck est habituellement employé comme chargeur de batteries et dans des systèmes de pompage de l'eau. La topologie Boost est employée pour augmenter la tension. Les systèmes de production de l'énergie emploient un convertisseur boost pour augmenter la tension de sortie au niveau du service avant l'étage de l'onduleur. Puis, il y a des topologies capables d'augmenter et de diminuer la tension telles que le Buck-Boost, le Cuk, et le Sepic. Les convertisseurs DC-DC peuvent être vus comme des transformateurs DC-DC.

II.2.1.1. Convertisseur Boost :

Hacheur élévateur, hacheur survolteur, hacheur parallèle, hacheur de type Boost. C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur S peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [21].

a. Principe de fonctionnement :

Le commutateur S est fermé pendant un temps t_{on} , le courant traversant l'inductance L augmente linéairement et le condensateur C se charge et maintient la tension entre ses bornes jusqu'à l'ouverture du commutateur S. La tension aux bornes de la diode D étant négative, aucun courant ne la traverse.

Le commutateur S est ouvert pendant un temps t_{off} . La diode devient passante afin d'assurer la continuité du courant dans l'inductance L. Le courant traversant l'inductance L décroît et le condensateur C se décharge à travers la diode D sur la charge R.

Lorsque l'interrupteur S est passant la diode est polarisée en inverse. La source E n'est pas connectée à la charge R . Lorsque le commutateur S est bloqué, la diode D est polarisée en direct et conduit. Ce qui connecte la charge R à la source V_g . Le circuit de convertisseur boost est montré sur la figure II.1 alors que la tension typique et les formes d'ondes du courant sont montrées sur la figure II.2.

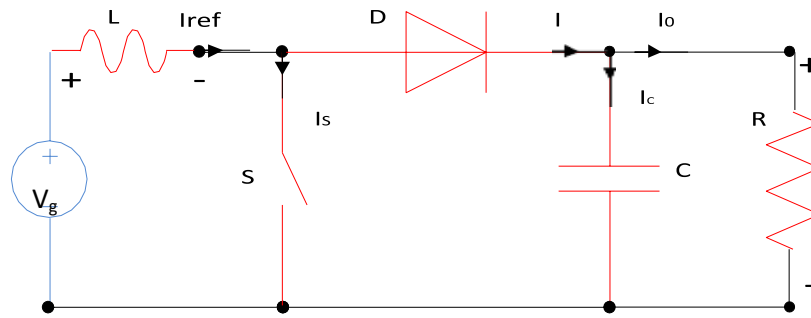


Fig. II.1 : convertisseur boost.

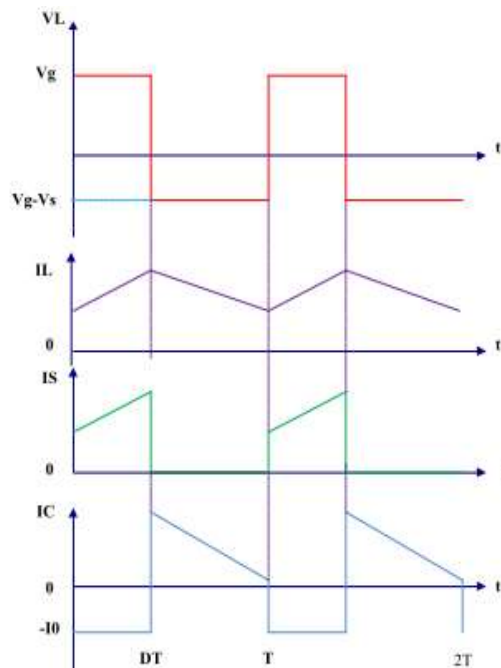


Fig. II.2 : Formes typiques d'onde du convertisseur boost

b. Modèle du convertisseur :

Lorsque l'interrupteur S est passant, $D=1$, on obtient la dynamique suivante :

$$V_L = V_{in} \quad (\text{II.1})$$

$$L \frac{di}{dt} = V_{in} \quad (\text{II.2})$$

$$C \frac{dv}{dt} = -\frac{V_{out}}{R} \quad (\text{II.3})$$

A partir de l'équation (II.28)

$$I(t) = \frac{V_{in}}{L} t + I_{min} \quad (\text{II.4})$$

Le courant augmente linéairement avec le temps jusqu'à ce qu'il atteigne son maximum à

$$t \rightarrow t_{on} = DT :$$

$$I_{max} = \frac{V_{in}}{L} DT + I_{min} \quad (\text{II.5})$$

A partir de l'équation ci-dessus on aura :

$$\Delta I = \frac{V_{in}}{L} DT \quad (\text{II.6})$$

Lorsque la fonction de commutation est $D = 0$, on obtient la dynamique suivante :

$$V_L = V_{in} - V_{out} \quad (\text{II.7})$$

$$L \frac{di}{dt} = V_{in} - V_{out} \quad (\text{II.8})$$

$$I(t) = \frac{V_{in} - V_{out}}{L} t + I_{max} \quad (\text{II.9})$$

$$C \frac{dv}{dt} = -\frac{V_{out}}{R} \quad (\text{II.10})$$

Quand $t \rightarrow t_{on}$ Le courant à travers l'inductance diminue linéairement de sa valeur maximale à sa valeur minimale :

$$I_{min} = \frac{V_{in} - V_{out}}{L} (1 - D) T + I_{max} \quad (\text{II.11})$$

Donc :

$$\Delta I = \frac{V_{out} - V_{in}}{L} (1 - D) T \quad (\text{II.12})$$

En combinant ces deux relations (II.6) et (II.12), on peut établir l'expression de la tension de sortie:

$$\frac{V_{in}}{L} DT = \frac{V_{out} - V_{in}}{L} (1 - D) T \quad (\text{II.13})$$

Ce qui implique :

$$V_{\text{out}} = \frac{1}{(1-D)} V_{\text{in}} \quad (\text{II.14})$$

c. Détermination de L, C :

Durant la phase 1 qui dure DT , le condensateur fournit seul l'énergie à la charge. Le courant desortie étant supposé constant, on peut calculer la charge fournie par le condensateur:

$$\Delta S = \frac{V_{\text{out}}}{R} DT \quad (\text{II.15})$$

Si l'on admet une ondulation ΔV_{out} de la tension de sortie, on peut écrire:

$$\Delta S = C \Delta V_{\text{out}} \quad (\text{II.16})$$

On en déduit la capacité du condensateur de sortie:

$$C = \frac{\Delta S}{\Delta V_{\text{out}}} \quad (\text{II.17})$$

La valeur de l'inductance, Nous avons établi la relation:

$$\Delta I = \frac{V_{\text{in}}}{L} DT \quad (\text{II.18})$$

On en tire la valeur de l'inductance :

$$L = \frac{DV_{\text{in}}}{f\Delta i} \quad (\text{II.19})$$

II.2.1.2. Convertisseur Buck :

Hacheur abaisseur, hacheur dévolteur, hacheur série, hacheur de type Buck. Le hacheur série est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant. L'interrupteur S peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [21].

a. Principe de fonctionnement :

Dans le cas idéal, le fonctionnement du hacheur *Buck* peut être divisé en deux phases selon l'état du transistor S.

S est fermé durant DT de la période de découpage T . La source photovoltaïque fournit l'énergie la charge R et l'inductance L , la tension $V_{\text{out}} = V_{pv}$.

Lors du blocage de transistor S, la tension aux bornes de l'inductance s'inverse, la diode de roue libre assure la continuité du courant et la décharge de L en R . La tension $V_{\text{out}} = 0$.

La tension de sortie est ajustée en agissant sur le rapport α et les formes d'onde en conduction sont présentées dans la figure II.4.

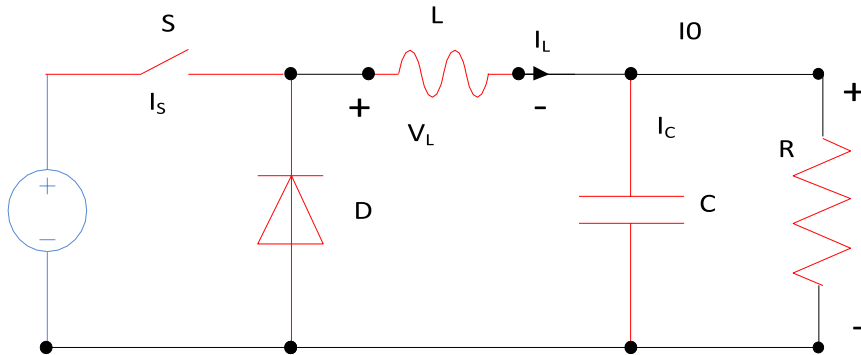


Fig.II.3: convertisseur buck.

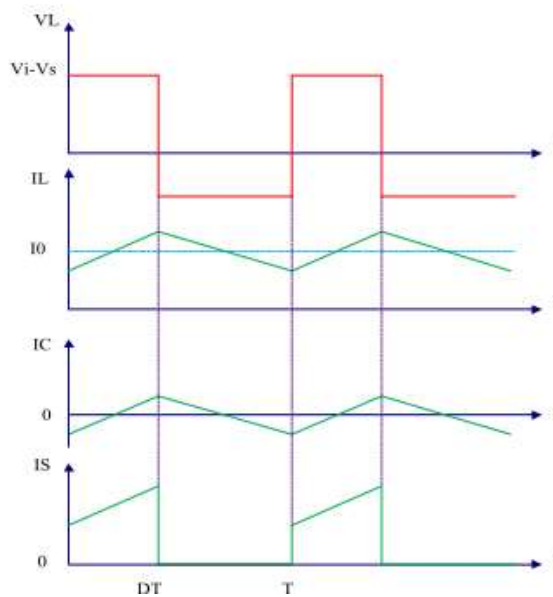


Fig.II.4: signaux typiques de convertisseur buck

b. Modèle du convertisseur :

Si on considère que l'interrupteur est dans la position $D=1$, et appliquant les lois de Kirchhoff au circuit en résulte, on obtient les équations suivant :

$$V_L = V_{in} - V_{out} \tag{II.20}$$

$$L \frac{di}{dt} = - V_{out} + V_{in} \tag{II.21}$$

$$L \frac{dv}{dt} = I - \frac{V_{out}}{R} \quad (II.22)$$

A partir de l'équation (II.21)

$$I(t) = \frac{V_{in} - V_{out}}{L} t + I_{min} \quad (II.23)$$

Le courant augmente linéairement avec le temps jusqu'à ce qu'il atteigne son maximum.

$$t \rightarrow t_{on} = DT :$$

$$I_{max} = \frac{V_{in} - V_{out}}{L} DT + I_{min} \quad (II.24)$$

A partir de l'équation ci-dessus on aura

$$\Delta I = \frac{V_{in} - V_{out}}{L} DT \quad (II.25)$$

$$\Delta I = \frac{V_{in} - D(1-D)}{Lf} \quad (II.26)$$

La relation (II.26) montre que l'ondulation du courant dans le récepteur est d'autant plus faible que la fréquence de hachage est grande, donc une forte augmentation de cette fréquence nécessiterait l'emploi des composants à commutation rapide. Lorsque l'interrupteur est en position $D=0$ ce qui nous donne :

$$V_L = -V_{out} \quad (II.27)$$

$$L \frac{dI}{dt} = -V_{out} \quad (II.28)$$

$$I(t) = \frac{-V_{out}}{L} t + I_{max} \quad (II.29)$$

$$C \frac{dv}{dt} = I - \frac{V}{R} \quad (II.30)$$

$$I_{max} = \frac{-V_{out}}{L} (1 - D) T + I_{max} \quad (II.31)$$

Donc

$$\Delta I = \frac{V_{out}}{L} (1 - D) T \quad (II.32)$$

A partir des deux équations (II.25) et (II.32) on aura :

$$\frac{V_{out}}{L} (1 - D) T = \frac{V_{in} - V_{out}}{L} DT \quad (II.33)$$

Ce qui implique :

$$V_{out} = D V_{in} \quad (II.34)$$

L'équation (II.34) montre la possibilité de contrôler la tension de sortie moyenne V_{out} en jouant sur le rapport cyclique D .

c. Détermination de L, C :

Selon la figure (II.15), la conduction continue est limitée par $I_{L\ min} = 0$, donc :

$$\Delta I = 2I_0 \quad (II.35)$$

Substituant dans (II.26), on trouve :

$$L_{limit} = \frac{V_{in} - D(1-D)}{2I_0f} \quad (II.36)$$

Alors, le convertisseur fonctionne toujours dans le mode de conduction continue si :

$$L > L_{limit} \quad (II.37)$$

L'ondulation du courant ΔI est maximale pour $D = 0.5$:

$$\Delta I_{max} = \frac{V_{in}}{4fL_{max}} \quad (II.38)$$

$$L_{max} = \frac{V_{in}}{8fI_0} \quad (II.39)$$

Où :

L_{limit} : est la valeur de L à la limite de la conduction continue.

ΔI_{max} : correspond à l'ondulation du courant pour $D = 0.5$

L_{max} : correspond à la valeur de l'inductance pour $D = 0.5$

A partir de la figure II.4 on a :

$$I_c = I - I_0 \quad (II.40)$$

Donc, la capacité se charge pour $I > I_0$ et se décharge pour $I < I_0$ figure II.4 :

II.2.1.3. Convertisseur Buck-Boost :

Hacheur inverseur, dévolteur- survolteur, de type buck-boost. Le hacheur inverseur est un convertisseur indirect DC-DC à stockage inductif. La source d'entrée est de type tension continue (filtrage capacitif en parallèle avec une source de tension) et la charge de sortie continue de type source de tension (condensateur en parallèle avec la charge résistive). Le convertisseur dévolteur-surveolteur combine les propriétés des deux convertisseurs précédents, il est utilisé comme un transformateur idéal de n'importe quelle tension d'entrée pour n'importe quelle tension de sortie désirée; son schéma de base est illustré sur la Figure II.5. [22]

a. Principe de fonctionnement :

Tandis que Le commutateur S est sur la position (on) le courant dans l'inductance augmente, l'énergie est stockée ; et quand le commutateur S se met sur la position (off). La tension à travers l'inductance est inversée 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:

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 II.6.

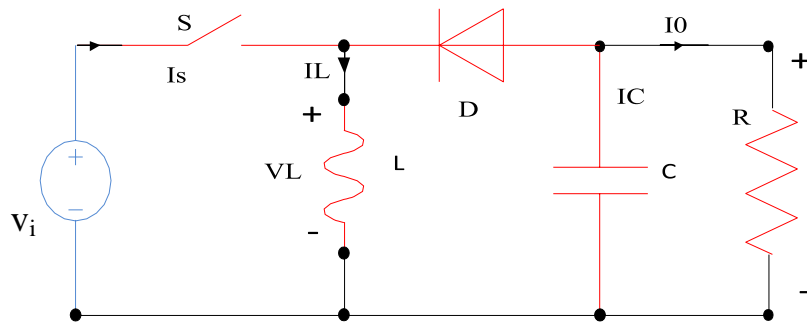


Fig.II.5 : Circuit électrique de base du hacheur survolteur/dévolteur.

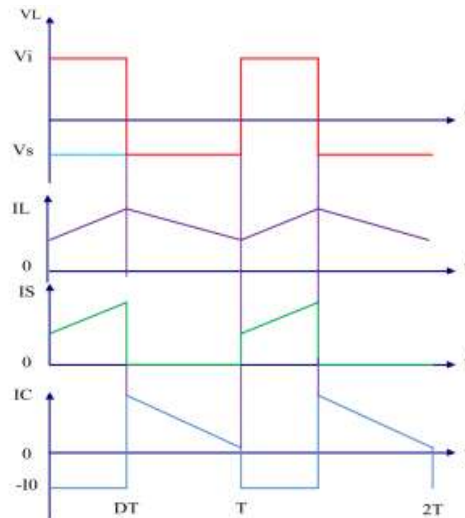


Fig.II.6.Caractéristique de la tension et du courant du Buck-Boost.

b. Modèle du convertisseur :

Si on considère que l'interrupteur est dans la position $D = 1$, et en appliquant les lois de kirchhoff au circuit en résulte, on obtient les équations suivant :

$$V_L = V_{in} \quad (II.41)$$

$$L \frac{dI}{dt} = V_{in} \quad (II.42)$$

$$C \frac{dV}{dt} = \frac{V_{out}}{R} \quad (II.43)$$

A partir de l'équation (II.42)

$$I(t) = \frac{V_{in}}{L} t + I_{min} \quad (II.44)$$

Le courant augmente linéairement avec le temps jusqu'à ce qu'il atteigne son maximum à

$t \rightarrow t_{on} = DT$:

$$I_{max} = \frac{V_{in}}{L} DT + I_{min} \quad (II.45)$$

A partir de l'équation ci-dessus on aura :

$$\Delta I = \frac{V_{in}}{L} DT \quad (II.46)$$

Lorsque la fonction de commutation est $D = 0$, on obtient la dynamique suivante :

$$V_L = -V_{out} \quad (II.47)$$

$$L \frac{dI}{dt} = V_{out} \quad (II.48)$$

$$I(t) = \frac{-V_{out}}{L} t + I_{max} \quad (II.49)$$

$$C \frac{dV}{dt} = I - \frac{V_{out}}{R} \quad (II.50)$$

Quand $t \rightarrow t_{on}$ Le courant à travers l'inductance diminue linéairement de sa valeur maximale à sa valeur minimale :

$$I_{min} = - \frac{V_{out}}{L} (1 - D) T + I_{max} \quad (II.51)$$

Donc :

$$\Delta I = \frac{V_{out}}{L} (1 - D) T \quad (II.52)$$

En combinant ces deux relations (II.46) et (II.52), on peut établir l'expression de la tension de sortie:

$$\frac{V_{in}}{L} DT = \frac{V_{out}}{L} (1 - D) T \quad (II.53)$$

Ce qui implique :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{\text{out}} = \frac{D}{1-D} V_{\text{in}} \\ I_{\text{out}} = -\frac{1-D}{D} I_{\text{in}} \\ R_{\text{out}} = \left(\frac{D}{1-D} \right)^2 V_{\text{in}} \end{array} \right. \quad (\text{II.54})$$

La tension de sortie du convertisseur Buck-Boost est négative par rapport à la tension d'entrée. Son amplitude peut être supérieure ou inférieure à celle de la tension d'entrée selon la valeur du rapport cyclique. C'est un abaisseur-élevateur-inverseur en tension.

c. Détermination de L, C :

La forme du courant à travers l'inductance est illustrée par la figure II.6 :

À partir la figure II.6 :

$$I_{L \min} + \frac{V_{\text{in}}}{2L} DT = I_{L \min} \frac{\Delta I}{2} = I_0 \quad (\text{II.55})$$

Selon la figure (16), la conduction continu est limitée par $I_{L \min} = 0$, donc :

$$\Delta I = 2I_0 \quad (\text{II.56})$$

Substituant dans (II.46), on trouve :

$$L = \frac{V_{\text{in}}}{\Delta I_f} D \quad (\text{II.57})$$

L'onde de courant condensateur est représentée sur la figure II.6:

La forme d'onde de courant de la figure II.6 ; nous permet de déterminer la variation de la tension aux bornes du condensateur. Pendant le temps de l'interrupteur est fermé, la charge sur le condensateur diminue car le condensateur fournit le courant à la charge. La variation de la charge est :

$$\Delta S = -\frac{V_{\text{out}}}{R} DT \quad (\text{II.58})$$

$$|\Delta V| = \frac{\Delta S}{C} = \frac{V_{\text{out}}}{RC} DT \quad (\text{II.59})$$

On en déduit la capacité du condensateur de sortie:

$$C = \frac{V_{\text{out}}}{R \Delta V_{\text{out}}} DT \quad (\text{II.60})$$

II.3 .Convertisseurs DC-AC dans les systèmes PV :

II.3.1. Définition d'un onduleur :

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion d'énergie électrique de la forme continue (DC) à la forme alternative (AC). En fait, cette conversion d'énergie est satisfaite au moyen d'un dispositif de commande (semi-conducteurs). Il permet d'obtenir aux bornes du récepteur une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace, en utilisant ainsi une séquence adéquate de commande [23].

II.3.2.Principe de fonctionnement d'un onduleur :

Un onduleur est un dispositif électronique assurant la conversion statique d'une tension/courant continu en tension /courant alternatif. Il est dit autonome s'il assure de lui-même sa fréquence et sa forme d'onde .Deux types d'onduleurs sont donc utilisés pour assurer une telle conversion [24].

- Onduleur Monophasé.
- Onduleur Triphasé.

II.3.3. Types d'onduleurs :

II.3.3.1 .Onduleur Monophasé :

Ce type d'onduleur délivrant en sa sortie une tension alternative monophasée, est généralement destinée aux alimentations de secours. Deux classes d'onduleurs monophasés sont à distinguer, suivant leur topologie [25].

a. Onduleur monophasé en demi-pont :

Le schéma de principe d'un tel onduleur monté en demi-pont est montré sur la figure II.7.

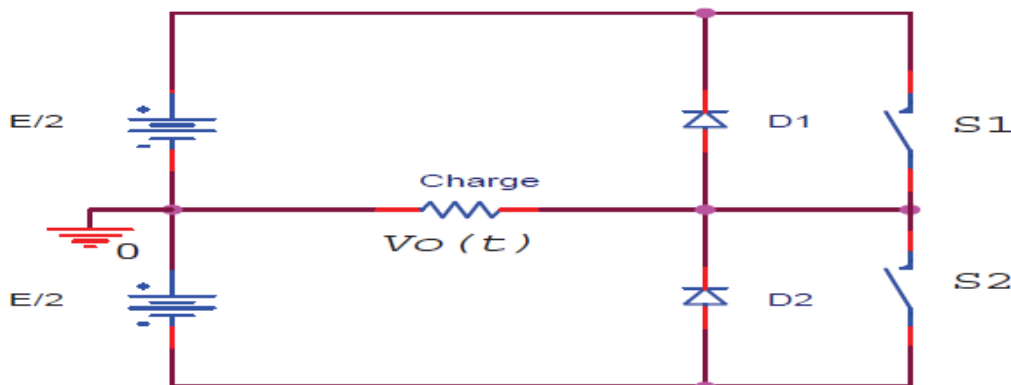


Fig.II.7: Schéma de principe d'un onduleur monophasé en Demi-pont [25].

Il est constitué principalement de deux interrupteurs de puissance notés S_1 et S_2 à commande complémentaire. La durée de conduction de chacun des interrupteurs est alors d'un demi-cycle (180°) correspondant à la fréquence du signal de sortie requis.

Lors de la fermeture de l'interrupteur S_1 , la tension aux bornes de la charge serait donc de $+E/2$, et prend la valeur $-E/2$ quand le second interrupteur, S_2 est fermé.

La conduction simultanée des deux interrupteurs est évitée par l'élaboration d'une commande adéquate qui tient compte des différentes caractéristiques des imperfections de ces interrupteurs de puissance.

Les diodes D_1 et D_2 , dites de récupération, assurent la conduction d'un courant négatif en cas de déphasage de ce dernier par rapport à la tension aux bornes de la charge [26].

b. Onduleur monophasé en pont (Pont H) :

L'onduleur en pont est représenté en figure .II.8, il comporte quatre interrupteurs de puissance désignées par S_1 , S_2 , S_3 et S_4 quand les interrupteurs S_1 et S_2 , sont fermés simultanément la tension imposée aux bornes de la charge prend la valeur $+E$ et de $-E$ lors de la fermeture simultanée des deux autres interrupteurs S_3 et S_4 .

Deux interrupteurs du même bras ne peuvent pas conduire simultanément, par caused'un court-circuit de la source de tension continue [27].

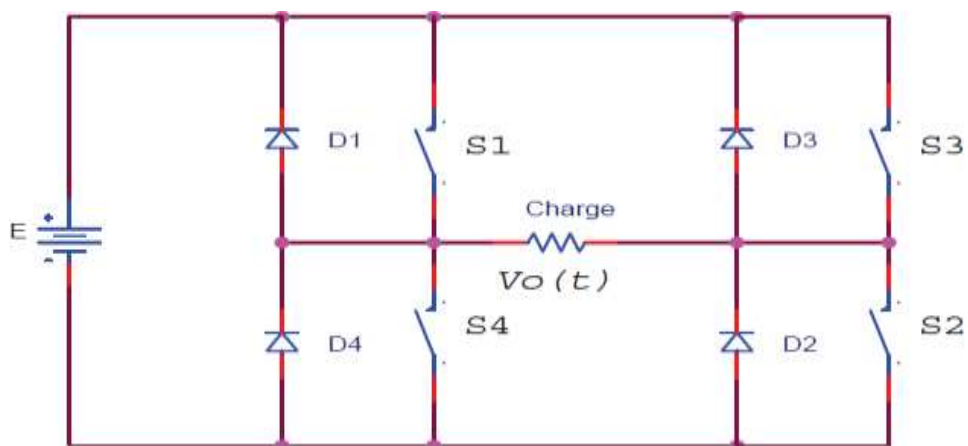


Fig.II.8 : Schéma de Principe d'un Onduleur Monophasé En Pont [27].

II.3.3.2. Onduleur triphasé

On peut réaliser un onduleur triphasé en regroupant, en parallèle, trois onduleurs monophasés (en pont ou en demi-pont) et commander les interrupteurs de chacun pour obtenir à la sortie trois phases décalées de 120° . En fait, en regroupant trois demi ponts monophasés, on obtient un onduleur en pont triphasé à six interrupteurs représenté par la Figure II.9 dont les interrupteurs du même bras de l'onduleur doivent être complémentaires pour que la tension continue U ne soit jamais en court-circuit et pour que les circuits des courants i_a , i_b et i_c ne soient jamais ouverts. Afin que les interrupteurs puissent imposer les tensions de sortie, quelques soient les courants de charge, il faut que ces derniers soient bidirectionnels en courant. Chacun d'eux est formé d'un semi-conducteur à ouverture et à fermeture commandées et d'une diode montée en antiparallèle. Ces interrupteurs peuvent être réalisés, suivant la puissance à contrôler, avec des transistors MOS ou bipolaires, des IGBTs ou des GTOS associés à une diode en antiparallèle pour obtenir la réversibilité en courant. [28], [29], [30].

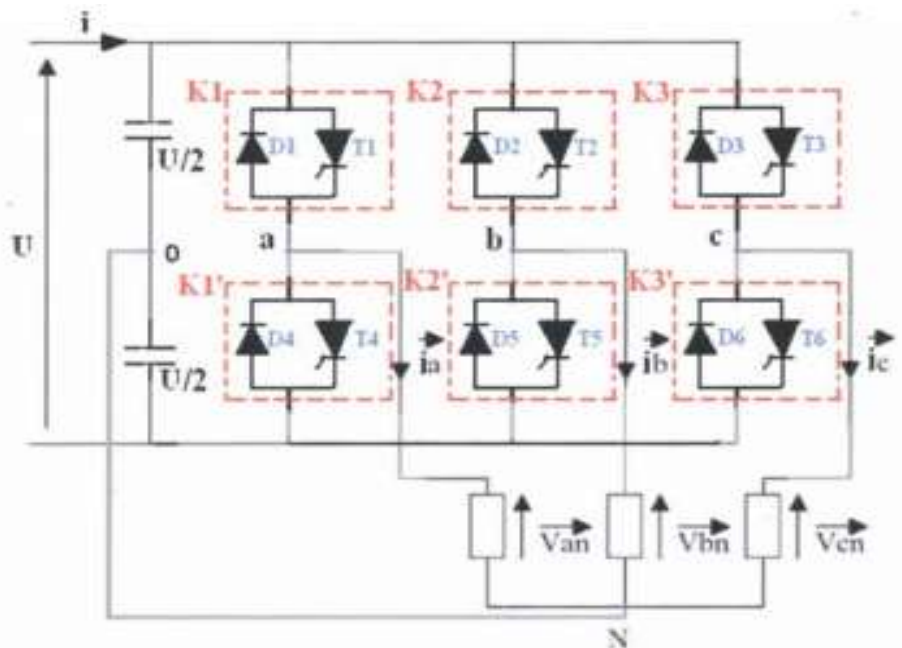


Fig.II.9: Circuit de puissance d'un onduleur de tension triphasé

II.4 Conclusion :

Ce chapitre a été consacré à l'étude des convertisseurs statiques DC/DC (chopper), les plus utilisés dans les systèmes photovoltaïques.

Nous avons décrit les différents convertisseurs tels que, hacheurs (Boost, Buck, Buck-Boost), et les onduleurs (monophasé, triphasé)

CHAPITR III

*Modélisation et
Simulation de GPS*

III.1. Introduction

Le premier objectif de ce travail est de déterminer certains des paramètres de performance caractérisant le comportement d'un Module photovoltaïques (PV) qui ne sont pas fournis dans les spécifications des fabricants. Ceux-ci fournissent la base pour développer un modèle simple pour le comportement électrique du module PV.

Ensuite, en utilisant ce modèle, les effets de la variation du rayonnement solaire, de la température sur la sortie du Module photovoltaïque sont présentés. De plus, le modèle de panneau photovoltaïque est utilisé pour configurer un grand champ photovoltaïque.

Un convertisseur boost pour le panneau PV est conçu. Ce convertisseur est placé entre le panneau et la charge afin de le contrôler au moyen d'un contrôleur de suivi du point de puissance maximale (MPPT).

Le MPPT utilisé est basé sur la conductance, et il est démontré ici que cette technique ne répond pas avec précision lorsque l'irradiation solaire est augmentée. Pour étudier cela, une technique de conductance incrémentale modifiée. Il est démontré que ce système répond avec précision et réduit les oscillations en régime permanent lorsque l'irradiation solaire et la température sont variées.

Enfin, les simulations de l'algorithme conventionnel et modifié sont comparées, et les résultats montrent que l'algorithme modifié fournit une réponse précise à une augmentation soudaine de l'irradiation solaire et de la température.

III.2 Caractéristiques de Module PV Soltech 1-STH-215-P

On peut résumer les caractéristiques de ce panneau photovoltaïque dans le tableau suivant

PV Modèle	1STH-215-P
Courant de court-circuit I_{cc}	7.84 A
Tension de circuit ouvert V_{co}	36.6 V
Tension Max V_{mpp}	29 V
Courant Max I_{mpp}	7.35 A
Puissance Max P_{mpp}	213.15 W
Nombre de Cellules N_s	60
Coefficient température de I_{cc}	-0.36099 %/°C
Coefficient température de V_{co}	0.102 %/°C
facteur d'idéalité de la diode A	0.98117
Résistance en Séries R_s	0.39383 Ω
Résistance en shunt R_{sh}	313.3991 Ω

Tab.III.1 Caractéristiques de panneau PV Soltech 1-STH-215-P

Dans ce chapitre on va étudier un générateur photovoltaïque de 20 chaines en parallèle et 10 modules en série du 42630W, 290V.

Ces graphes illustrent les caractéristiques de Puissance et courant en fonction de Tension sous conditions standard $G=1000W/m^2$ et $T= 25C^{\circ}$.

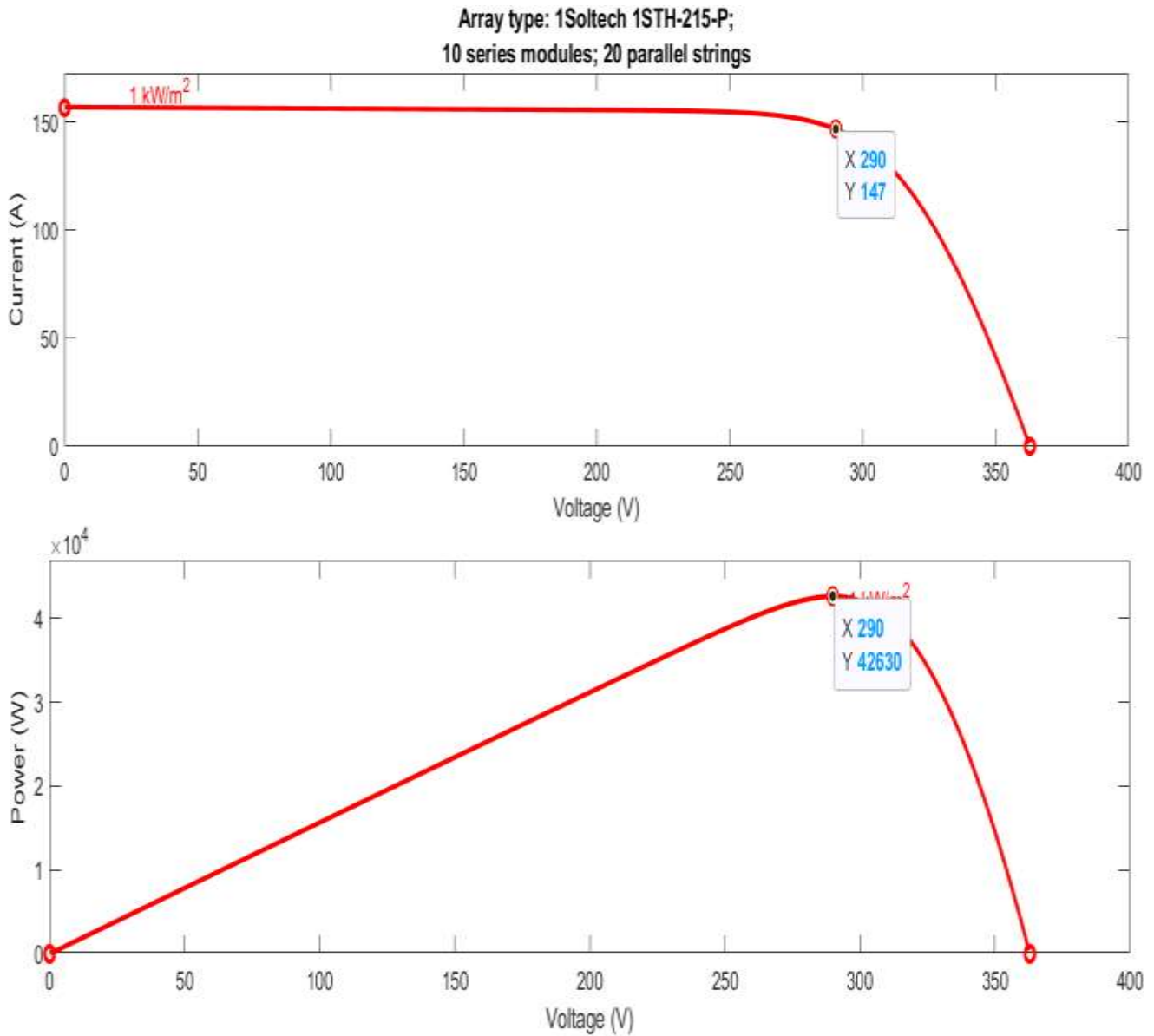


Fig. III. 1. Caractéristiques $P(V)$ et $I(V)$ de GPV sous STC

La figure-3- montre que le courant du panneau PV dépend fortement sur le rayonnement solaire.

Par conséquent, le changement d'irradiation affecte fortement la puissance du panneau PV.

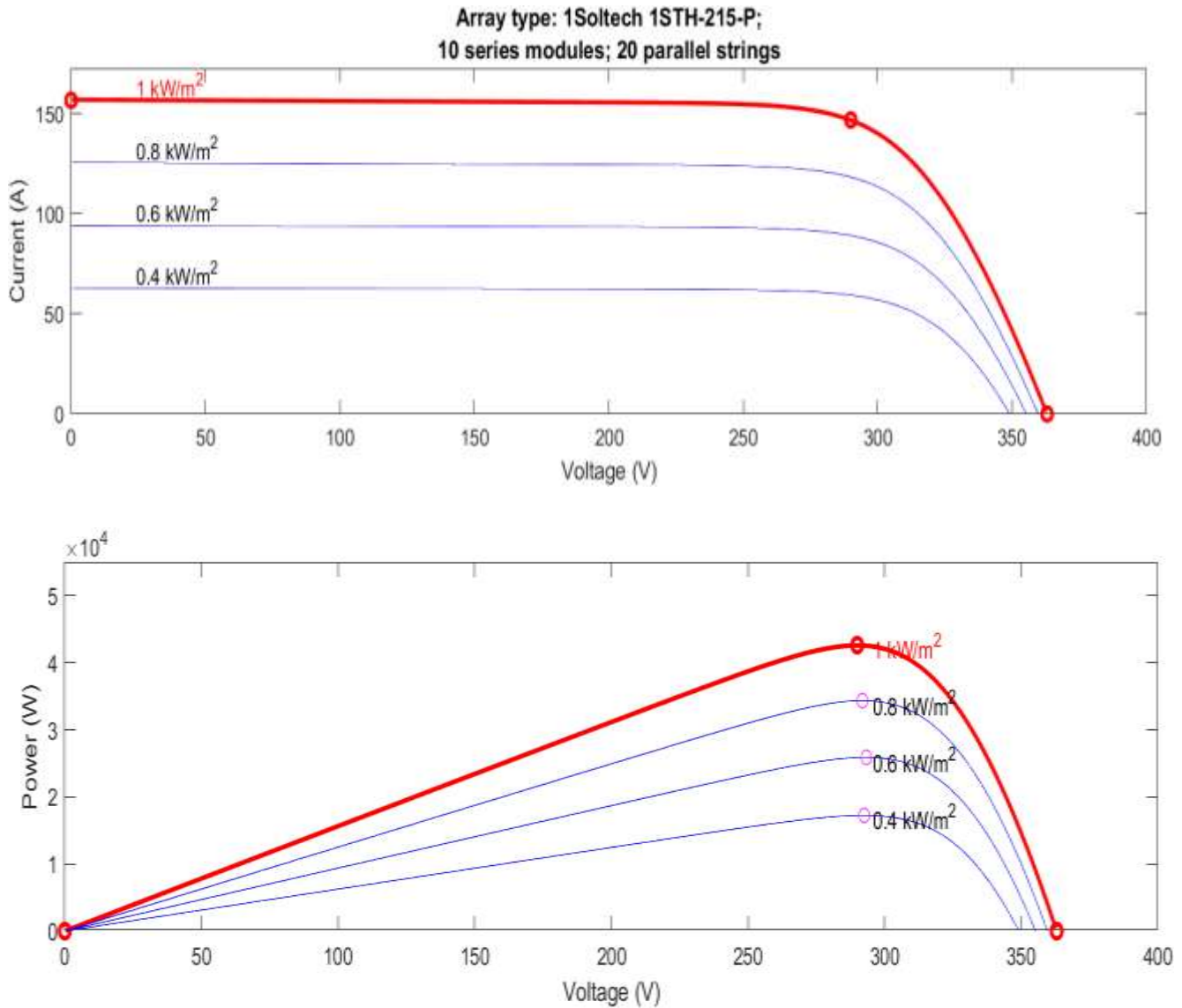


Fig. III.2. L'influence de l'éclairement sur les caractéristiques $P(V)$, $I(V)$

Généralement, la figure.III.4 montre les courbes I(V)et P(V) pour différentes valeurs de température, pour un rayonnement solaire fixe et lorsque la température augmente, la tension de circuit ouvert diminue et le courant de court-circuit augmente avec une petite valeur. Par conséquent, le changement de température affecte fortement la tension du panneau photovoltaïque.

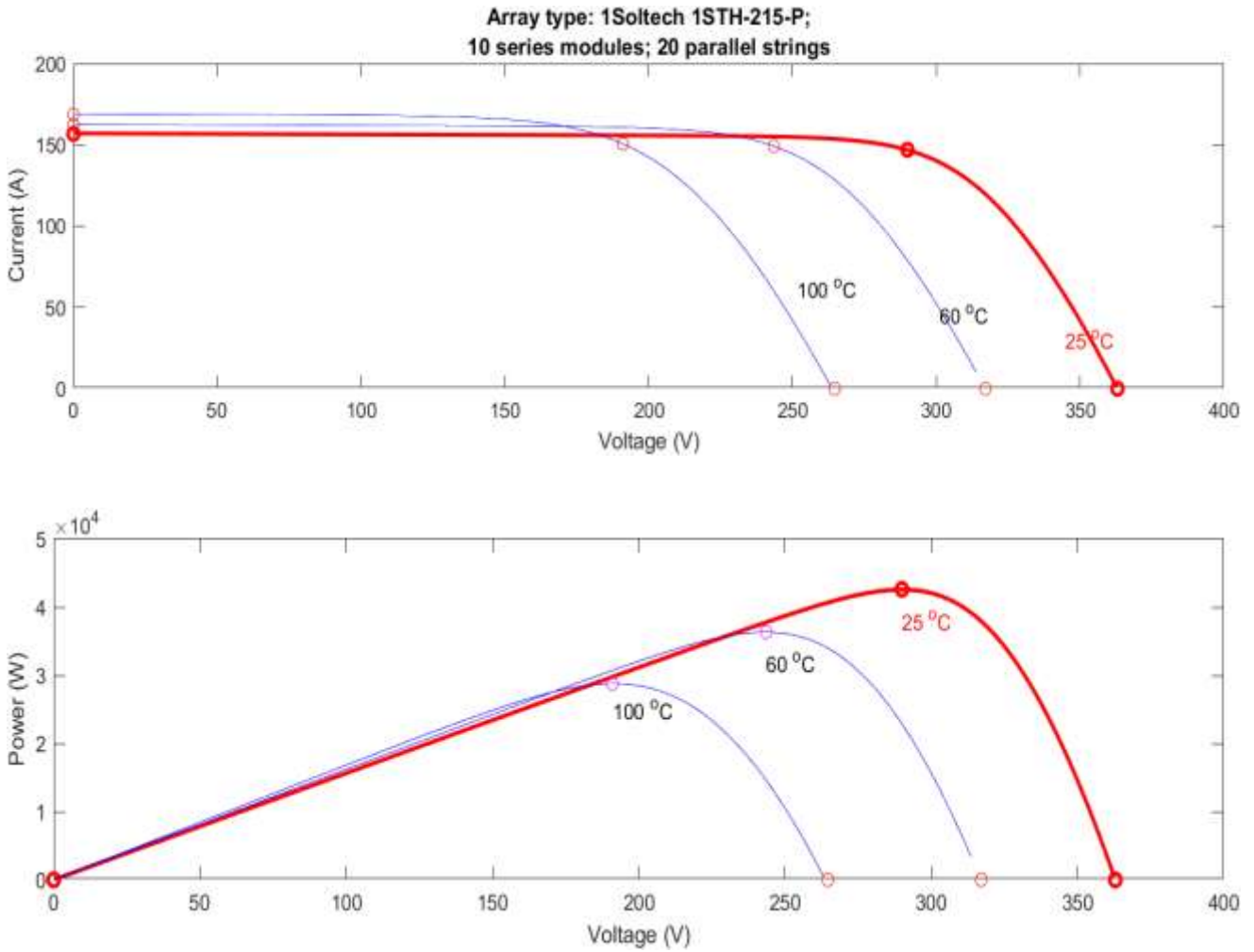


Fig. III.3.L'influence de la température sur les caractéristiques P(V), I(V)

III.3. Caractéristiques de convertisseur

Le convertisseur DC-DC (hacheur) convertit la source de tension d'entrée CC en tension de sortie CC supérieure ou inférieure. Étant donné que la tension du générateur photovoltaïque est supérieure à la tension de la batterie

Le convertisseur abaisseur fonctionne comme un régulateur pour abaisser la tension d'entrée du générateur photovoltaïque tout en maintenant sa puissance délivrée pour charger la batterie. Ceci est réalisé en diminuant la tension d'entrée et en augmentant le courant de sortie fourni à la batterie. Le circuit convertisseur abaisseur se compose d'un dispositif de commutation MOSFET, d'une inductance haute puissance, d'une diode Schottky et d'un condensateur d'entrée et de sortie.

V_{input}	250-350 V
V_{output}	400-600 V
Puissance nominale	100 KW
Fréquence	5 KHZ
Ondulation en courant ΔI	5%
Ondulation en tension ΔV	1%
L'inductance	1.45 mHenry
Capacité	3227 μF

Tab.III.2 Caractéristiques du convertisseur

III.4. Simulation du GPV avec MPPT et un convertisseur DC-DC

III.4.1. L'organigramme de l'algorithme MPPT

Le P&O MPPT est couramment utilisé dans de nombreux contrôleurs de charge solaire PV commerciaux et onduleurs connectés au réseau de petite et moyenne Tension en raison de son efficacité de suivi et de sa simplicité de mise en œuvre.

L'algorithme MPPT suit la puissance maximale du générateur photovoltaïque et envoie son cycle de service correspondant à la puissance maximale suivie au contrôleur de charge de la batterie.

L'algorithme observe les changements de puissance et perturbe la tension de fonctionnement du panneau photovoltaïque en modifiant le cycle de service du dispositif de commutation du convertisseur, ce qui modifie à son tour la résistance d'entrée effective du convertisseur abaisseur. Il observe alors à nouveau s'il atteint la puissance maximale et ce processus se répète indéfiniment

L'organigramme de l'algorithme P&O MPPT est illustré à la Fig.III.4

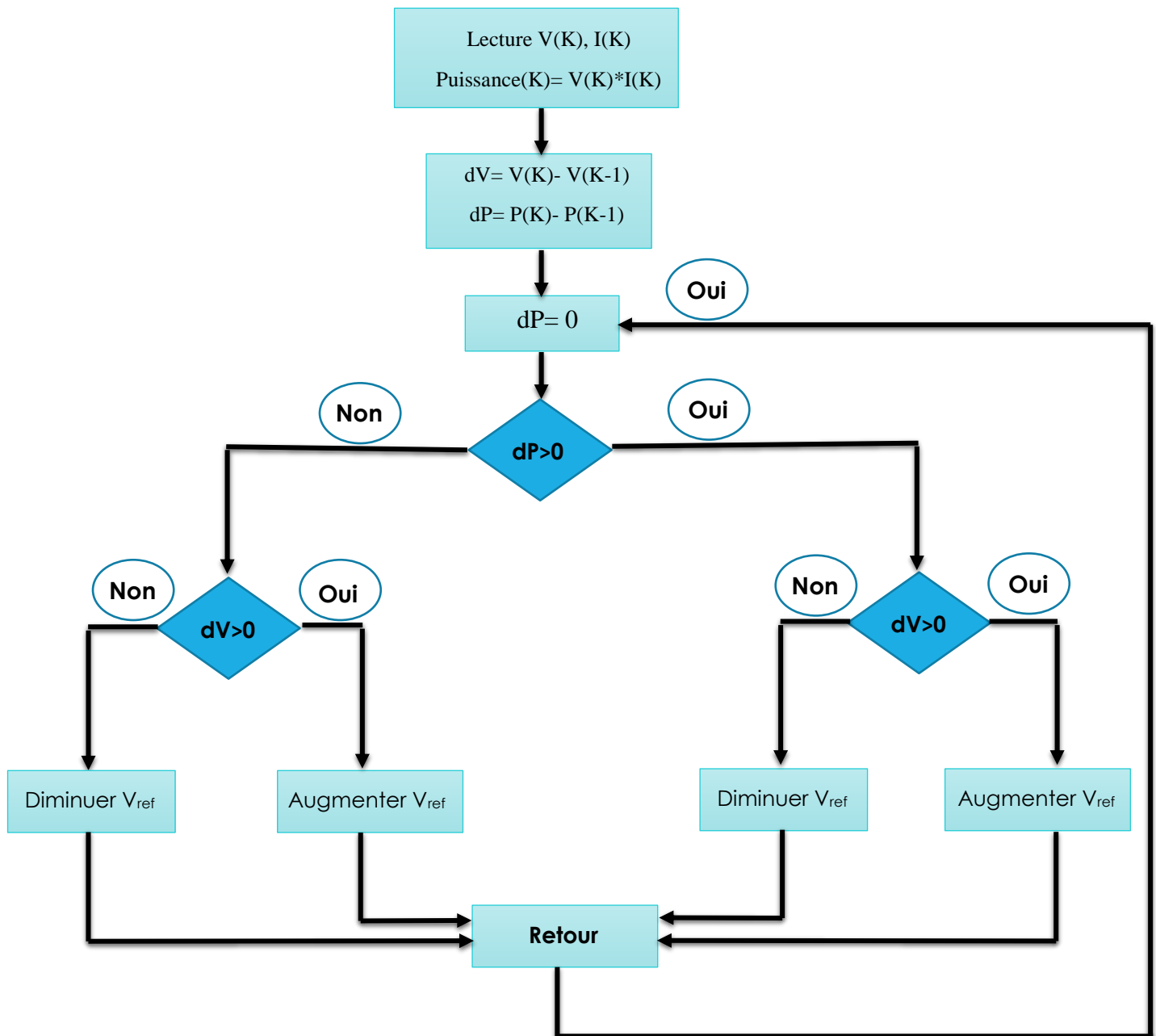


Fig.III.4. L'organigramme de l'algorithme MPPT

III.4.2. Schéma bloc de Simulation

Nous avons faire l'étude et la simulation par MATLAB-SIMULINK version R2020a du convertisseur DC-DC (hacheur) et son commande MPPT pour chercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale.

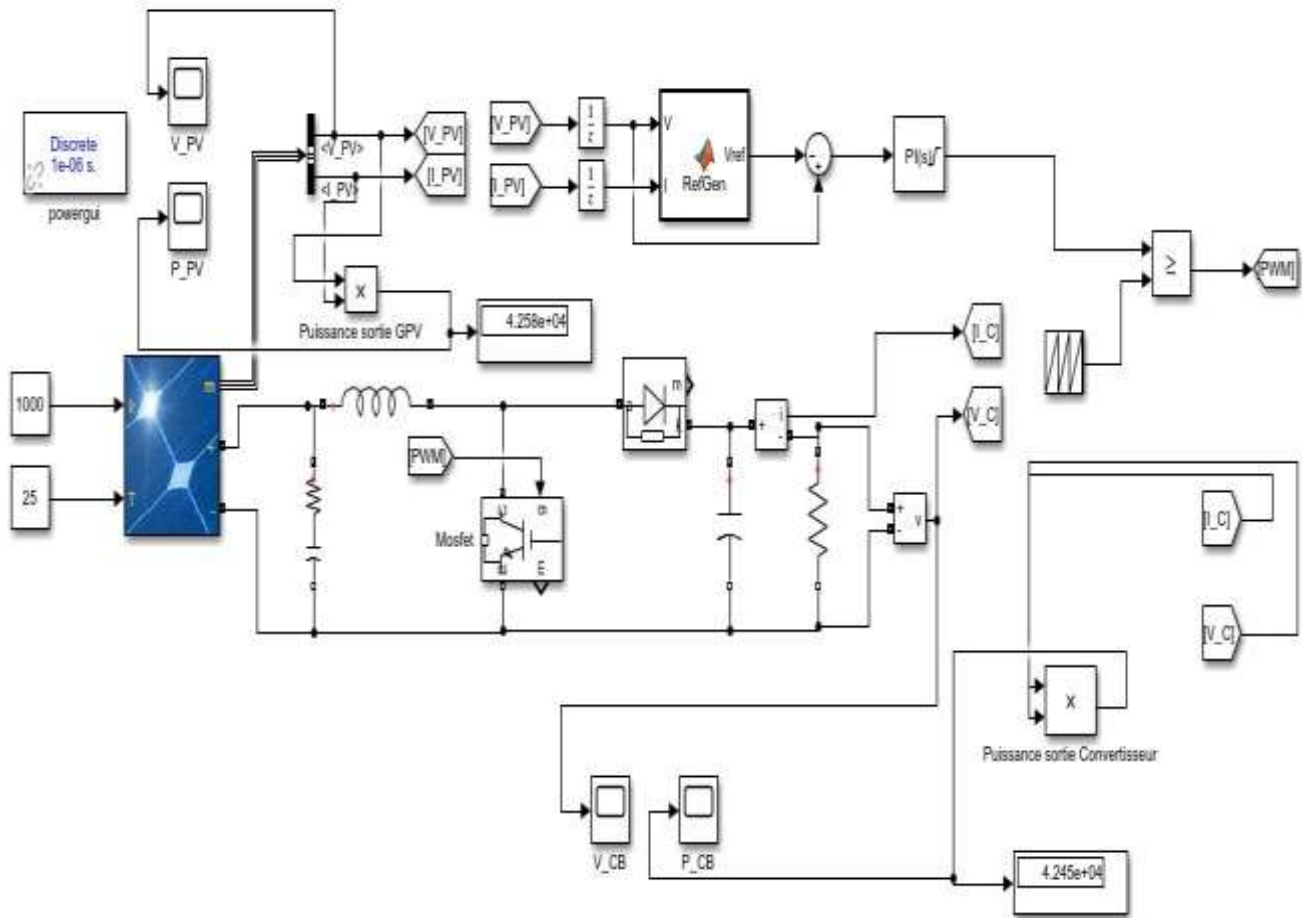


Fig.III.5. Schéma MATLAB-SIMULINK avec une commande MPPT (P&O) et un convertisseur (DC/DC)

III.5. Fonctionnement sous conditions standards constantes

L'objectif de cette série de simulations est concentré et focalisé sur les ondulations au niveau de la puissance et de la tension concédèrent les paramètres T et G sont maintenus constamment égaux aux conditions standards qui sont respectivement $T = 25^{\circ}\text{C}$ et $G = 1000\text{W/m}^2$ pendant 10 seconds.

III.5.1. Résultats de la simulation à la sortie du GPV

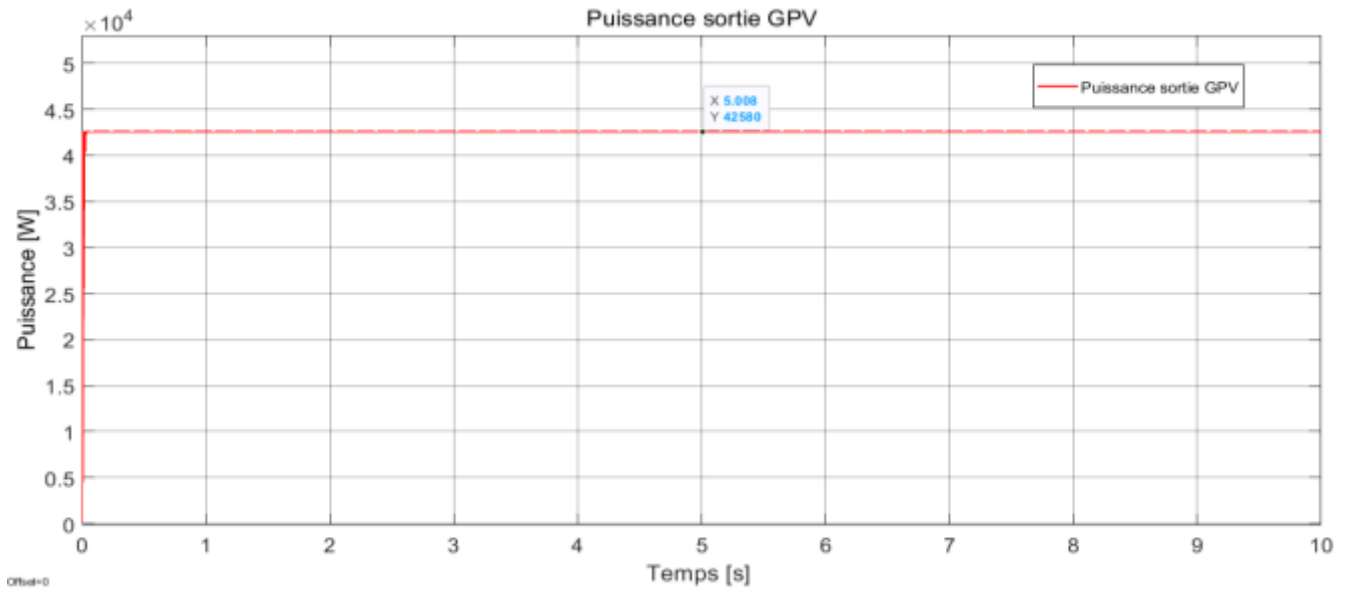


Fig.III.6. Puissance de sortie GPV

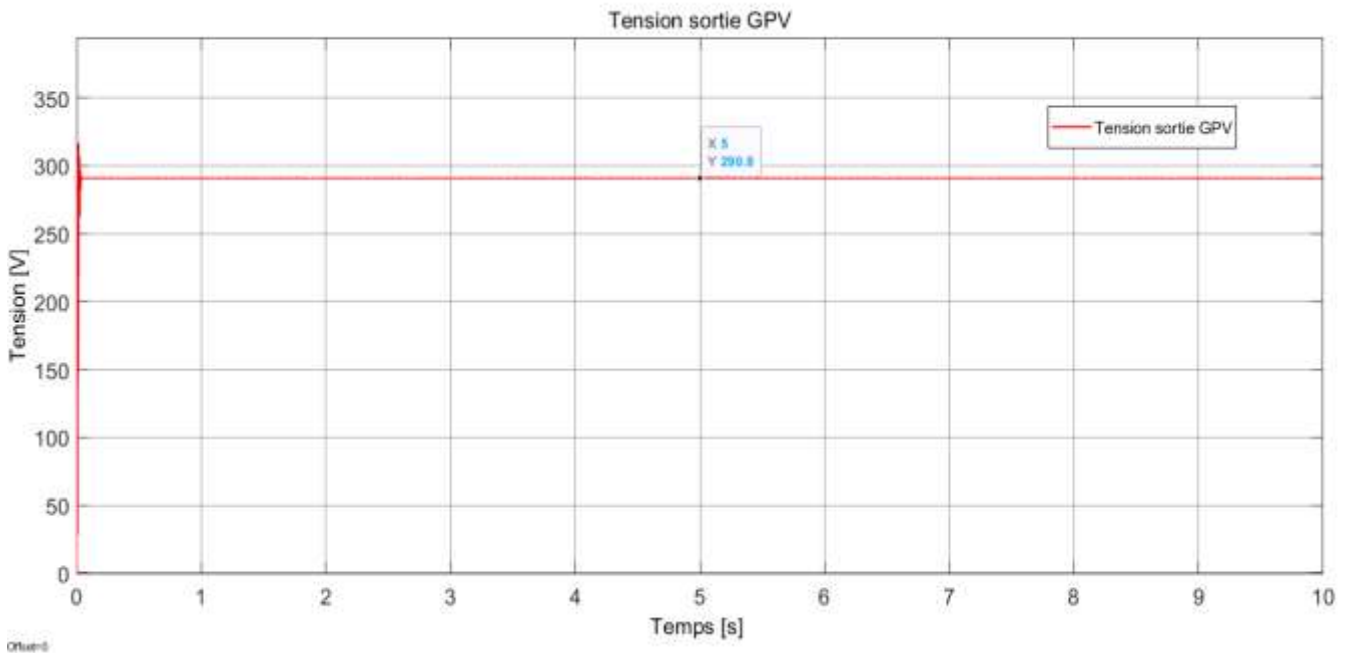


Fig.III.7. Tension de sortie GPV

III.5.2. Résultats de la simulation à la sortie du Convertisseur

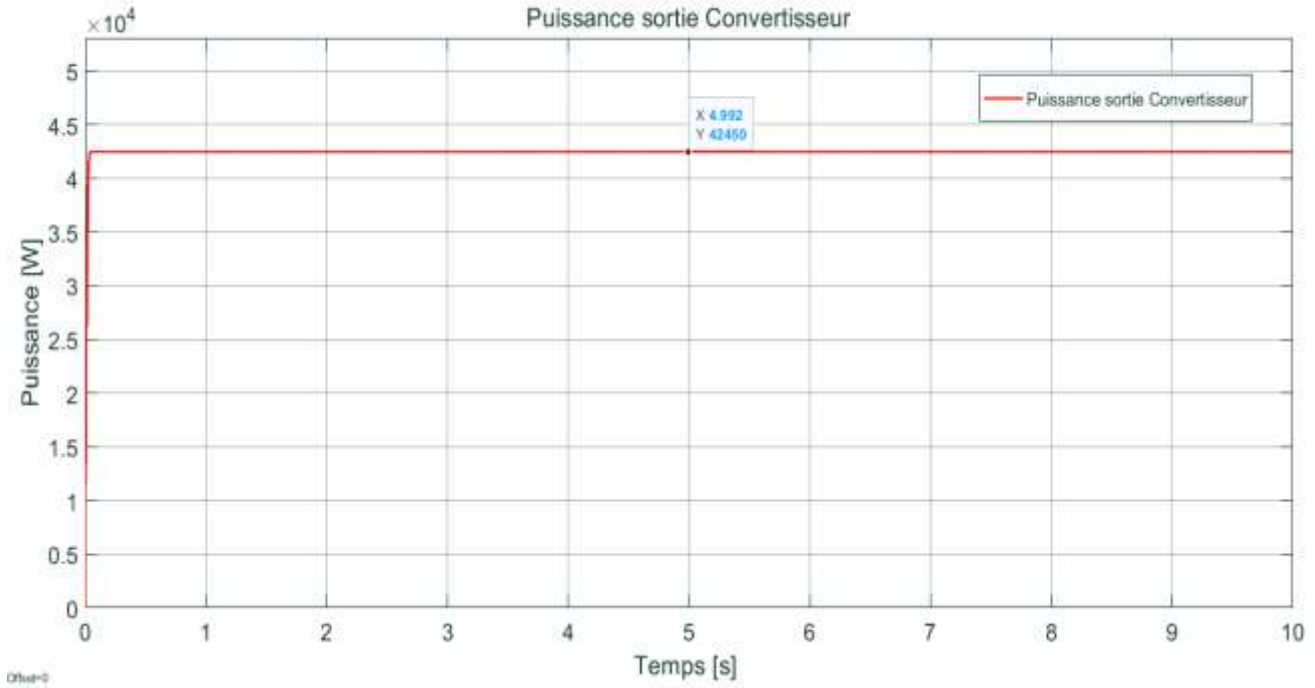


Fig.III.8. Puissance de sortie Convertisseur

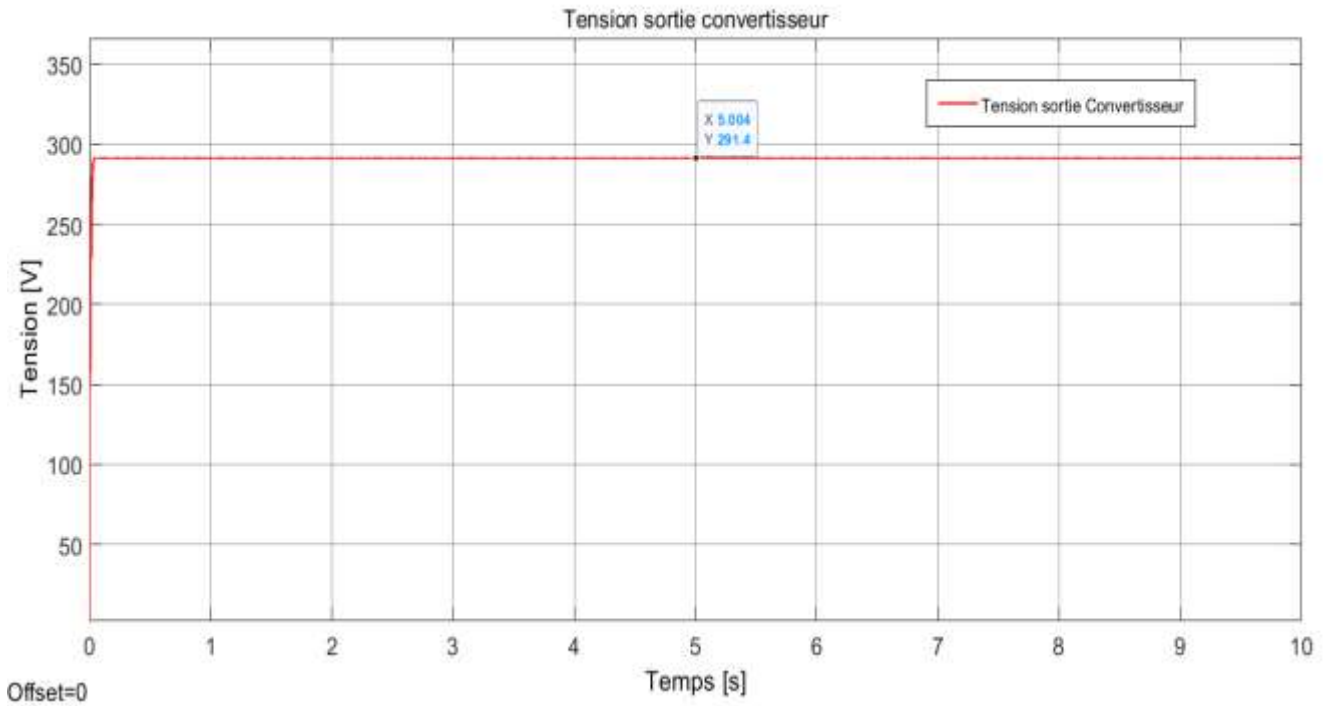


Fig.III.9. Tension de sortie Convertisseur

III.5.3 Interprétation des résultats

Faisant suite à les résultats expérimentales de la simulation on a constaté que les grandeurs électriques à la sortie du générateur PV et celles de convertisseur qui contrôler par la commande MPPT se stabilisent autour des valeurs prévues.

Après le régime transitoire d'une durée de 0.04s, la commande MPPT reviens à chercher le point de de fonctionnement optimal Cette commande est nommée suiveur du point de puissance maximale.

L'augmentation de la puissance et de la tension à la sortie de convertisseur est adaptée et l'oscillation en régime permanent a été totalement éliminée dans le cas Du P&O MPPT amélioré par la commande MPPT en comparaison avec la puissance et la tension de sortie du générateur PV.

III.6. Fonctionnement sous conditions environnementales variables

III.6.1 Eclairage variable et température constante

Nous avons effectué une simulation ou nous avons maintenu une température constante pour différents éclairements 1000, 800, 600, 400 pendant 2 seconds, avec une température constante $T=25C^{\circ}$.

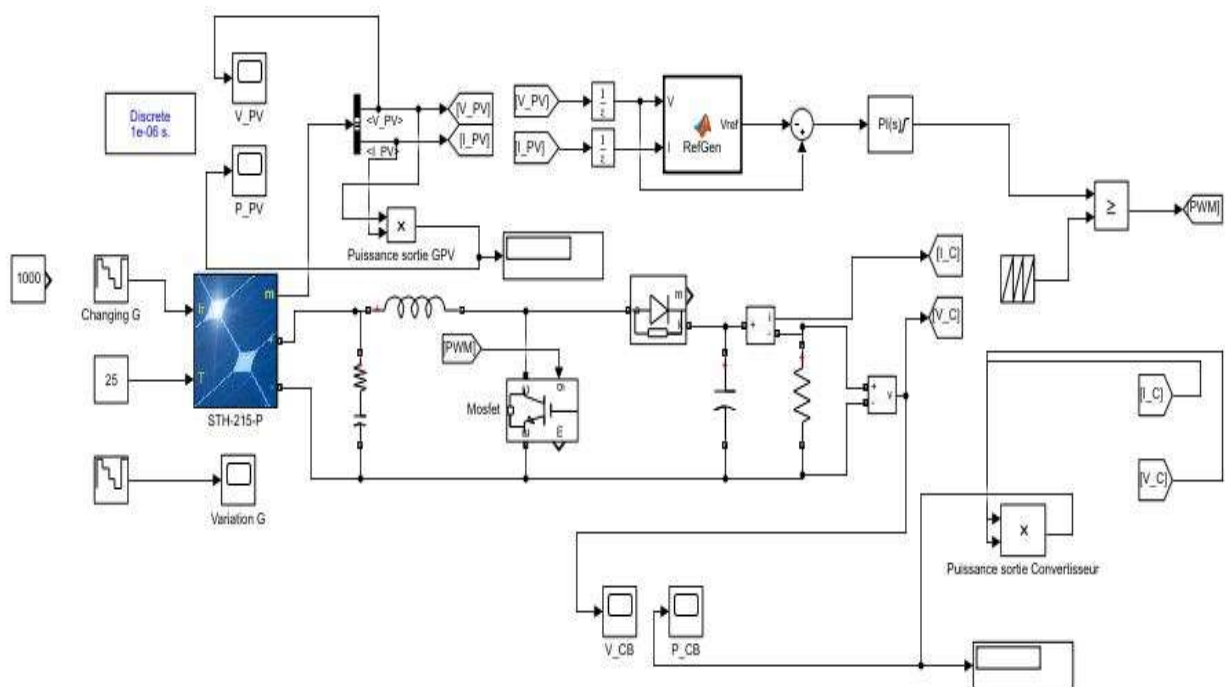


Fig.III.10. Schéma bloc de simulation avec variation de l'éclairage et température constante

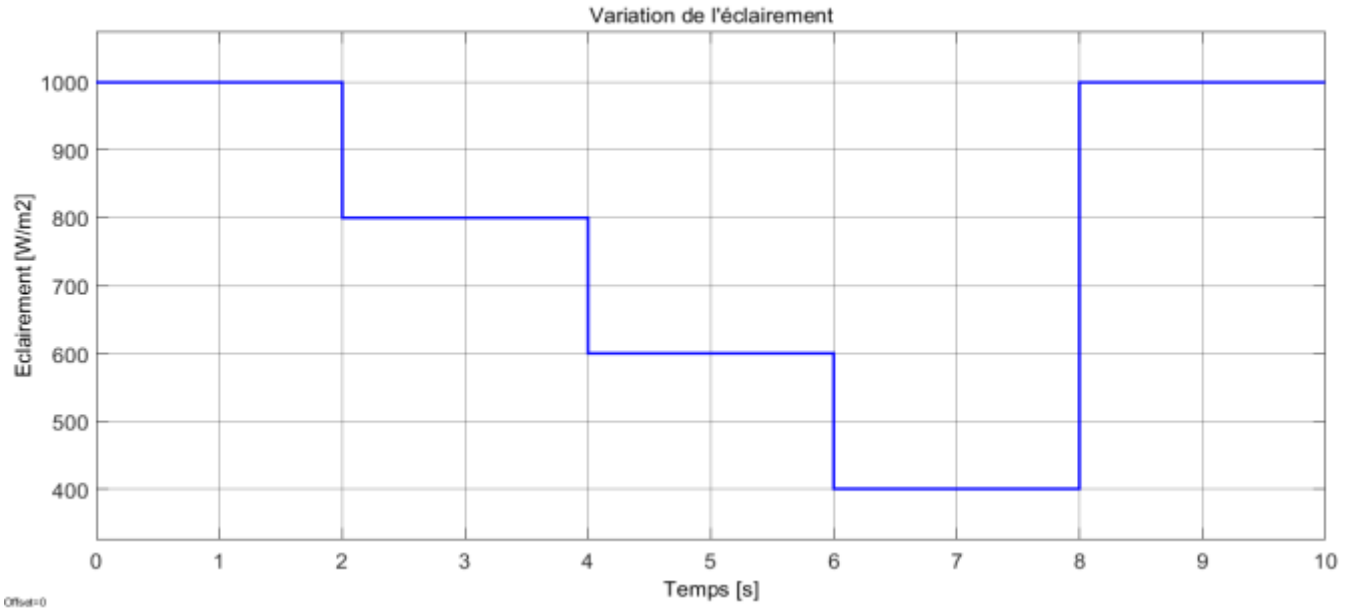


Fig.III.11. Variation de l'éclairement en fonction du temps

III.6.1.1 Résultats de la simulation à la sortie du GPV

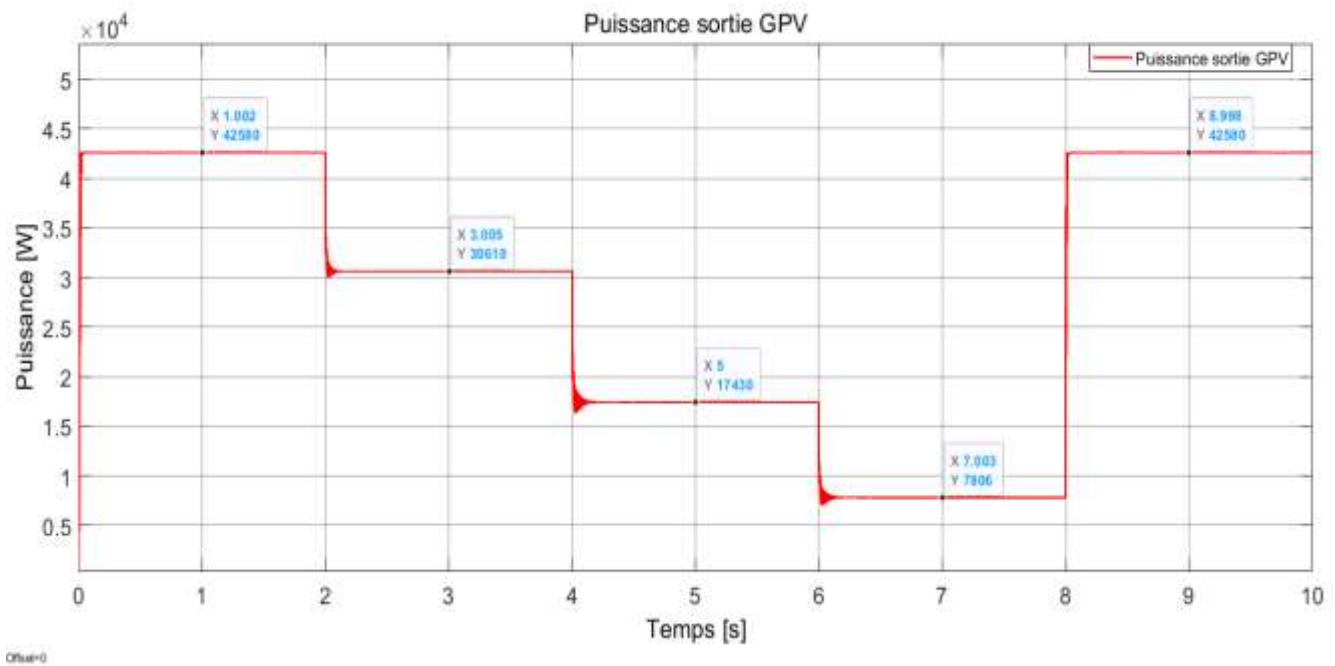


Fig.III.12. Puissance de sortie GPV pour éclairement variable

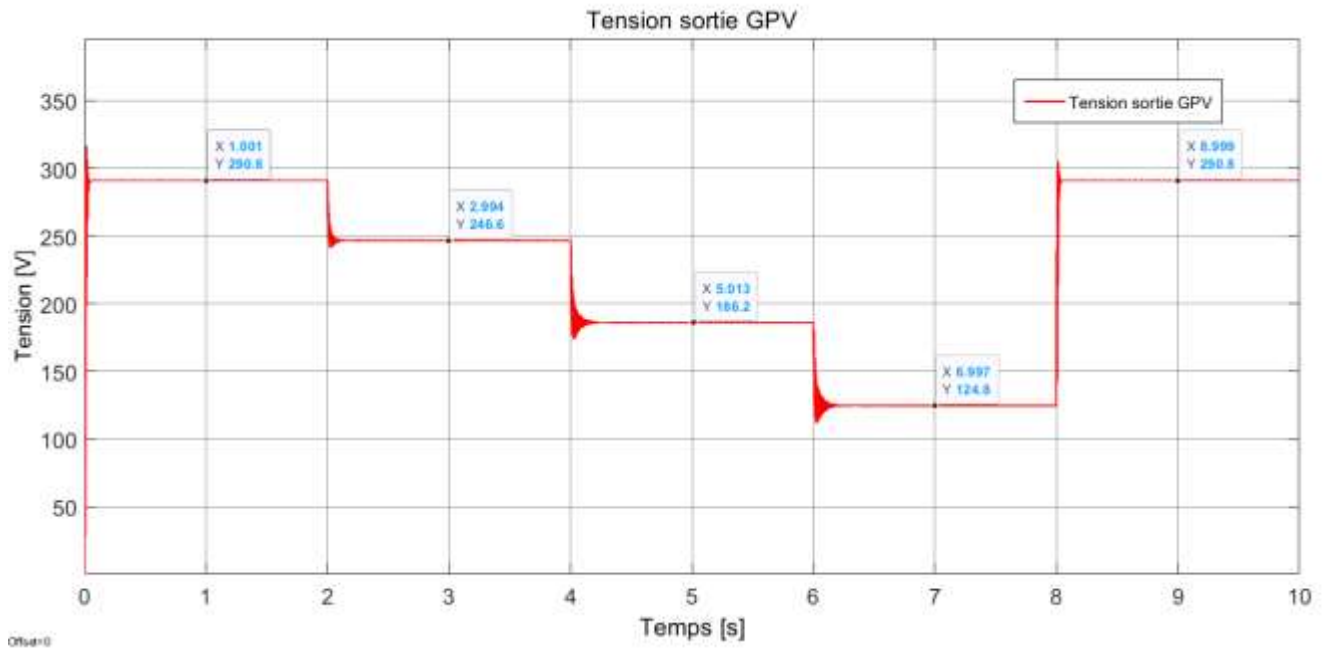


Fig.III.13. Tension de sortie GPV pour éclairement variable

III.6.1.2. Résultats de la simulation à la sortie du Convertisseur

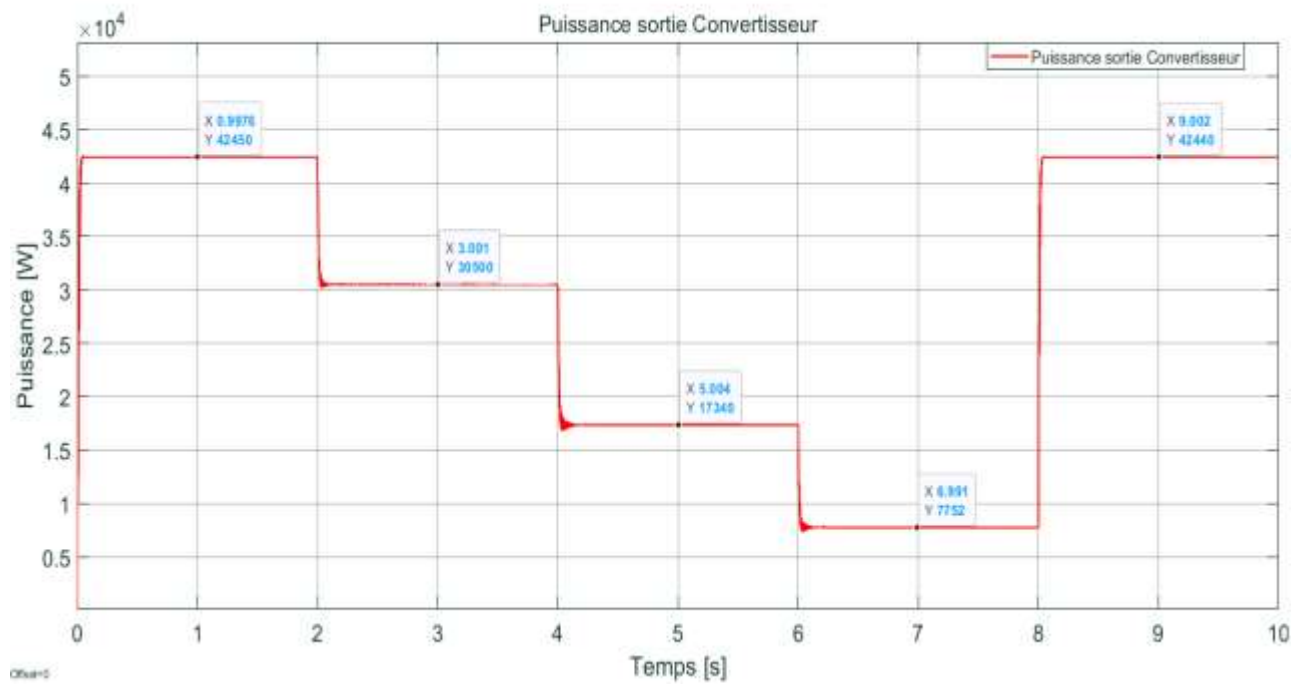


Fig.III.14. Puissance de sortie convertisseur pour éclairement variable

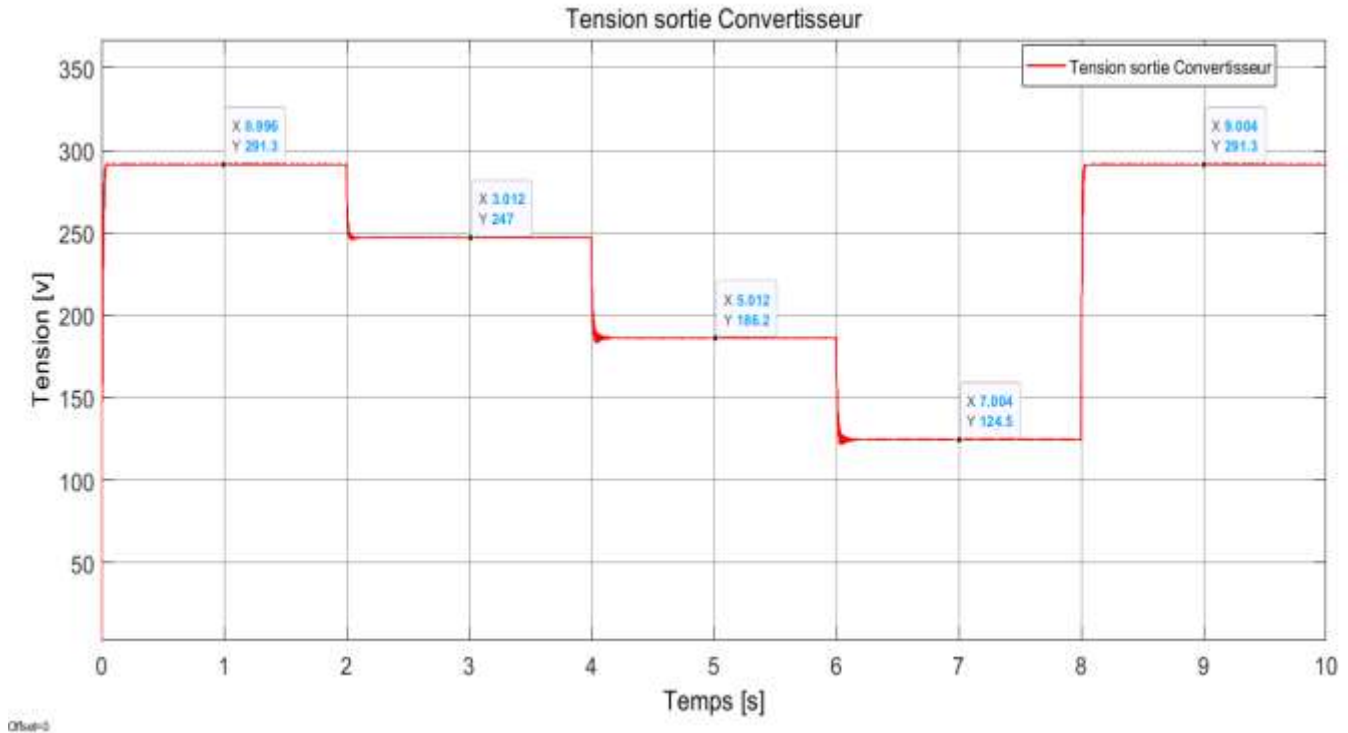


Fig.III.15. Tension de sortie convertisseur pour éclairage variable

III.6.1.3. Interprétation des résultats

Notons que pour de faibles irradiances solaires, la puissance produite par le module dans ces conditions est relativement faible. Pour un ensoleillement de 400 W/m^2 , la puissance est d'environ 0.77 KW . De même pour un ensoleillement de 600 W/m^2 , cette puissance a augmenté et a atteint la valeur de 17.3 KW . Et pour 800 W/m^2 la puissance a augmenté et a atteint la valeur de 30.5 KW . Pour ces valeurs de l'ensoleillement, la marge d'erreur est relativement faible.

Lorsque l'ensoleillement a augmenté, la puissance produite par le module a atteint la valeur de 42.4 KW dans le cas des conditions climatiques favorables.

L'étude comparative lié au variation de l'éclairage prend en compte la rapidité du suivi de point de puissance maximale et l'oscillation autour de point de fonctionnement optimal par la commande MPPT P&O.

III.6.2 Température variable et éclairage constant

III.6.2.1 Température variable et éclairage constant par profil lent

Nous avons effectué une simulation où nous avons maintenu un éclairage constant $G=1000\text{W/m}^2$ pour différentes températures 25, 50, 70, 100 pendant 10s et le temps de variation prend une seconde 1s en utilisant la répétition de séquence.

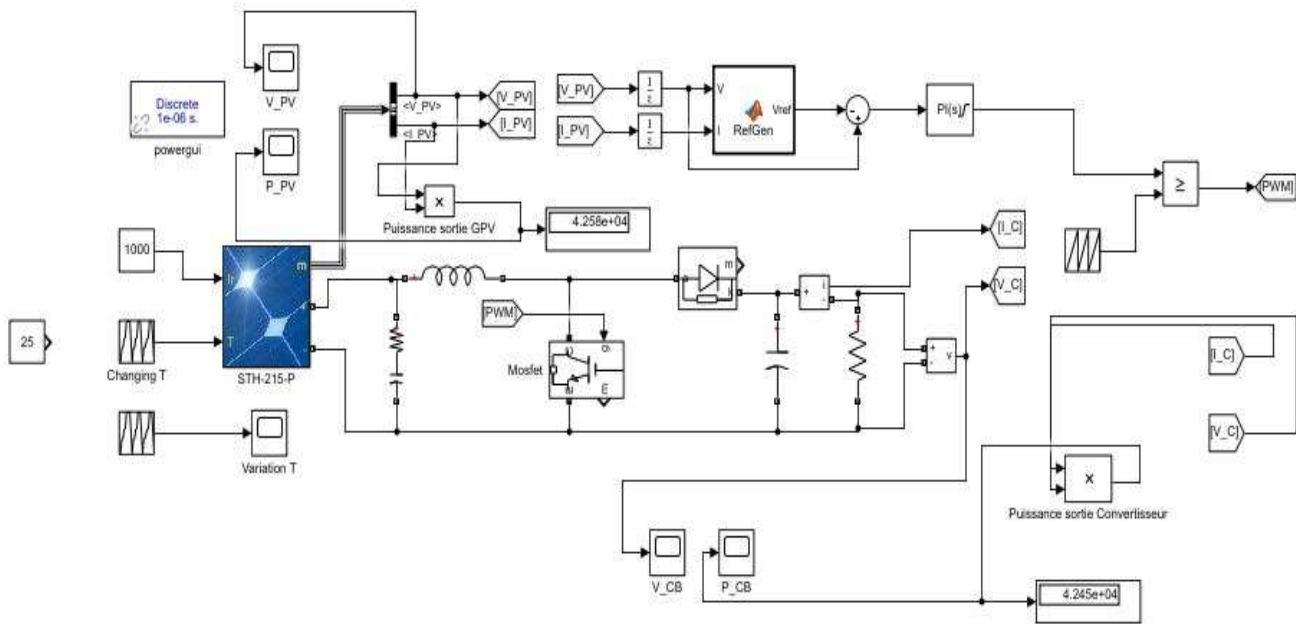


Fig.III.16. Schéma bloc de simulation avec variation de la température et éclairage constant profil lent en utilisant repeating sequence

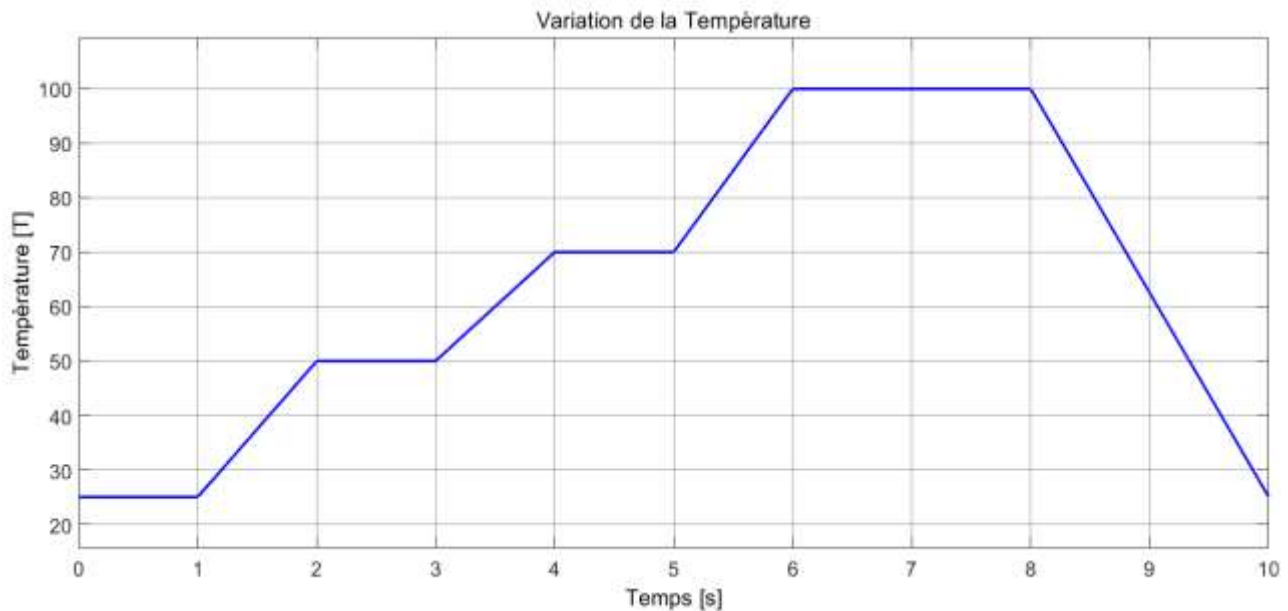


Fig.III.17. Variation de la température en fonction du temps par profil lent

a. Résultats de la simulation à la sortie du GPV

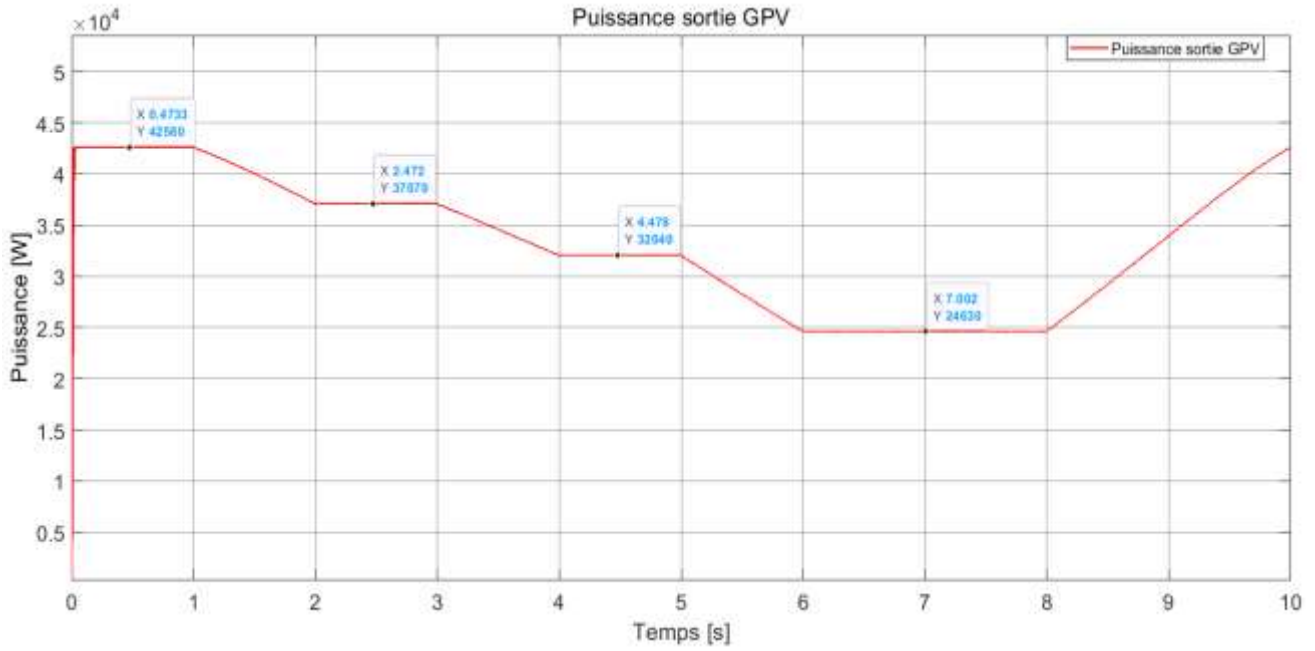


Fig.III.18. Puissance de sortie GPV pour température variable

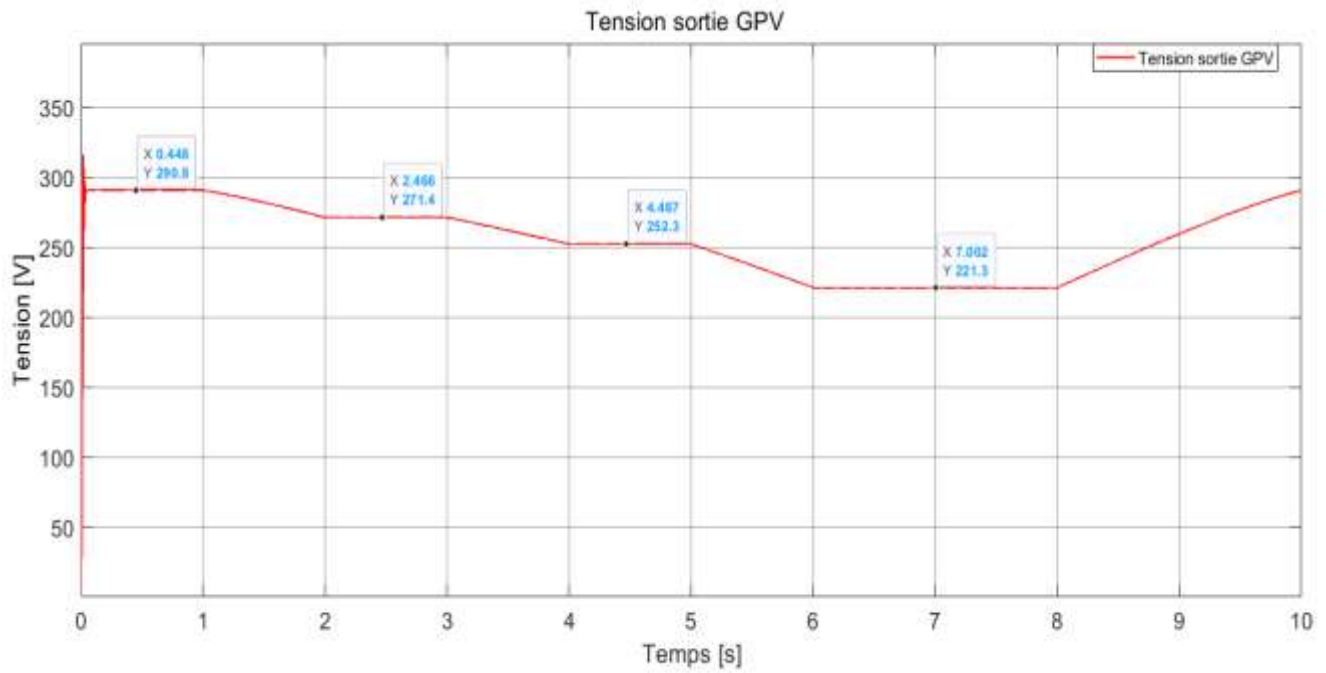


Fig.III.19. Tension de sortie GPV pour température variable

b. Résultats de la simulation à la sortie du Convertisseur

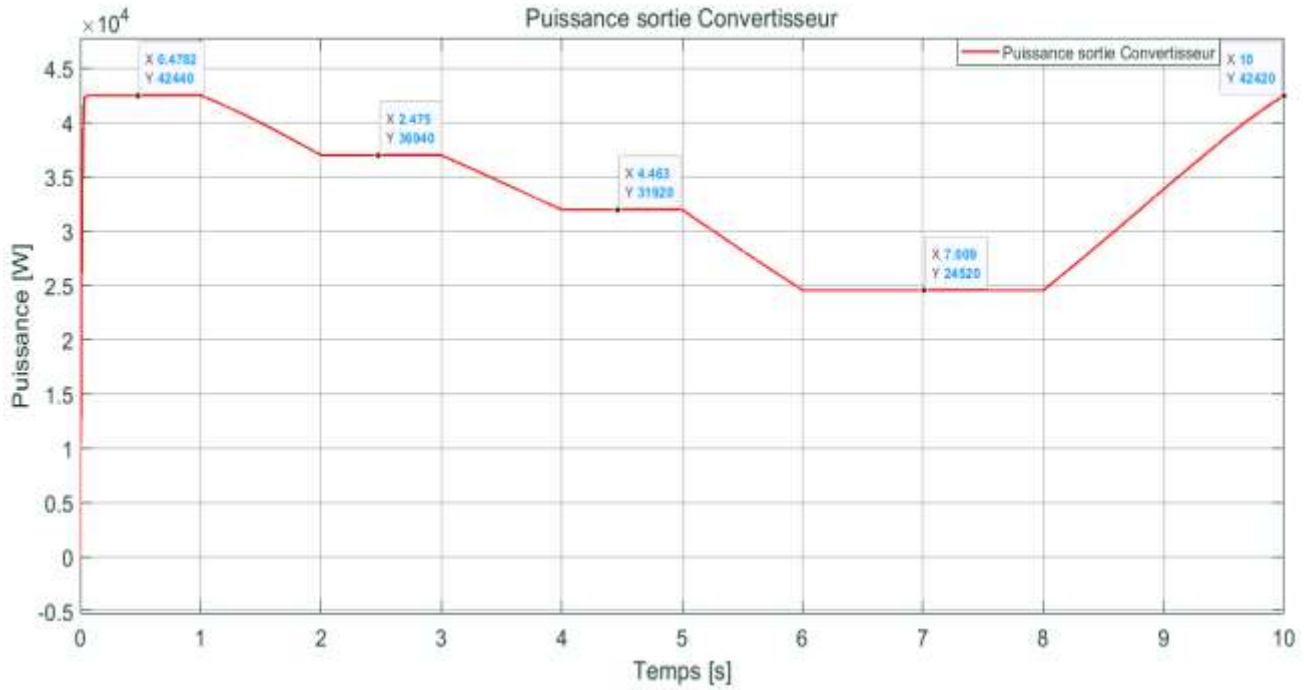


Fig.III.20. Puissance de sortie Convertisseur pour température variable

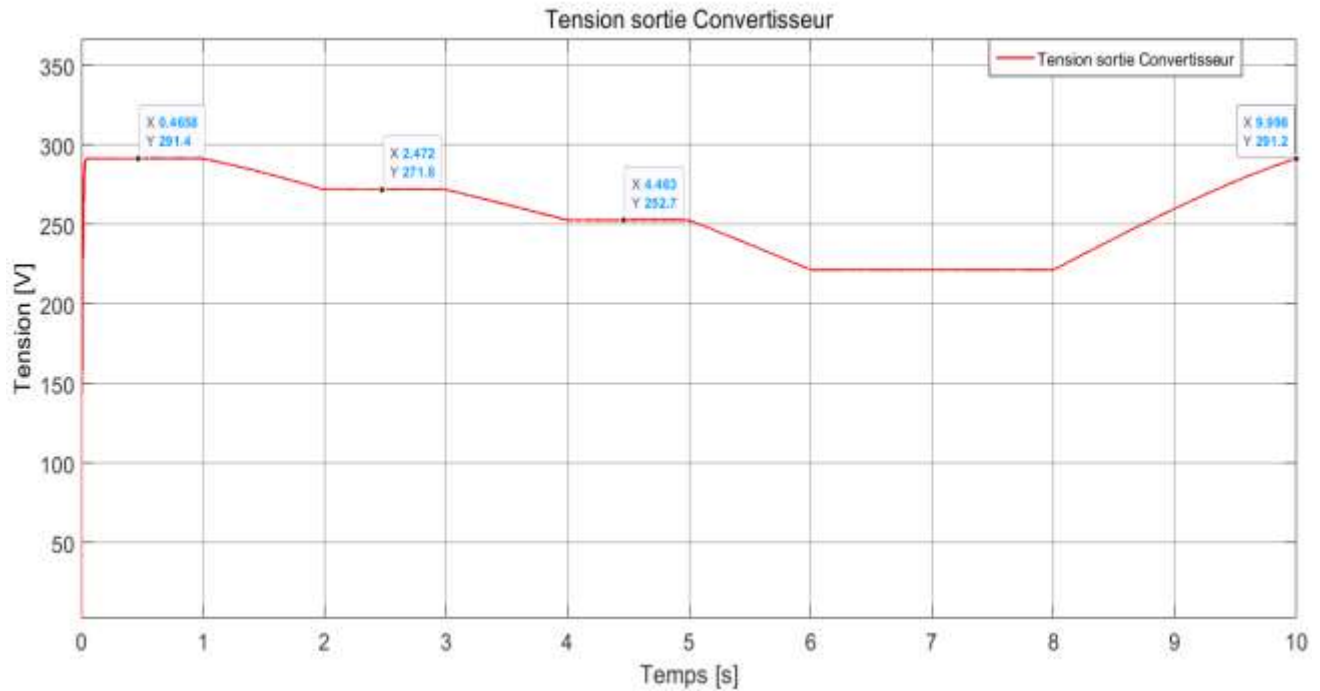


Fig.III.21. Tension de sortie Convertisseur pour température variable

III.6.2.2 Température variable et éclairement constant par profil rapide

Nous avons effectué une simulation où nous avons maintenu un éclairage constant $G=1000\text{W/m}^2$ pour différentes températures 25, 50, 70, 100 pendant 2s et le temps de variation se prend 0.4s en utilisant la répétition de séquence en escalier.

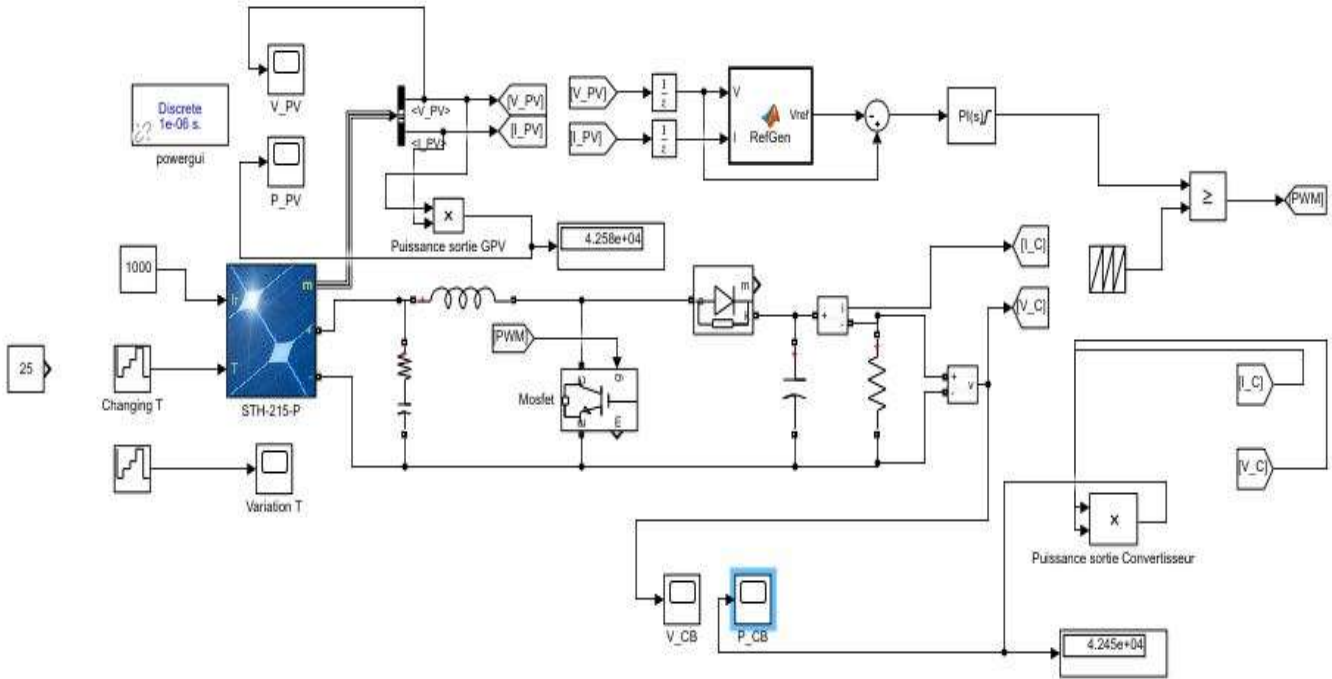


Fig.III.22. Schéma bloc de simulation avec variation de la température et éclairement constant profil lent en utilisant repeating sequence stair

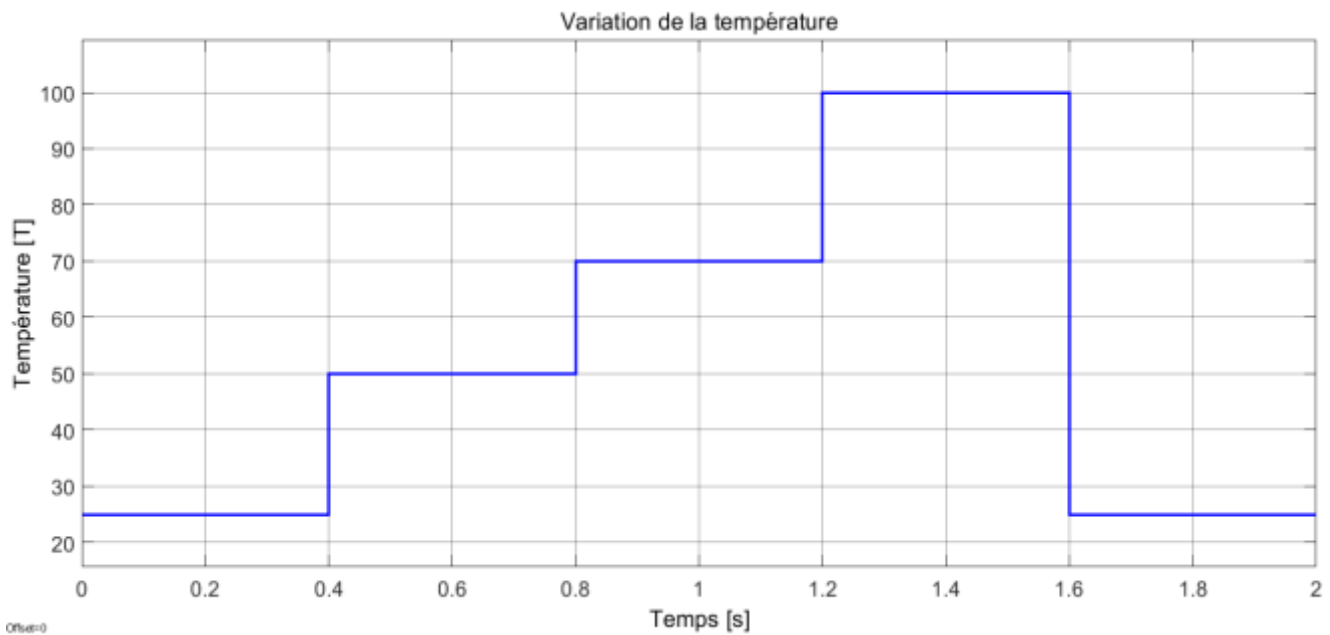


Fig.III.23. Variation de la température en fonction du temps par profil rapide

a. Résultats de la simulation à la sortie du GPV

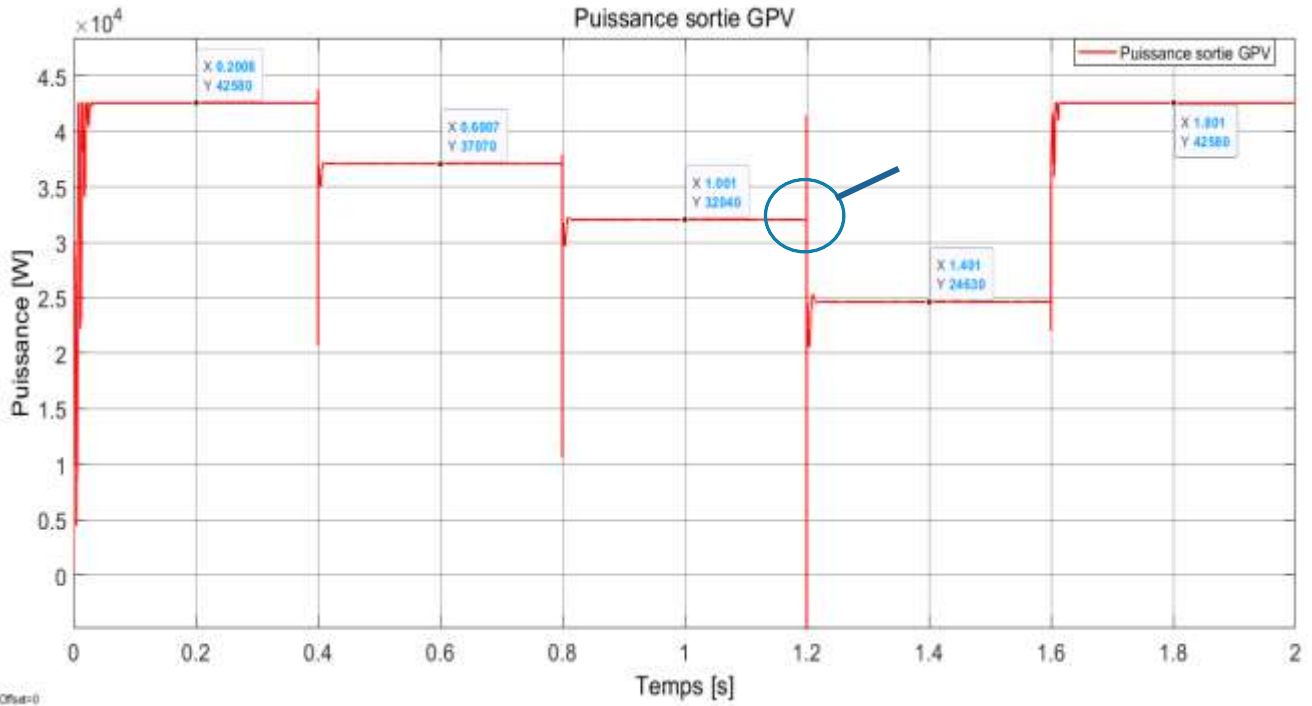


Fig.III.24. Puissance de sortie GPV pour température variable

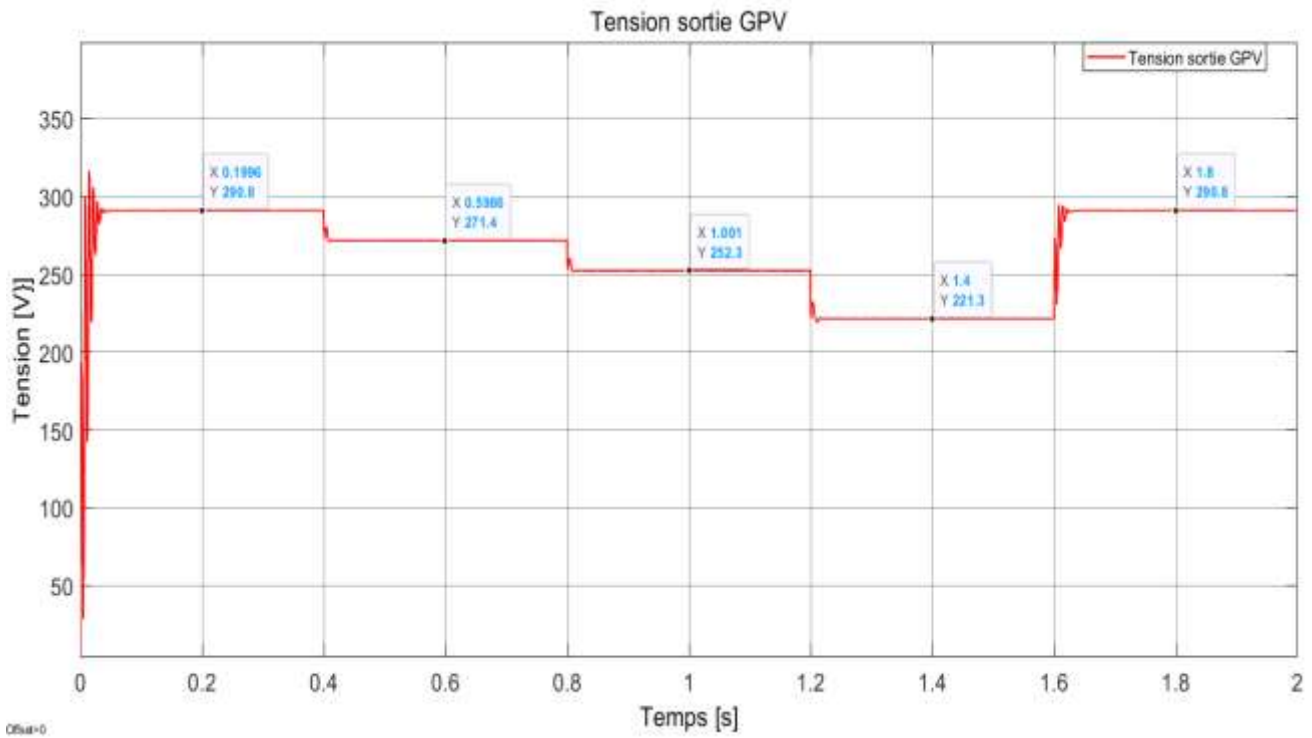


Fig.III.25. Tension de sortie GPV pour température variable

b. Résultats de la simulation à la sortie du Convertisseur

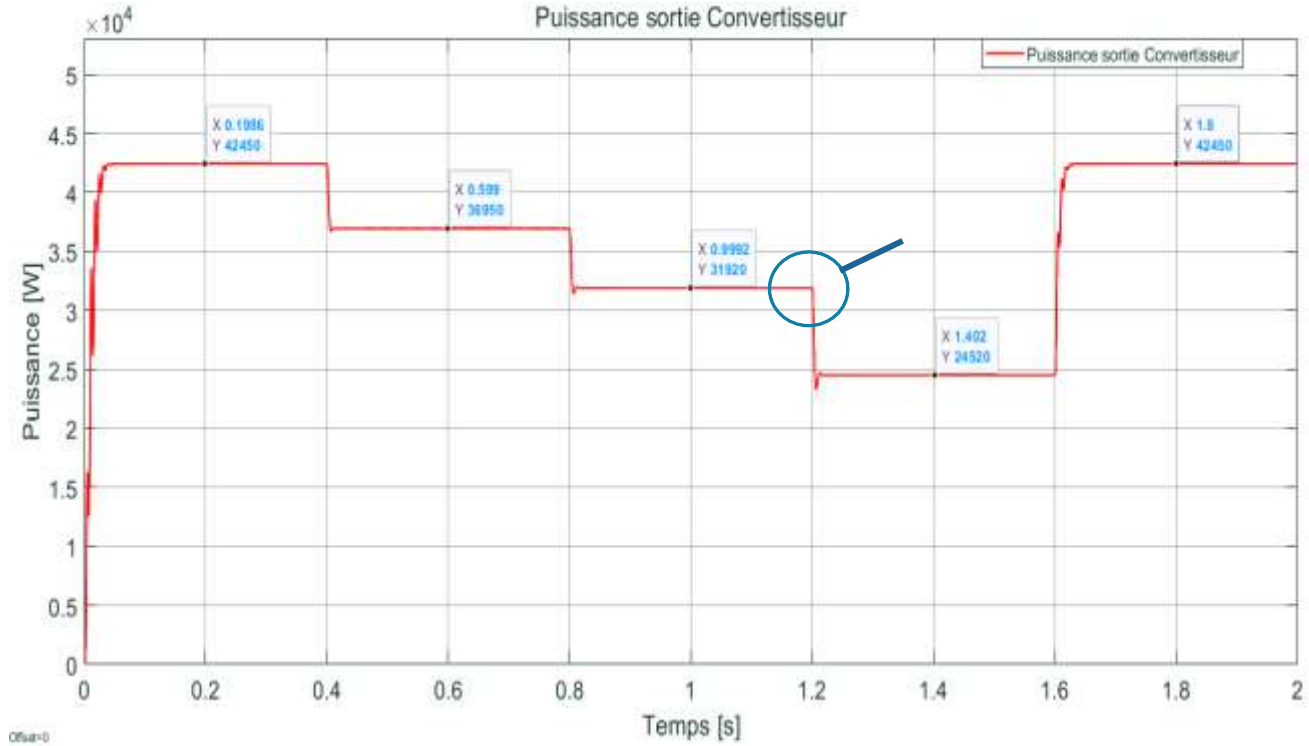


Fig.III.26. Puissance de sortie Convertisseur pour température variable

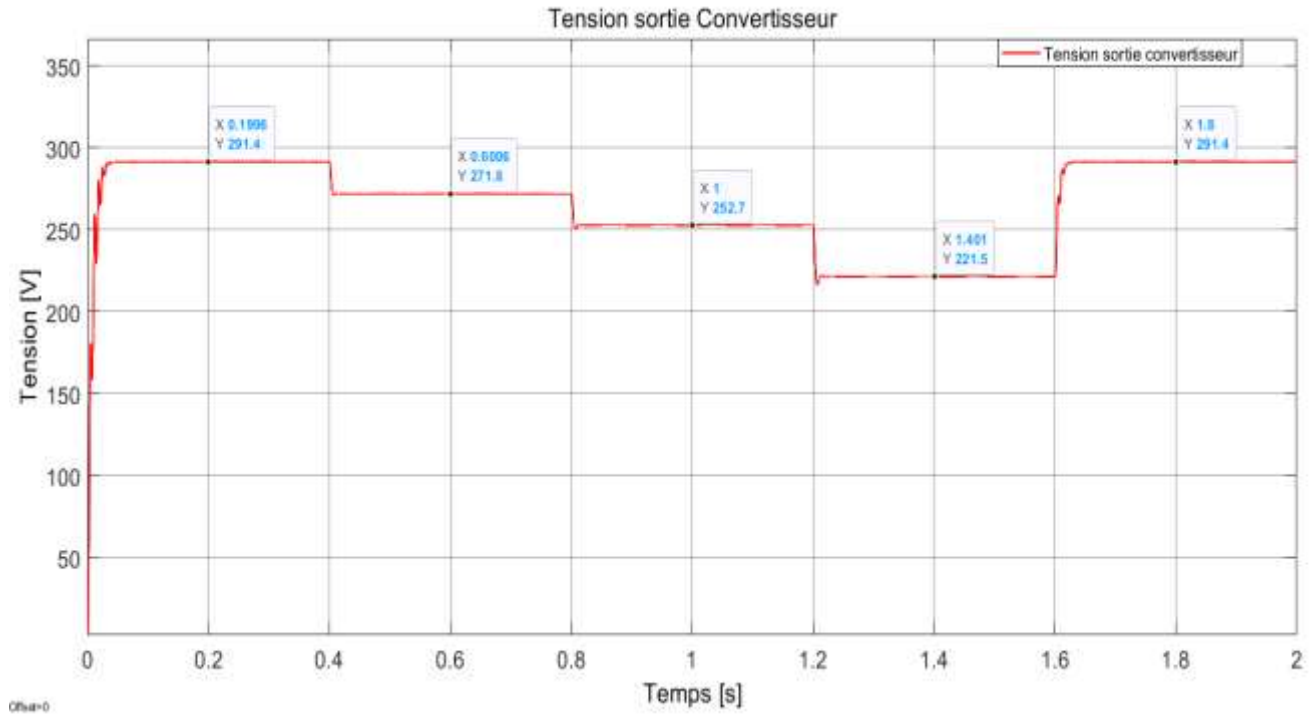


Fig.III.27. Tension de sortie Convertisseur pour température variable

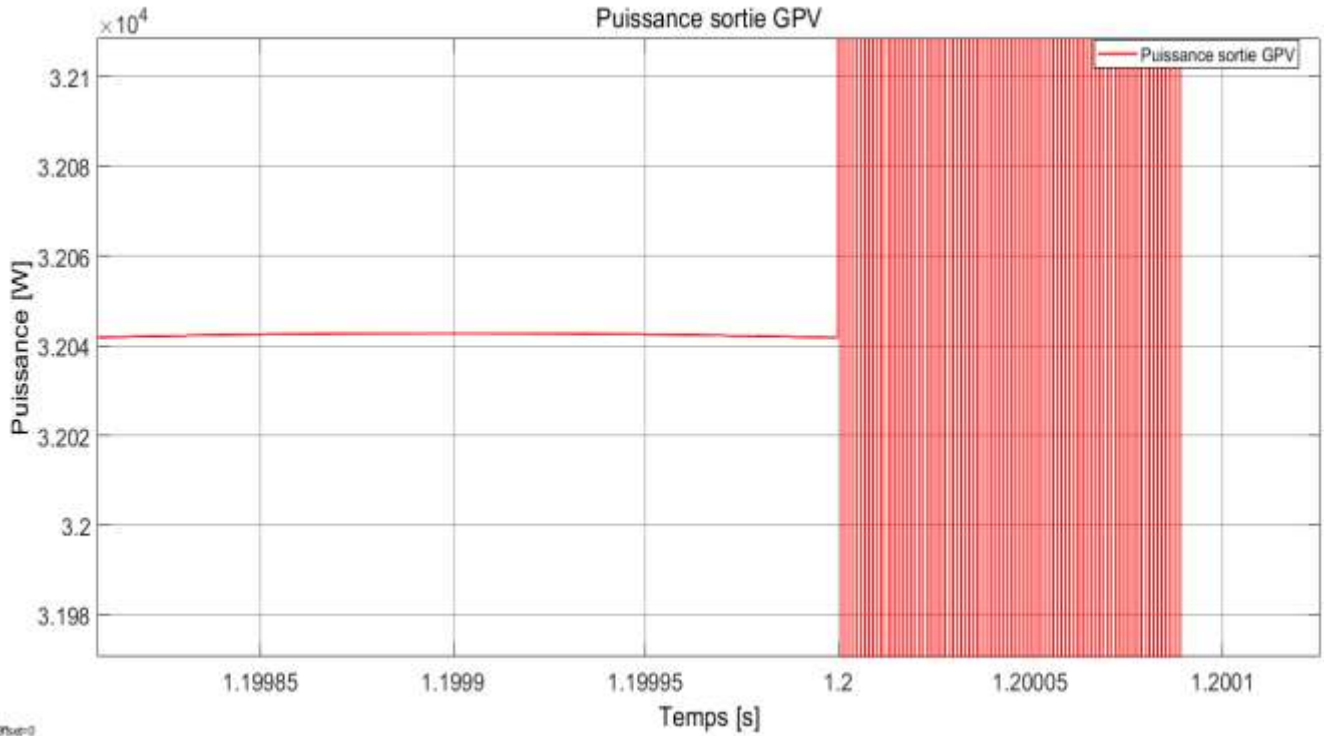


Fig.III.28. Variation de la puissance avec la variation de la température de 70C°-100C° à la sortie de GPV

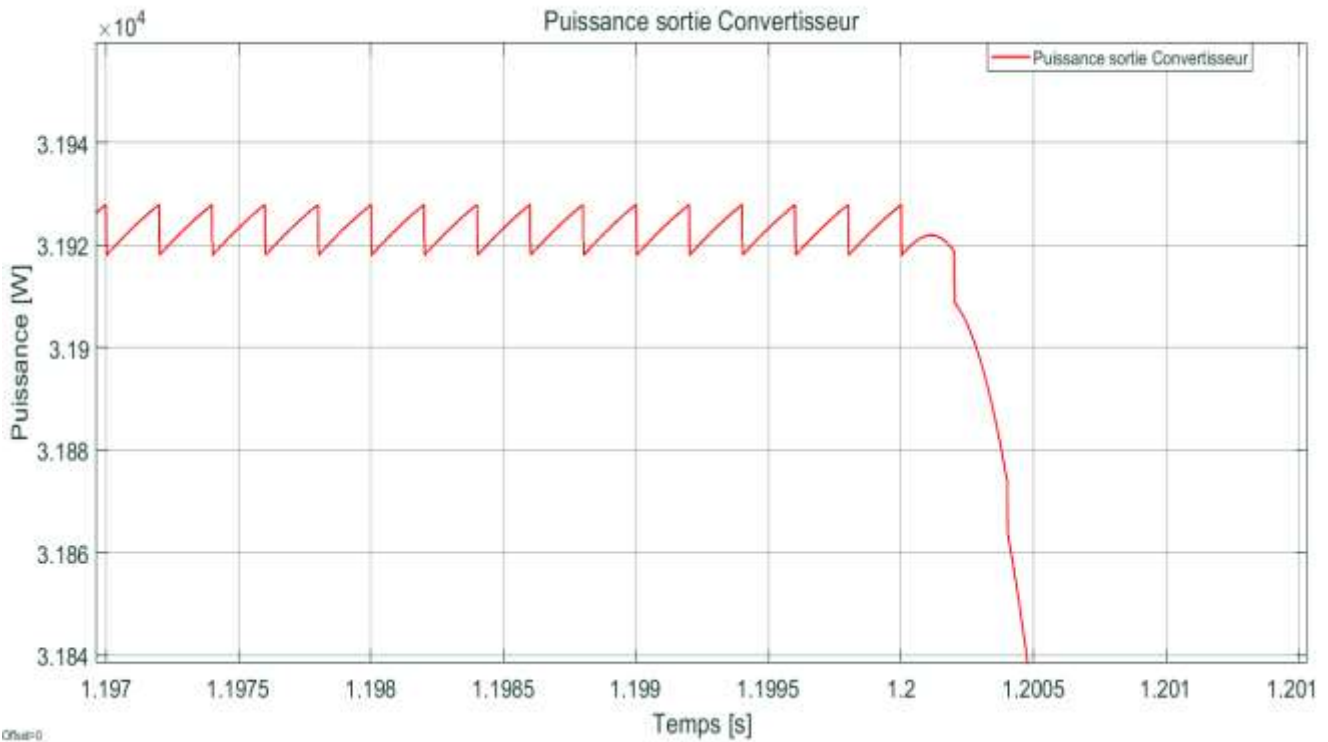


Fig.III.29. Variation de la puissance avec la variation de la température de 70C°-100C° à la sortie de Convertisseur

III.6.2.3. Interprétation des résultats

Suite à les résultats de simulation pour température variable et éclairage constant on constate qu'on a une relation proportionnelle inversée entre la température et la puissance du panneau photovoltaïque, Ceci est dû à la chute de la tension en circuit ouvert V_{co} , qu'entraîne une diminution de son efficacité électrique.

Remarquons que à température importante, la puissance produite par le module est relativement faible. Pour une température 100°C , la puissance est d'environ 24.5 KW, pour une température de 70°C , cette puissance a augmenté et a atteint la valeur de 32 KW. Et pour 50°C la puissance a augmenté et a atteint la valeur de 37 KW.

Lorsque la température a diminué 25°C , la puissance produite par le module a atteint la valeur de 42 KW dans le cas des conditions climatiques favorables.

On a remarqué que la variation cascade de température engendrer une perturbation considérable de la puissance à la sortie de générateur photovoltaïque, spécifiquement comme présenté sur les figures 27 et 28 quand la température s'augmente de 70 à 100°C , qu'indique la perte de performance du générateur à cause de la haute température par contre à l'aide de la commande MPPT la puissance à la sortie convertisseur se stabiliser rapidement, c'est que prouve que la commande MPPT se réagit parfaitement vis-à-vis de ce changement pour trouver le point de fonctionnement optimale.

III.7.CONCLUSION

Les cellules solaires génèrent plus d'électricité lorsqu'elles reçoivent plus de rayonnement solaire, mais leur efficacité diminue lorsque la température des cellules solaires augmente.

Les performances d'un générateur photovoltaïque sont fortement influencées par les conditions climatiques, particulièrement l'irradiation solaire et la température.

Autant que plus l'ensoleillement augmente plus la puissance produite est grande par contre l'augmentation de la température plus la température augmente plus les performances du module se dégradent et par conséquent la puissance produite est faible.

Afin d'améliorer l'efficacité d'un panneau PV on a proposé de le refroidir par la méthode de ruissellement d'eau sur sa face avant. En présence des sources d'eau, cette solution est la plus utilisable à cause de leur efficacité et leur influence sur la température d'équilibre et l'efficacité du panneau solaire. Ce qui constitue le paramètre important de ce procédé de refroidissement.

Conclusion

générale

CONCLUSION GENERALE

Avec la production et l'utilisation importante de l'énergie solaire photovoltaïque, le nouvel objectif de la filière de recherche solaire photovoltaïque est d'avoir le coût révolutionnaire de l'énergie solaire, le problème optimisé de la « puissance de sortie maximale » et du « coût minimal de l'énergie » crée de nouveaux défis pour la recherche sur les systèmes solaires photovoltaïques.

Nous avons présenté dans ce travail, une étude et simulation du générateur photovoltaïque pour bien comprendre son fonctionnement électrique en fonction des facteurs climatiques. La simulation du module basée sur les équations mathématiques en utilisant MATLAB / Simulink a démontré que les courbes caractéristiques Puissance, Tension en fonction du temps sont fortement influencé par l'irradiation et la température.

Le chapitre 3 utilise les niveaux d'irradiation solaire, la température du panneau solaire photovoltaïque comme signaux d'entrée, et la puissance de sortie maximale du panneau solaire photovoltaïque comme signal de sortie.

En utilisant le modèle mathématique des modules photovoltaïques, et le modèle de simulation est construit dans Matlab/Simulink. Les caractéristiques de sortie photovoltaïque sont simulées dans différentes conditions d'irradiation et de température par le modèle de simulation. Les résultats de la simulation montrent que : cet algorithme peut surmonter les oscillations de la perturbation du cycle de service basée sur un pas fixe, et il permet au système de suivre rapidement le point de puissance maximale, de réduire l'état d'équilibre du système.

Bibliographies

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Mathworks, <http://www.mathworks.com>.
- [2] Website, <http://www.researchgate.net>.
- [3] Bendjamâa Ibrahim Modélisation et commande d'un système De stockage photovoltaïque mémoire de magister ; université Abou-Bakr Belkaid –Tlemcen 2012.
- [4] Revue des Energies Renouvelables Vol. 16 N°1 (2013) 65 – 73.
- [5] Article in I-manager s Journal on Circuits and Systems · January 2017.
- [6] Hindawi International Journal of Photoenergy Volume 2018, Article ID 3286479, 13 pages.
- [7] Modeling of Photovoltaic MPPT Lead Acid Battery Charge Controller for Standalone System Applications UCSI University, Faculty of Engineering, Technology and Built Environment, 56000 Kuala Lumpur, Malaysia.
- [8] Benzahia Ayoub «Réalisation d'un prototype d'un système de poursuite solaire » mémoire Master , université de biskra , 2014.
- [9] Hafian Hicham « Etude et conception d'un émulateur d'énergie solaire piloté par dSPACE1103 » mémoire de magister, Université de Batna.2013.
- [10] Bernard FONTAINE « La production photovoltaïque d'électricité : quelles perspectives pour le Pays Provence Verte », CNRS,2009.
- [11] <http://www.bsi-economics.org/>
- [12] FAIROUZ KENDOULI," Etat de l'art et modélisation des microcentrales" ,mémoire de magister , Université Mentouri de Constantine,2007.
- [13] Kajihara, Tetsumi Harakawa « Model of Photovoltaic Cell Circuits under PartialShading». Mismatching- 21st IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1990 Atsushi 2005.
- [14] Dr. Ing. Jean-François Dupuis " Les technologies solaires de production d'électricité "Science Allemagne - Technologies solaires de production d'électricité - , pp 1-41, 10.2008.
- [15] AkassewaTchapo SINGO. Thèse Docteur de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I Titre ; «Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement Autonome» pp 12 – 15, 2010.
- [16] <http://www.notre-planete.info/actualites/4177-energie-solaireevolution>.
- [17] <http://www.edf-en.fr/>

- [18] Énergies alternatives, sous la direction de Jean Bonal et Pierre Rossetti, Omnisciences, 2007.
- [19]. N. Abouchabana, « Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT », Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2009 .
- [20] A. Oi, Design and simulation of photovoltaïque water pumping système, Thèse de Magister de l'université California, USA, Septembre 2005.
- [21] A. Rufer, P. Barrade, « Cours d'électronique de puissance Conversion DC/DC », octobre 2001, EPFL, 90 pages. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. http://leiwwww.epfl.ch/cours/cvs_dcdc.pdf
- [22] BENSACI Wafa, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT », mémoire de master, Université de Ouargla, 2012.
- [23] BOUKAROURA Abdelkader'' Modélisation et Diagnostic d'un Onduleur Triphasé Par l'Approche Bond Graph ''Mémoire de Magister UNIVERSITE FERHAT ABBAS DE SETIF 02/12/2009.
- [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] O.BENSEDDIK et F.DJALOUUD '' Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque ''Mémoire de Master Université Kasdi Merbah-Ouargla 27/06/2012.
- [26] M. Mohamed, ''Synthèse des convertisseurs statique DC/DC/AC pour les systèmes photovoltaïques : Etudes et Simulation'' Ingénieure d'état en électrotechnique, Université de science et de technologies d'Oran.
- [27] F. SLAMA, '' Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique '', Mémoire de Magister en Electrotechnique, Université Ferhat ABBAS - Sétif, 01/04/2011.
- [28] Onduleur de tension: mise en œuvre et Structures-principes-applications. Techniques d'ingénieur, Traité de génie électrique D.3176-3177.
- [29] Onduleurs et harmoniques, Cahiers techniques Merlin Gerin N°159.
- [30] T. Wildi : Electrotechnique, 3eme édition, éditions de Boeck université (1999).