MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Département du **G**énie **E**lectrique

Mémoire de fin d'études de Master en

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Réseaux électrique

Commande d'un système photovoltaïque relie au réseau électrique

Présentés par :

Ouldzmerli Adel

Hadjersi Mohamed Karim

Proposés et Dirigés par :

Ferrai Ahmed

Promotion 2022-2023

Remerciements

Avant toute chose, nous remercions **« Allah »**, qui nous aide et nous donne la volonté, le courage et la patience durant ces années d'étude.

Nous souhaitons adresser nos remerciements les plus chers aux personnes qui ont contribué à l'élaboration et l'avancement de notre projet d'étude, ainsi que l'ensemble de la famille universitaire de **Yahia Fares De Médéa** et plus précisément ceux du département Génie Électrique.

Nous remercions notre directeur de mémoire **« Mr. Ferrai Ahmed »**, qui s'est toujours montré à l'écoute et était disponible tout au long de notre travail, sans oublier ses remarques pertinentes et ses conseils durant la réalisation de ce projet.

Enfin nous tenons à exprimer toute notre gratitude à l'ensemble de nos familles et proches pour leurs soutiens tout au long de ces années.

Dédicaces Adel

En premier lieu, je voudrais tout d'abord dédier ce travail au directeur de ce mémoire, Mr. **Ferrai Ahmed**, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Je dédie ce modeste travail à ma mère et mon père symboles d'affection et d'amour, qui ont sacrifié tout leur temps pour mon bonheur et ma réussite qu'ils se trouvent ici le témoignage de ma profonde reconnaissance et ma très grande affection.

À mon frère et mes sœurs et à tous les membres de ma famille mes oncles et mes tentes mes cousins et cousines qui mon soutenues durent toute la période de mes études.

Une autre grande dédicace à **Hadjersi Mohamed Karim** pour tous ce qu'on a fait passer ensemble.

Dédicaces Mohamed

En premier lieu, je voudrais tout d'abord dédier ce travail au directeur de ce mémoire, Mr. Dr **Ferrai Ahmed**, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Je dédie ce modeste travail à ma mère et mon père symboles d'affection et d'amour, qui ont sacrifié tout leur temps pour mon bonheur et ma réussite qu'ils se trouvent ici le témoignage de ma profonde reconnaissance et ma très grande affection.

À mon frère et à tous les membres de ma famille mes oncles et mes tentes mes cousins et cousines qui mon soutenues durent toute la période de mes études.

Une autre grande dédicace à **Ouldzemirli Adel** pour tous ce qu'on a fait passer ensemble.

Table des matières

Introduction generale 1

Chapitre I *:* Généralité sur les systèmes photovoltaïques

I-1 Introduction 3
I-2 Gisement solaire 3
I-2-1 Rayonnement directe 3
I-2-2 Rayonnement diffus 3
I-2-3 Rayonnement réfléchi 3
I-2-4 Rayonnement global 4
I-3 L'ENERGIE DU SOLAIRE 4
I-3-1 Les centrales Solaire photovoltaïques : 4
I-3-2 Energie photovoltaïque (PV) : 5
I-3-3 L'ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE 5
I-4 La cellule photovoltaïque : 6
I-4-1 HISTORIQUE : 6
I-4-2 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque 7
I-4-3 Type des cellules photovoltaïques 8
a) Cellules inorganiques : 8
b) Cellules de Grätzel : 8
c) Cellules organiques : 8
d) Cellule hybride : 8
I-5 Générateur PV 9
I-5-1 Module photovoltaïque 9
I-5-2 La constitution d'un module photovoltaïque : 10
I-5-3 Mise en série : 11
I-5-4 La Mise en parallèle : 12
I-6 Différents types de système PV : 13
I-6-1 Architecture d'un système photovoltaïque connectées au réseau 14
I-7 Modélisation du générateur PV 16
I-7-1 Equations de la cellule PV 16
I-7-2 Modélisation du module photovoltaïque 18
I-8 Les caractéristiques électriques générateur PV par simulation 19

I-8-1 CARACTERISTIQUES COURANT ET TENSION : 19
I-8-2 CARACTERISTIQUES PUISSANCE / TENSION : 20
I-8-3 L'influence de l'éclairement sur la caractéristique I=f(V) et P=f(V) : 21
I-9 Conclusion : 23

Chapitre II : Modélisation et simulation de l'association système PV - hacheur

II-1 Introduction : 23
II-2 La commande Mppt : 23
II-2-1 Définition et principe de la recherche MPPT : 23
II-2-2 Classification des Commandes MPPT : 23
II-2-2-1 MPPT indirecte : 23
II-2-2-2 MPPT Directe : 24
II-3 Les algorithmes de recherche du point de puissance maximale (MPPT) 25
II-3-1 Algorithme Incrément de la conductance (INC) : 26
II-3-2 Algorithme à base de la logique floue : 27
II-3-3 Méthode basée sur les réseaux de neurones artificiels (ANN) : 29
II-3-4 Méthode de l'Algorithme P&O : 30
II-4 Le hacheur boost : 33
II-4-1 Définition : 33
II-4-2 Différents types d'hacheurs : 33
II-4-3 Convertisseur Boost : 33
II-4-4 Principe de fonctionnement : 34
II-5 Simulation du system PV avec hacheur commandé en MPPT 34
II-5-1 Résultat de Simulation 34
II-5-2 Résultat de simulation 36
II-5-2-1 Comparaison entre les entrées et les sorties du système PV : 36
II-5-2-2 Fonctionnement sous des conditions climatiques. 37
II-5-2-3 Température variable : 40
II-5-2-4 Le rapport cyclique : 43
II-5-3 Analyse des résultats de la commande IC : 44
II-6 Conclusion : 44

Chapitre III : Raccordement du système photovoltaïque Au réseau

III-1 Introduction 46
III -2 Le réseau transport THT 46
III-2-1 Modélisation du réseau électrique 46
III-2-2 Schéma de réseau de simulation : 47
III-3 Algorithme dit du référentiel au synchronisme (SRF : synchro référence frame) d-q : 48

III-4 Onduleurs PV :.....50
III-4-1 Les onduleurs (DC-AC) :.....50
III-4-2 Onduleur de tension triphasé :.....50
III-4-3 MODELE DE L'ONDULEUR A TROIS NIVEAUX.....51
III-4-4 Stratégie de commande de l'onduleur triphasé.....52
III-4-5 La stratégie de commande MLI.....53
III-4-6 Caractéristiques de la modulation.....53
III-3-7 Onduleurs centralisés (central invertir).....54
III-4-8 COMMANDE PAR MODULATION DE LARGEUR D'IMPULSION.....54
III-4-9 Modélisation de l'onduleur avec unité de contrôle de courant.....54
III-4-10 Résultat de simulation de la commande de la tension de l'onduleur :.....55
III-5 Définition d'une harmonique.....57
III-5-1 Origine des harmoniques.....57
III-5-2 Solutions aux perturbations harmoniques.....58
III-6 Les filtres :.....58
III-6-1 Les filtres R, L.....58
III-6-2 Modélisation filtre passif :.....59
III-6-3 Résultat de simulation.....60
III-7 Résultat de simulation du système PV relie au réseau :.....61
III-9 Les résultats et discussion de la simulation.....66
III-10 Conclusion.....77
Conclusion générale.....78

List des figures

Chapitre I

Figure I.1 Le rayonnement solaire 4
Figure I.02: cellule photovoltaïque (monocristalline) 5
Figure I. 03 : panneau photovoltaïque 5
Figure I. 04 :champ photovoltaïque 5
Figure I.05 : principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque 7
Figure I.06 : cellules, modules et panneau photovoltaïque 7
Figure I.07 : les cellules photovoltaïques 9
Figure I. 8 : Ruban métallique d'une cellule 10
Figure I.9 : Encapsulation des cellules. 10
Figure I.10 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de Ns cellules en série. 12
Figure I.10 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de Ns cellules en série. 13
Figure I.12 : Système PV autonome alimentant des charges DC et AC (étage 1 estDC/DC) . 13
Figure I.13 : Système PV raccordé au réseau avec stockage d'énergie 14
Figure I.14 : Système photovoltaïque raccordé au réseau 15
Figure I.15 : Model équivalent d'une cellule 16
Figure I.16 : Model générale d'un panneau photovoltaïque 18
Figure I.17 : Model générale d'un panneau photovoltaïque 19
Figure I.18 : Schéma Simulink de PV, de courant 20
Figure I.19 : Schéma Simulink de PV, de Puissance 20
Figure I.20 : Caractéristique courant –tension et puissance –tension d'un module photovoltaïque pour différent niveau d'irradiation (G= 400, 600, 800 ,1000 W/m2) et Tc=25 °C 21
Figure I.21 : Caractéristique courant –tension d'un module photovoltaïque pour une variation de température (Tc= 25, 50, 75°C) et G = 1000W/m2 22
Figure I.22 : Caractéristique puissance –tension d'un module photovoltaïque pour une variation de température (Tc= 25, 50, 75°C) et G = 1000W/m2. 23

Chapitre II

Figure II.1 : Organigramme de classification des commandes MPPT. 25
Figure II.2 : organigrammes de l'algorithme INC 27
Figure II.3: La structure de base de FLC 28
Figure II.4 : Les fonctions d'appartenance des entrées et sorties du FLC 29
Figure II.5 : Exemple d'un réseau de neurone 30
Figure II.6: Algorithme de la méthode P&O 32
Figure II.7: Le fonctionnement d'un hacheur boost 34
Figure II.8 : Formes d'ondes de la tension de sortie d'un hacheur de type BOOST 34
Figure II.9. Schéma block sous Simulink de la commande MPPT incrémental conductance . 36
Figure II.10: Courbe V(t), entrer du système (E=1000W/m² T=25°). 37

Figure II.11: Courbe V(t), sortir du système (E=1000W/m² T=25°) 37
Figure II.12: Courbe I(t), entrer du système (E=1000W/m²T=25°). 37
Figure II.13: Courbe I(t), sortir du système (E=1000W/m² T=25°). 37
Figure II.14: Courbe P(t), entrer du système (E=1000W/m²T=25°). 38
Figure II.15: Courbe P(t), sortir du système (E=1000W/m² T=25°). 38
Figure II.16: Courbe, V(t) entrer du système (E=800W/m² T=25°). 38
Figure II.17: Courbe, V(t) sortir du système (E=800W/m²T=25°) 38
Figure II.17 : Courbe, I(t) entrer du système (E=800W/m² T=25°). 39
FigureII.19 : Courbe, P(t) entrer du système (E=800W/m² T=25°). 39
Figure II.20: Courbe, P(t) sortir du système (E=800W/m²T=25°). 39
Figure II.21: Courbe V(t)) à entrer du système(E=500W/m²T=25°). 40
Figure II.22 : Courbe V(t)) à sortir du système(E=500W/m²T=25°). 40
Figure II.23: Courbe I(t)) à entrer du système(E=500W/m²T=25°). 40
Figure II.24: Courbe I(t)) à sortir du système(E=500W/m²T=25°). 40
Figure II.26: Courbe P(t)) à entrer du système(E=500W/m²T=25°). 41
Figure II.27: Courbe P(t)) à sortir du système(E=500W/m²T=25°). 41
Figure II.28: Courbe V(t) à entrer du système (E=1000W/m² T=-0°). 42
Figure II.29: Courbe V(t) à sortir du système (E=1000W/m² T=0°). 42
Figure II.30 : Courbe I(t) à entrer du système (E=1000W/m² T=-0°). 42
Figure II.31: Courbe I(t) à sortir du system (E=1000W/m² T=-0°). 42
Figure II.32: Courbe P(t) à entrer du système (E=1000W/m² T=-0°). 43
Figure II.33: Courbe P(t) à sortir du système (E=1000W/m² T=-0°). 43
Figure II.34: Courbe V(t) à entrer du système (E=1000W/m² T=-50°). 43
Figure II.35: Courbe V(t) à sortir du système (E=1000W/m² T=-50°). 43
Figure II.36: Courbe I(t) à entrer du système (E=1000W/m² T=-50°). 44
Figure II.37: Courbe i(t) à sortir du système (E=1000W/m² T=-50°). 44
Figure II.38: Courbe P(t) à entrer du système (E=1000W/m² T=-50°). 44
Figure II.39: Courbe P(t) à sortir du système (E=1000W/m² T=-50°). 44
Figure II.40 : Courbes de rapport cyclique (D) 45

Chapitre III

Figure 1:Modélisation du réseau triphasé 46
Figure:III.1 : Modèle de simulation de réseau triphasé 46
Figure III.2 : schéma de simulation 47
Figure III.13 : Commande du filtre actif pour la compensation des harmoniques de courant et l'énergie Réactive par la méthode des courants instantanés 49
Figure III.3 : Principe de base de l'onduleur 50
Figure III.4 : Montage de l'onduleur triphasé de tension en trois demi-points 51
Figure III.5 : Onduleur à trois niveaux à structure NPC 51
Figure III.6: modulation d'un signal de commande MLI 53
Figure III.7: Schéma de principe d'un VSC et de son système de contrôle 55
Figure III.8: Onduleur avec sous-système de contrôle de courant 56
Figure III.9 : L'entrer d'onduleur 57
Figure III.10 : La sortie d'onduleur 57

Figure III.11 : Système onduleur-filtres-réseau 59
Figure III.12 : La sortie d'onduleur..... 61
Figure III.13 : La tension après le filtrage..... 61
Figure III.14: Schéma globale d'un système photovoltaïque relie au réseau..... 62
Figure III.15 : la tension de convertisseur boost 63
Figure III.16 : La puissance de générateur PV 63
Figure III.17 : La tension de générateur PV 64
Figure III.18 : Le rapport cyclique 65
Figure III.19 : L'irradiation..... 66
Figure III.20 : La variation de température 66
Figure III.21 : la tension du générateur PV après zoom..... 67
Figure III 22 : la tension de sortir du convertisseur boost..... 68
Figure III.23 : Le rapport cyclique après zoom..... 69
Figure III.24 : La tension de générateur après zoom..... 69
Figure III.25 : La puissance de générateur après zoom..... 70
Figure III.26 : Le rapport cyclique après zoom..... 70
Figure III.27 : La puissance de générateur après zoom..... 71
Figure III.28 : La tension de générateur après zoom..... 71
Figure III.29 : L'irradiation après zoom..... 73
Figure III.30 : Le rapport cyclique après zoom..... 73
Figure III.31 : La tension de générateur après zoom..... 74
Figure III.32 : La puissance de générateur après zoom..... 74
Figure III.33 : L'irradiation après zoom..... 75
Figure III.34 : La variation de température après zoom..... 75
Figure III.35 : La puissance de générateur après zoom..... 76
Figure III.36 : La puissance injectée au réseau 77
Figure III.37 : La tension du réseau 77
Figure III.38 : La tension du réseau après zoom 78
Figure III.39 : Le courant injectée au réseau..... 79
Figure III.40 : Le courant injectée au réseau..... 79

List des tableaux

Chapitre II

Tableau II.1 : Table des entrées et sorties du FLC.....29

Notation

G : Éclairement [W=m2]

Icc : Courant de court-circuit [A]

Ipv : Courant de généré par le panneau

Id : Courant traversant la Diode [A]

Iph : Courant d'une cellule [A]

Isi : Courant de saturation inverse de la diode [A]

Is : Courant de saturation [A]

Ip : Courant shunt [A]

L : Inductance [H]

Ns : Nombre de cellules en série

Np : Nombre de cellules en parallèle

D : Rapport Cyclique

R : Résistance

Rp : Résistance Parallèle

Rs : Résistance Série []

T : Température absolue de la cellule [K]

Vco : Tension de circuit ouvert [V]

Vpv : Tension aux bornes de la cellule [V]

Vpm : Tension de puissance maximale [V]

Θ : Angle de transformation de Park [rad]

PV : Photovoltaïque

GPV : Générateur Photovoltaïque

MPPT : Point de fonctionnement optimale (Maximum Power Point Tracking)

DC Courant Continu

AC Courant Alternative

ملخص

تعتمد الطاقة الناتجة عن مولد كهروضوئي اعتمادًا كبيرًا على الظروف المناخية. لهذا السبب، يحتاج النظام المتصل بالشبكة إلى استجابة جيدة للاختلافات في الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة.

لهدف من هذا العمل هو عرض نمذجة ومحاكاة نظام توليد الكهروضوئية الموصولة بالشبكة تحت Matlab/Simulink

كخطوة أولى، يتم تطوير نموذج رياضي للوحدة الكهروضوئية عن طريق أخذ بيانات الأرصاد الجوية، أي الإشعاع ودرجة الحرارة، كمتغيرات مدخلات ضرورية لنمذجة هذا الجهاز. يمكن أن يكون الخرج تيارًا أو جهدًا أو طاقة. يتيح النموذج التنبؤ بسلوك وخصائص المولد الكهروضوئي على أساس الدائرة المكافئة للنموذج الرياضي تحت درجات حرارة وكثافة وهو مختلفة للإشعاع الشمسي. ثانيًا، يتم توصيل المولد تساعد DC/DC أنظمة التحكم القائمة على تتبع نقطة الطاقة القصوى، الكهروضوئي بمحول تعزيز (MPPT)مع خوارزمية (IC)المولد الكهروضوئي على توليد أقصى

قدر من الطاقة على الشبكة في حالة الاختلافات في الظروف الجوية، ثم في المرحلة الثالثة، يتم دمجها في شبكة طاقة

ACبواسطة عاكس DC/AC للتحكم في الطاقة النشطة والتفاعلية للوصول إلى عامل طاقة الوحدة الذي يتم التحقق

من صحته من خلال نتائج مرضية. في هذه الدراسة، تتم محاكاة حالات مختلفة وتحققت النتائج من صحة النماذج

الكلمات الرئيسية : مروحية معززة , توصل تدريجي، حقلPV, تحكم MPPT, MLI

Résume :

La puissance générée par un générateur photovoltaïque est fortement dépendante des conditions climatiques. Pour cette raison, un système connecté au réseau a besoin d'une bonne réponse aux variations d'irradiance solaire et de température.

L'objectif de ce travail est de présenter la modélisation et la simulation du système de génération PV connecté au réseau sous MATLAB/Simulink. Dans un premier temps, un modèle mathématique du Module Photovoltaïque est développé en prenant des données météorologiques à savoir l'irradiance et la température comme variables d'entrée nécessaires à la modélisation de ce dispositif. La sortie peut être du courant, de la tension ou de la puissance. Le modèle permet de prédire le comportement et les caractéristiques du générateur photovoltaïque sur la base du circuit équivalent du modèle mathématique sous différentes températures et intensités de rayonnement solaire. Deuxièmement, le générateur photovoltaïque est connecté au convertisseur DC-DC boost, les systèmes de contrôle basés sur le suivi du point de puissance maximale (MPPT) avec l'algorithme IC aidant le générateur photovoltaïque à générer la puissance maximale sur le réseau en cas de variations des conditions météorologiques, puis en troisième étape, il est intégré dans le réseau électrique CA par un onduleur CC/CA pour contrôler la puissance active et réactive afin d'atteindre le facteur de puissance unitaire qui est validé par des résultats satisfaisants. Dans cette étude, différents cas sont simulés et les résultats ont vérifié la validité des modèles.

Mots clés : Irradiance, hacheur boost, conductance incrémentale, champ PV, réseau, commande MPPT, MLI, commande onduleur

Abstract

The power generated by a solar photovoltaic generator is strongly dependent on climate conditions. For this reason, a grid-connected system needs a good response to variations in solar irradiance and temperature.

The objective of this work is to present the modelling and simulation of the PV generation system connected to the network under MATLAB/Simulink. Firstly, a mathematical model of the Photovoltaic Module is developed by taking meteorological data namely the irradiance and temperature as input variables needed to model this device. The output can be current, voltage or power. The model allows the prediction of the behavior and characteristics of the PV array based on the equivalent circuit of the mathematical model under different temperatures and solar radiation readings. Secondly, the PV array is connected to the boost DC-DC converter, the control systems based on Maximum Power Point Tracking (MPPT) with IC algorithm helps the PV array to generate the maximum power to the grid in case of changing weather conditions, then in the third step, it is integrated into AC power grid by DC/AC inverter to control active and reactive power to achieve unity power factor which is validated by satisfactory results. In this study, different cases are simulated and the results verified the validity of the models.

Keywords: Irradiance, boost converter, Incremental conductance, PV array, grid, MPPT control, PWM, inverter control.

Introduction generale

L'énergie est un élément déterminant pour le développement économique. Elle contribue non seulement à l'amélioration de l'éducation, de la santé, et des conditions de vie mais aussi au développement d'activités économiques et à la création de valeur.

La pollution de l'air, les changements climatiques, les risques du nucléaire, les limites des réserves des énergies traditionnelles (uranium, pétrole, charbon et gaz naturel) qui sont épuisables et leurs répartitions non équitables sur le globe terrestre, l'augmentation des peuples du monde et l'accroissance des besoins énergétiques ont fait prendre conscience qu'un recours à d'autres moyens de production d'énergies respectueuses de la planète où nous vivons, s'impose.

La solution est de recourir aux énergies renouvelables qui offrent la possibilité de produire de l'électricité satisfaisante aux exigences écologiques. Malheureusement, cette issue rencontre des contraintes économiques ; coût élevé et rendement bas. Le photovoltaïque (PV) fait partie de ces énergies.

Le développement des énergies renouvelables notamment le solaire photovoltaïque va de pair avec une multiplication des sources de production d'électricité. Avec le solaire photovoltaïque les particuliers auparavant simples consommateurs peuvent désormais devenir producteurs d'électricité. La politique actuelle n'étant pas d'autoconsommer cette électricité mais de l'insérer sur le réseau, chaque installation doit s'y connecter. Et aujourd'hui, les systèmes photovoltaïques sont de plus en plus souvent raccordés au réseau électrique. Ils permettent à un ménage de produire une partie de son électricité de manière propre et d'injecter la production d'électricité excédentaire sur le réseau.

Au cours des dernières années, le nombre de foyers alimentés à l'énergie solaire connectés au réseau électrique local a augmenté de façon spectaculaire. Ces systèmes photovoltaïques connectés au réseau ont des panneaux solaires qui fournissent une partie ou même la plupart de leurs besoins en énergie pendant la journée, tout en restant connectés au réseau électrique local pendant la nuit.

Les systèmes photovoltaïques connectés au réseau sont toujours raccordés au réseau électrique public via un onduleur approprié. Le courant introduit doit avoir une forme d'onde sinusoïdale et synchronisée avec la fréquence de réseau et, dans le cas où le réseau venait à être coupé, même pendant de brèves périodes de temps, l'onduleur doit être capable de se déconnecter rapidement. Par ailleurs, une caractéristique fondamentale pour un onduleur est d'optimiser la production effective d'énergie de l'installation par rapport au rayonnement solaire incident, au moyen du réglage du point de puissance maximum (MPP).

Dans les systèmes photovoltaïques connectés au réseau, l'un des objectifs que doit réaliser l'onduleur connecté au réseau, est le contrôle du courant issu du champ de modules photovoltaïques et de la puissance injectée au réseau suivant les normes en vigueur. Finalement, l'onduleur à trois niveaux est utilisé pour réguler la tension de sortie de convertisseur DC/DC et connecte le générateur photovoltaïque au réseau.

Le premier chapitre sera consacré aux généralités sur le système photovoltaïque ; notamment le principe de fonctionnement, étude de l'influence des phénomènes externes ; la température et l'éclairement.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation et simulation du système photovoltaïque et celle du convertisseur DC-DC ; la modélisation se fera à partir des équations de la cellule et le convertisseur étudié et les techniques de poursuite du point de puissance maximum (MPPT) dont la commande par l'algorithme de la conductance incrémentale.

Le troisième et dernier chapitre sera dédié au raccordement du système photovoltaïque au réseau électrique. Avec notamment la présentation de l'onduleur triphasé de tension.

Enfin, nous terminons notre projet par une conclusion générale relative aux résultats de simulations.

Chapitre I :

Généralité sur les systèmes photovoltaïques :

I-1 Introduction

L'épuisement des ressources fossiles, à plus ou moins long terme, et la flambée discours du brut, la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre rendent urgentes la maîtrise des consommations et la diversification des sources d'énergie : l'utilisation et le développement des énergies renouvelables. [1]

Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre. Une partie de ce rayonnement peut être exploitée pour produire directement de la chaleur (solaire thermique) ou de l'électricité. [1]

La technologie photovoltaïque permet de transformer cette énergie en électricité. Cette transformation s'effectue sans bruit, sans émission de gaz : elle est donc par nature totalement propre. Par ailleurs, l'absence de mise en mouvement de pièces mécaniques lui confère un niveau de fiabilité inégalable (durée de vie moyenne d'un module estimée à plus de 30 ans.) L'effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique. Le terme photovoltaïque vient du grec « phos, photos » qui désigne la lumière et de « voltaïque » mot dérivé du physicien italien Alessandro Volta, connu pour ses travaux sur l'électricité. [2]

I-2 Gisement solaire

Sur Terre le rayonnement solaire est reçu de façon intermittente. Les rayons du soleil sont confrontés à beaucoup de contrainte avant d'arriver sur terre. Cela est due à la résistance des déférente couche de l'atmosphère et les nuages. En été, le mouvement de la terre sur elle-même combinais à sa géométrie sphérique est à l'origine des déférences d'ensoleillement selon la localisation. Il existe trois types de rayonnement sur terre :

I-2-1 Rayonnement directe

C'est les rayonnements reçus directement par la terre du soleil. Ils sont parallèles entre eux et ne sont pas dises par l'atmosphère.

I-2-2 Rayonnement diffus

C'est le rayonnement dévié par l'atmosphère avant d'attendre la surface terrestre.

I-2-3 Rayonnement réfléchi

Certains rayonnements solaires sont réfléchie dans l'univers par l'atmosphère pour protéger le monde vivant sur terre.

I-2-4 Rayonnement global

Le rayonnement global à la surface terrestre constitue le résultat la super position des trois compositions direct, diffus et réfléchi.

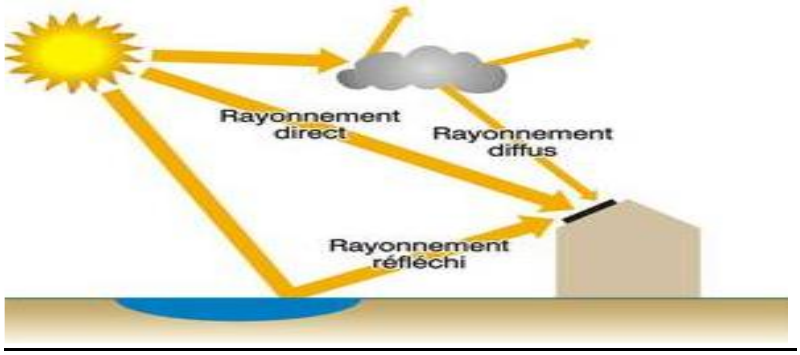


Figure I.1 _ Le rayonnement solaire

I-3 L'ENERGIE DU SOLAIRE

Le soleil est une étoile jeune du système solaire qui a mis 100 Millions d'année à se former. A l'intérieur du soleil se forme de l'hélium (He) à partir d'une réaction de fusion nucléaire massive d'hydrogène. Cette réaction dégage de l'énergie sous deux (2) formes ; le rayonnement et la chaleur (ou thermique).

L'énergie solaire est transformée à d'autres formes d'énergie comme : énergie chimique, énergie cinétique, énergie thermique, énergie de biomasse et énergie électrique. Cette dernière est obtenu par la conversion du rayonnement solaire en électricité. Ce processus est la capacité d'un matériau à délivrer une quantité d'électricité quand il est exposé au soleil. C'est l'effet photoélectrique. Il a été découvert en 1839 par un physicien Français du nom d'Antoine Becquerel.

I-3-1 Les centrales Solaire photovoltaïques :

Cet autre moyen de fabriquer de l'électricité avec l'énergie solaire utilise les rayonnements lumineux du soleil, qui sont directement transformés en un courant électrique par des cellules à base de silicium ou autre matériau ayant des propriétés de conversion lumière/électricité. Chaque cellule délivrant une faible tension, les cellules sont assemblées en panneaux

I-3-2 Energie photovoltaïque (PV) :

Technologie utilisant l'énergie du soleil pour fournir l'électricité alimentant appareils électriques et éclairage. Un système photovoltaïque produit de l'électricité grâce à la lumière du jour et non pas uniquement grâce à la lumière du soleil. [2]

I-3-3 L'ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

Désigne l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque. Plusieurs cellules sont reliées entre elles et forment un panneau solaire (ou module) photovoltaïque. Plusieurs modules qui sont regroupés dans une centrale solaire photovoltaïque sont appelés champ photovoltaïque. Le terme photovoltaïque peut désigner soit le phénomène physique – l'effet photovoltaïque - ou la technologie associée. [3]



Figure I.02: cellule photovoltaïque (monocristalline)



Figure I. 03 : panneau photovoltaïque



Figure I. 04 :champ photovoltaïque

I-4 La cellule photovoltaïque :

Les éléments les plus importants d'un système photovoltaïque sont les cellules, éléments de base de l'unité qui collectent la lumière du soleil ; les modules, qui rassemblent un grand nombre de cellules au sein d'une unité ; et, dans certains cas, les onduleurs, qui transforment l'électricité générée en électricité utilisable au quotidien. [1]

Les cellules photovoltaïques sont généralement réalisées à base de silicium cristallin, soit tranchées à partir de lingots, soit sous forme de rubans de silicium, soit en couches minces

déposées sur un support à bas-côté. La performance d'une cellule solaire se mesure en termes de rendement de transformation de la lumière du soleil en électricité. Les cellules solaires les plus répandues dans le commerce ont un rendement de 15% - ce qui signifie qu'environ un sixième de la lumière du soleil frappant une cellule produit de l'électricité. Améliorer le rendement des cellules tout en poursuivant la réduction des coûts de production est un objectif important pour l'industrie photovoltaïque. [4]

I-4-1 HISTORIQUE :

Les systèmes photovoltaïques sont utilisés depuis 40 ans. Les applications ont commencé avec le programme spatial pour la transmission radio des satellites. Elles se sont poursuivies avec les balises en mer et l'équipement de sites isolés dans tous les pays du monde, en utilisant les batteries pour stocker l'énergie électrique pendant les heures sans soleil.

***1839** : Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.

***1875** : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi- conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire. ***1954** : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites. ***1958 :** Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace. ***1973 :** La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université de Delaware. ***1983 :** La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie. [3]

I-4-2 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un dispositif semi-conducteur généralement a base silicium. Elle est réalisée à partir de deux couches, une dopée P et l'autre dopée N créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. Le terme photovoltaïque

vient du grec " phos, photos " qui désigne la lumière et de " voltaïque ", mot dérivé du physicien italien Alessandro Volta, connu pour ses travaux sur l'électricité. [4]

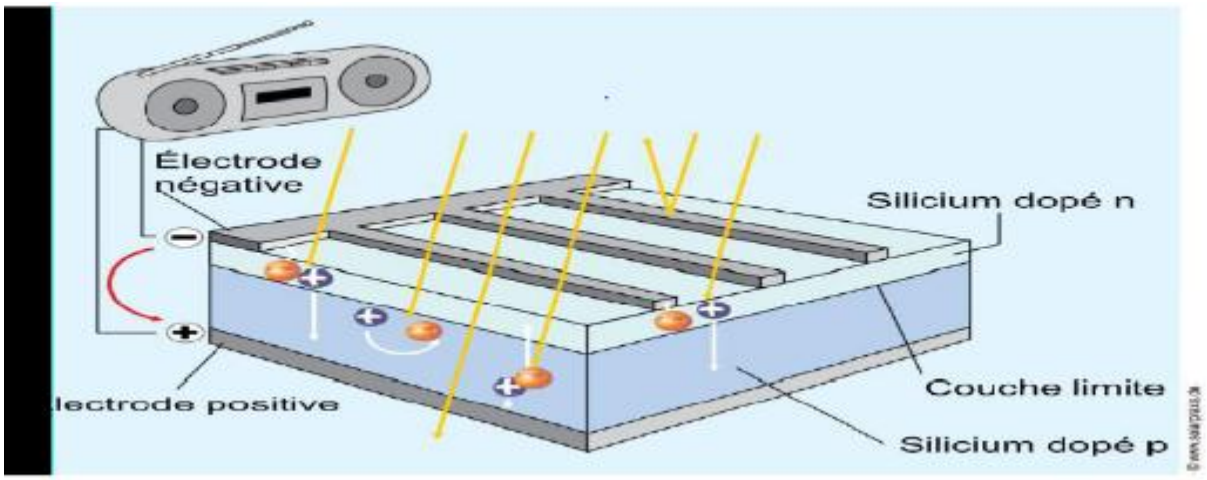


Figure I.05 : principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Typiquement une cellule photovoltaïque produit moins de 2watt sous approximativement 0,5(v). Une association série de plusieurs cellules donne un module et une association série et/ou parallèle de plusieurs modules permet de réaliser un panneau photovoltaïque. Le passage d'un module à un panneau se fait par l'ajout de diodes de protection, une en série pour éviter les courants inverses et une en parallèle, dite diode bypass, qui n'intervient qu'en cas de déséquilibre d'un ensemble de cellules pour limiter la tension inverse aux bornes de cet ensemble et minimiser la perte de production associée. [4]

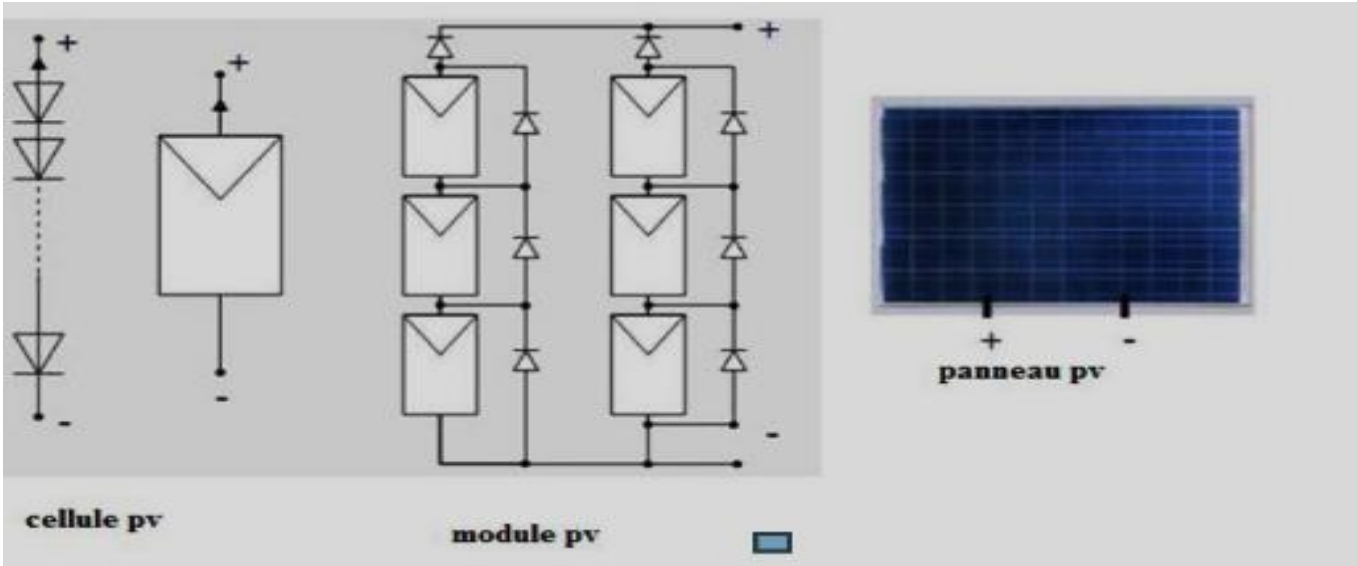


Figure I.06 : cellules, modules et panneau photovoltaïque

I-4-3 Type des cellules photovoltaïques

a) Cellules inorganiques :

Il y a deux types :

1- Cellule silicium

2- Cellules en couches minces

b) Cellules de Grätzel :

La couche active de ces cellules est composée d'une matrice poreuse de nanocristallines d'oxyde métallique semi-conducteur (TiO2, Zno, SnO2, Nb2O5) recouverte d'une monocouche de colorant (complexe de ruthénium ou de dite trabuty l'ammonium).

c) Cellules organiques :

Les cellules connaissent un développement rapide et leur rendement de conversion ont franchi récemment la barre des 8%. [5]

d) Cellule hybride :

Les cellules hybrides sont composées d'un semi-conducteur organique et d'un semi-conducteur inorganique ; Le principal avantage de ces cellules par rapport aux cellules
Organiques est l'absence de 6,6-phényle-C61-butyric acide méthyle



Figure I.07 : les cellules photovoltaïques

I-5 Générateur PV

Un générateur photovoltaïque produit de l'électricité à partir des rayons du soleil. Son fonctionnement est simple : le panneau photovoltaïque est formé de nombreuses cellules photovoltaïques qui créent du courant continu. Ensuite, à l'aide d'un onduleur, le courant est transformé en courant alternatif.

I-5-1 Module photovoltaïque

Le « Module » photovoltaïques (Module PV) est par définition un ensemble de cellules PV associé en série pour générer une tension électrique exploitable lors de son exposition à la lumière.

I-5-2 La constitution d'un module photovoltaïque :

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

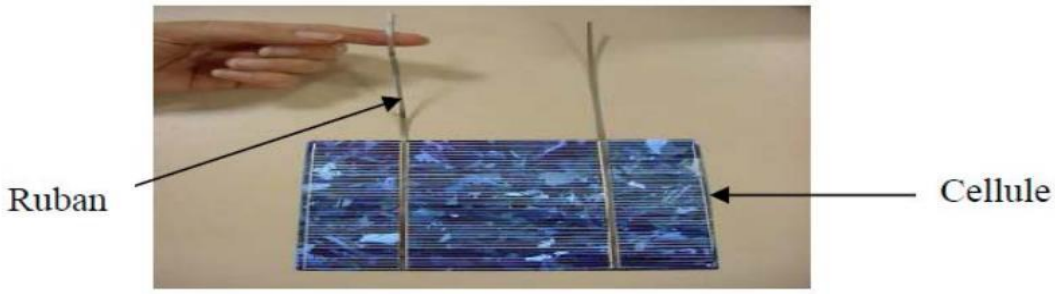


Figure I. 8 : Ruban métallique d'une cellule

• Les cellules sont encapsulées sous vide entre 2 films thermoplastiques transparents (EVA : Ethylène Acétate de Vinyle)

• Le plus souvent présence d'un cadre en aluminium avec joint périphérique pour permettre la Dilatation

• un verre trempé en face avant protège les cellules sur le plan mécanique tout en laissant Passer la lumière.

• la face arrière est constituée d'un verre ou d'une feuille TEDLAR.

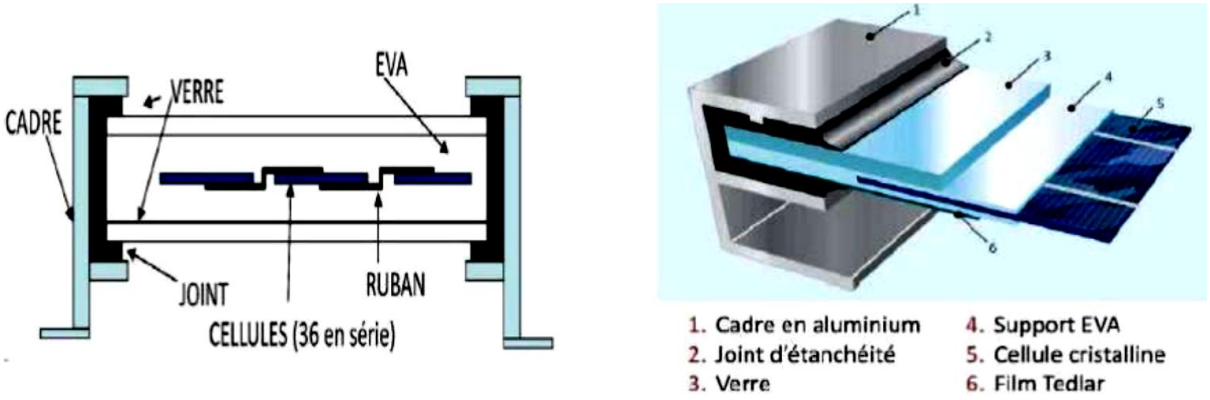


Figure I.9 : Encapsulation des cellules.

• Connexion ; la boite de connexion étanche regroupe les bornes de raccordement, les diodes by-pass

• Les 2 câbles unipolaires sont raccordés

En associant les cellules PV en série (somme des tensions de chaque cellule) ou en parallèle (somme des intensités de chaque cellule), on peut constituer un générateur PV selon les besoins des applications visées. Les deux types de regroupement sont en effet possibles et souvent utilisés afin d'obtenir en sortie des valeurs de tension et intensité souhaités. Ainsi, pour *Ns* cellules en série, constituant des branches elles-mêmes *Np* en parallèle, la puissance disponible en sortie du générateur PV est donné par :

$$P_{pv} = N_s . V_{pv} N_p . I_{pv} \qquad (I.1)$$

Avec :

P_{pv} : la puissance disponible en sortie du GPV

V_{pv}: la tension à la sortie du GPV

I_{pv} : le courant de sortie du GPV

I-5-3 Mise en série :

Une association de *Ns* cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, figure (I.10) L'équation (I.2) résume les caractéristiques électriques d'une association série de ns cellules.

$$V_{CO}=N_s.V_{CO} \qquad \text{(I.2)}$$

Avec :

V_{CO} : la tension du circuit ouvert

Ce système d'association est généralement le plus communément utilisé pour les modules photovoltaïques du commerce. Comme la surface des cellules devient de plus en plus importante, le courant produit par une seule cellule augmente régulièrement au fur et à mesure de l'évolution technologique alors que sa tension reste toujours très faible.

L'association série permet ainsi d'augmenter la tension de l'ensemble et donc d'accroître la puissance de l'ensemble. Les panneaux commerciaux constitués de cellules de première génération sont habituellement réalisés en associant 36 cellules en série (V_{cons}=0.6V*36=21.6V) afin d'obtenir une tension optimale du panneau *Vop* proche de celle d'une tension de batterie de 12V. **[11]**

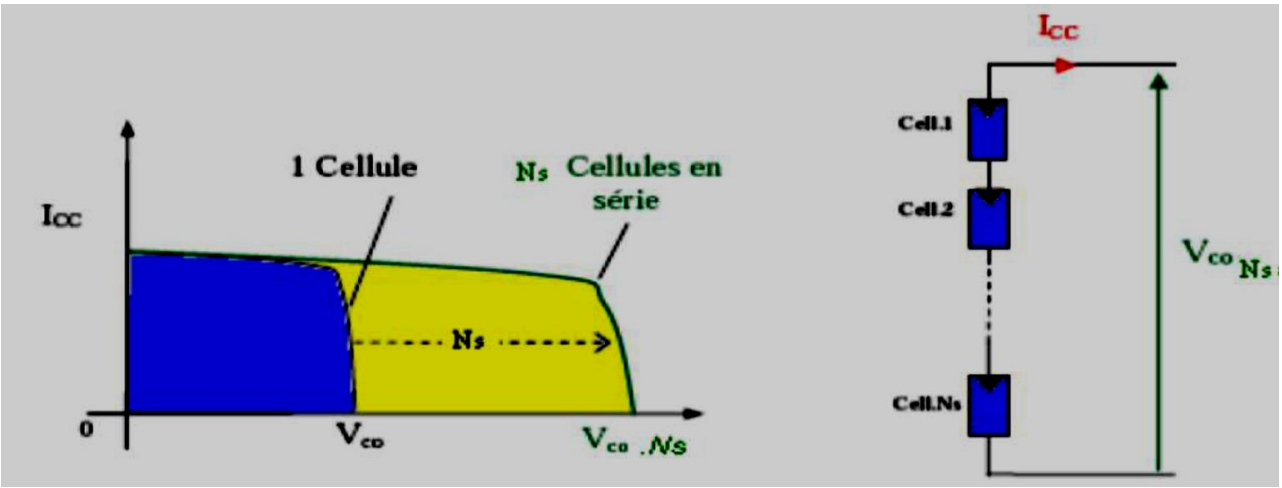


Figure I.10 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de Ns cellules en série.

I-5-4 La Mise en parallèle :

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par l'addition des courants à une tension donnée. La caractéristique résultante d'une mise en parallèle de (N_p)cellule PV identiques en série est présentée sur la Figure I.11

En résumé, pour tracer la caractéristique équivalente d'un groupement de cellules PV :

- En parallèle, il faut se placer à une tension donnée et sommer les courants de chaque cellule. Il faut renouveler cette opération pour toutes les tensions entre 0 V et V_{CO}

- En série, il faut cette fois-ci se placer à un courant donné et sommer les tensions des différentes cellules à ce courant.

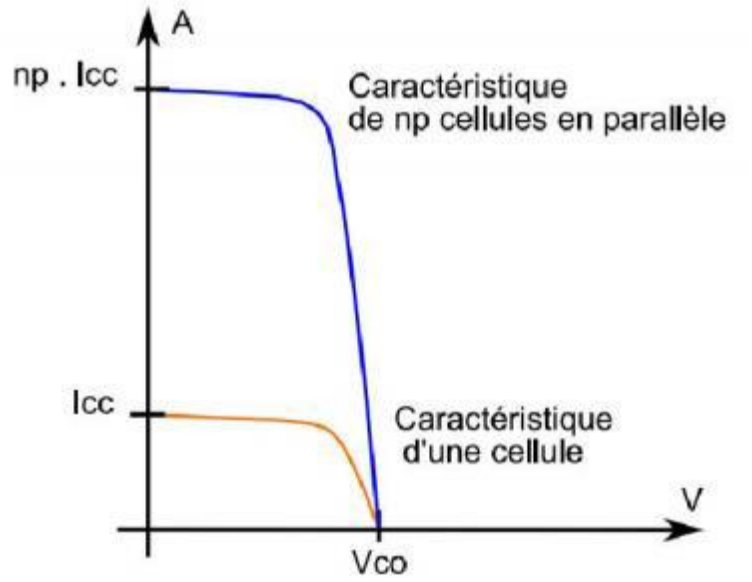


Figure I.11 : Caractéristique résultant d'un groupement de cellules identiques

I-6 Différents types de système PV :

L'énergie électrique produit par un GVP peut être utilisé de deux manière qui s'adapte à une consommation spécifique : autonome ou connecte au réseau électrique.

Un système photovoltaïque autonome est un système non connecte au réseau électrique. Il est souvent utilisé dans les sites isolés où l'accès au réseau est difficile ou impossible. Ce type d'installation photovoltaïque nécessite l'utilisation d'une batterie de stockage pour assurer la fourniture d'électricité pendant la nuit ou bien lors d'un faible éclairement [12].

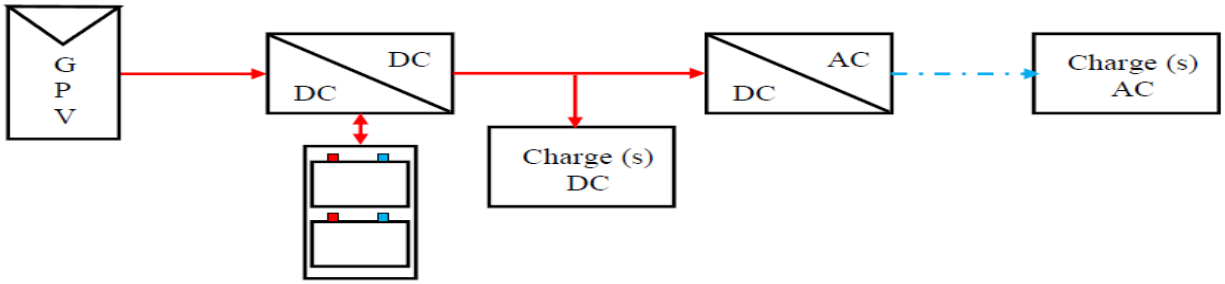


Figure I.12 : Système PV autonome alimentant des charges DC et AC (étage 1 est DC/DC)

Un système photovoltaïque raccordé au réseau est qui constitue l'objet de notre étude. Aujourd'hui, les réseaux électriques sont de plus en plus décentralisé avec l'avènement de nouveaux moyens de production d'énergie comme le photovoltaïque. Ces genres de systèmes sont branchés en parallèle au réseau et dont l'énergie produite par les modules photovoltaïques est injectée au réseau électrique

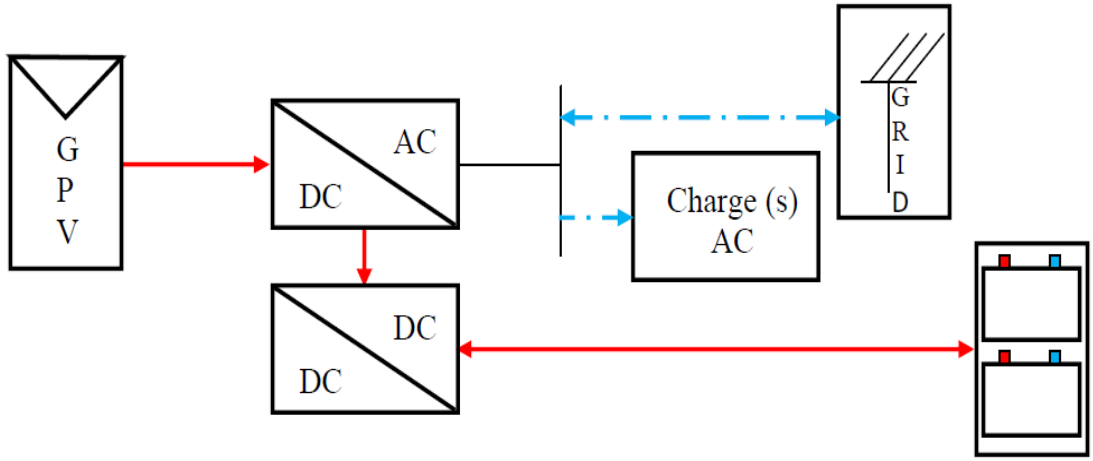


Figure I.13 : Système PV raccordé au réseau avec stockage d'énergie [

I-6-1 Architecture d'un système photovoltaïque connectées au réseau

Le raccordement d'un système photovoltaïque à un réseau se fait à travers un étage d'adaptation comme le montre la figure I.14. Cet étage peut être composé par un ou plusieurs convertisseurs de puissance à base d'électronique de puissance. Comme la tension du réseau est alternative, il est indispensable d'utiliser un onduleur pour la conversion de l'énergie délivrée par le champ photovoltaïque.

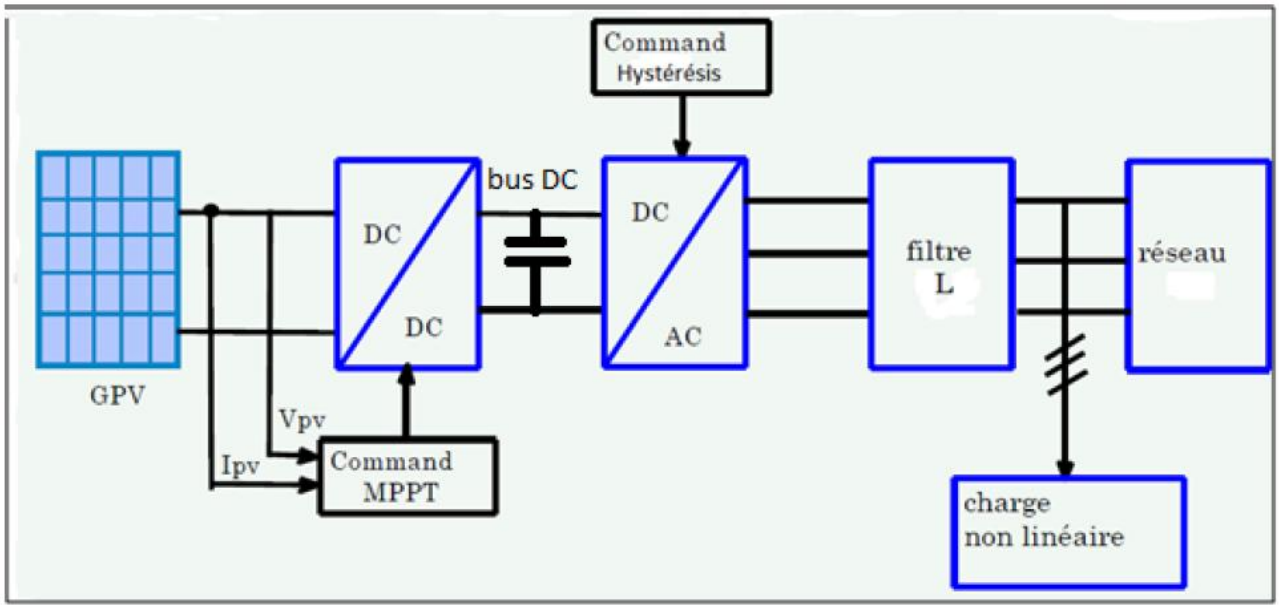


Figure I.14 : Système photovoltaïque raccordé au réseau

Au niveau mondial, le marché des systèmes photovoltaïques connaît, depuis maintenant plus de 10 ans, un taux de croissance très élevé, de l'ordre de 30 à 40% par an. Cette croissance exceptionnelle, due principalement aux systèmes photovoltaïques raccordés au réseau de distribution d'électricité. Ceci se traduit bien évidemment par des innovations technologiques et une baisse de coûts des modules photovoltaïques mais aussi à des efforts importants de recherche et développement dans le domaine de l'électronique de puissance. En effet, les performances techniques et la fiabilité des onduleurs utilisés pour le raccordement des modules photovoltaïques au réseau de distribution d'électricité, sont des paramètres qui peuvent très fortement faire varier la production d'énergie électrique annuelle. Donc grâce au développement et à la recherche dans le domaine de l'électronique de puissance, l'intégration de l'énergie solaire photovoltaïque au réseau électrique avec un rendement considérable est rendue possible. Cependant, selon l'étage d'adaptation utilisé, on peut envisager deux types de structure de systèmes photovoltaïques raccordés au réseau de distribution [13]

Les systèmes directement connectés au réseau électrique à travers un onduleur dont les différentes configurations sont étalées dans la littérature.

Les systèmes à bus continu intermédiaire où le générateur photovoltaïque est connecté à l'onduleur par l'intermédiaire d'un convertisseur continu-continu. Dans ce cas, l'onduleur délivre une tension modulée à sa sortie et qui peut être facilement injectée dans le réseau [4].

Cette structure est la structure adoptée dans ce présent travail et fait l'objet de notre étude dans la suite de ce mémoire.

I-7 Modélisation du générateur PV

Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque PV :

Un module PV se compose d'un certain nombre de cellules solaires connectées en série et en parallèle pour obtenir les niveaux de tension et de courant désirés. Une cellule de panneau solaire est essentiellement une jonction de semi-conducteur p-n. Lorsqu'il est exposé à la lumière, un courant continu est généré. Pour simplifier, le modèle à une seule diode de la figure I.15 est utilisé dans ce document. Ce modèle offre un bon compromis entre simplicité et précision avec la structure de base. Le circuit équivalent du modèle général se compose d'un photo-courantI_{PH}), d'une diode, d'une résistance parallèle (Rp) exprimant un courant de fuite et d'une résistance série (Rs) due aux contacts entre les semi-conducteurs et les parties métalliques Figure I.15 [6].

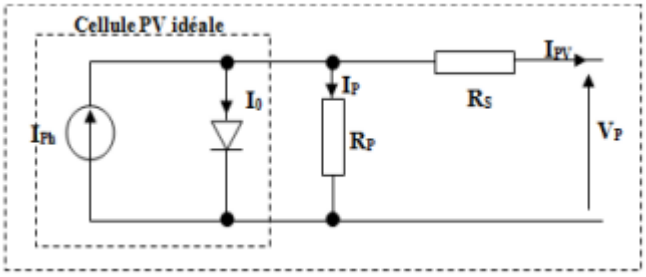


Figure I.15 : Model équivalent d'une cellule

I-7-1 Equations de la cellule PV

Après la loi de Kirchhoff en a

$$I_{PH} = I_{PH} - I_0 - I_P \qquad (I.3)$$

Avec :

I_{PH}: est un courant généré par la lumière ou la photo courant.

I_P: courant qui circule dans la résistance parallèle, est donnée par l'équation suivante

$$Ip = \frac{V + Rs * Ipv}{Rp} \qquad (I.4)$$

I_0: le courant de la diode qui est proportionnel au courant de saturation, il est donné par l'équation suivante

$$I0 = Is * e^{q * \frac{v + Rs * Ipv}{k * Tca}} - 1 \qquad (I.5)$$

I_S : est le courant de saturation inverse en ampère (A)

- q : charge d'électrons (1,6 × 10-19 C)
- k: constante de Boltzmann (1,38 × 10-23 J / K)

- Tc: est une température de cellule en Kelvin (K)
- A: est un facteur idéal
- Rs: est une résistance série (Ω)

Nous remplaçons dans l'équation (1), l'équation caractéristique tension-courant d'une cellule solaire est donnée comme suit

$$Ipv = Iph - Is * (e^{q*\frac{v+Rs*Ipv}{k*Tca}} - 1) - \frac{V+Rs*Ipv}{Rp} \qquad (I.6)$$

La photo courant dépend principalement de l'ensoleillement et de la température de fonctionnement de la cellule, qui est décrite par l'équation suivante : *

$$Iph = [Isc + Ki * (Tc - Tref) * \frac{G}{Gref} \qquad (I.7)$$

Isc: est le courant de court-circuit de la cellule à 25 ° C et 1000W / m2

- Ki: le coefficient de température du courant de court-circuit de la cellule
- Tref: est la température de référence de la cellule, en Kelvin (K) (= 25C ° + 273)
- G : est l'ensoleillement en watt /mètre carré (W / m2)
- Gref : est l'insolation de référence de la cellule (= 1000W / m2)

D'autre part, le courant de saturation de la cellule varie avec la température de la cellule, qui est décrite comme suit :

$$Is = Irs * (\frac{Tc}{Tref})^3 * e^{\left[\frac{q*Eg*(\frac{1}{Tref}-\frac{1}{Tc})}{K*A}\right)} \qquad (I.8)$$

Où

- I_{RS}: le courant de saturation inverse de la cellule à une température de référence et un rayonnement solaire
- E_G: est l'énergie de gap du semi-conducteur utilisé dans la cellule en électronvolt (eV)
- A: est le facteur idéal qui dépend de la technologie PV et est répertorié dans le tableau

Table I Factor *A* dependence on PV technology

Technology	*A*
Si-mono	1.2
Si-poly	1.3
a-Si:H	1.8
a-Si:H tandem	3.3
a-Si:H triple	5
CdTe	1.5
CIS	1.5
AsGa	1.3

Le courant de saturation inverse est donné par l'équation suivante

$$Irs = \frac{Isc}{e^{\frac{Q*voc}{Ns*A*k*Tc}-1}} \qquad (I.9)$$

Ns: nombre des cellules en série d'un module PV

- I_{sc}: est le courant de court-circuit
- V_{oc}: est la tension en circuit ouvert

I-7-2 Modélisation du module photovoltaïque

Une cellule PV typique produit moins de 2W à 0,5V environ ; les cellules doivent être connectées en série-parallèle sur un module pour produire suffisamment de puissance. Une matrice PV est un groupe de plusieurs modules PV qui sont connectés électriquement en série et en parallèle pour générer le courant et la tension requis. Le circuit équivalent pour un module solaire disposé d'un nombre Ns des cellules montées en série et d'un nombre Np des cellules montées en parallèle est représenté sur la fig. 3 [6]

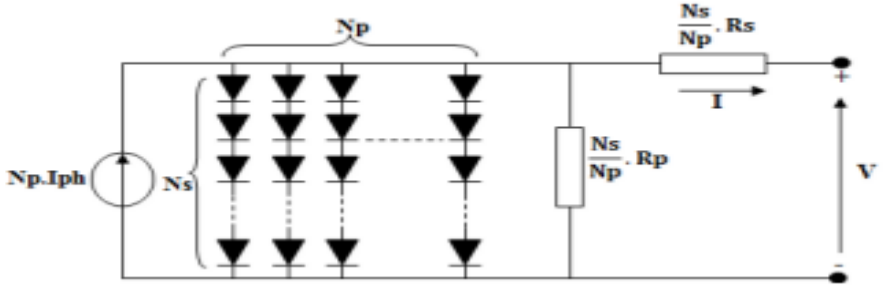


Figure I.16 : Model générale d'un panneau photovoltaïque

L'équation terminale pour le courant et la tension d'un module PV devient la suivant :

$$I = Np * Iph - Np * Is * [e^{\left\{\frac{q*(\frac{v}{Ns}-\frac{I*Rs}{Np})}{K*Tc*A}\right\}} -1] - \frac{\frac{Np*v}{Ns}+I*Rs}{Rp} \qquad (I.10)$$

I-8 Les caractéristiques électriques générateur PV par simulation

La figure suivante représente le modèle du module PV sous Matlab Simulink.

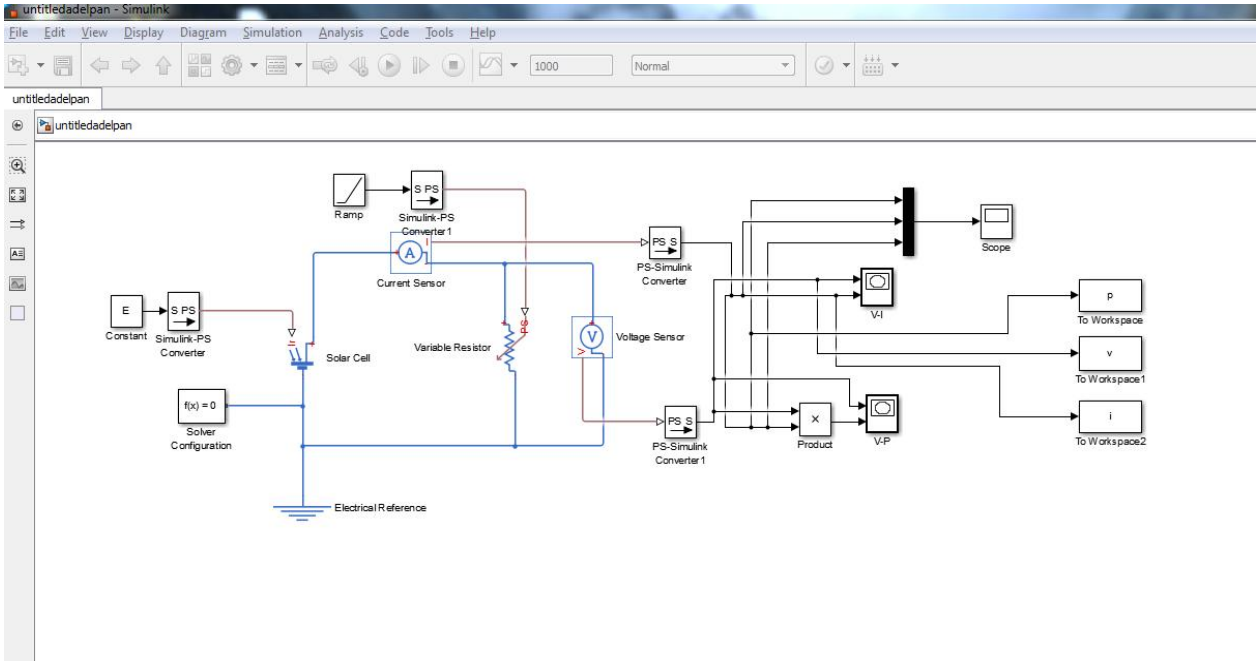


Figure I.17 : Model générale d'un panneau photovoltaïque

I-8-1 CARACTERISTIQUES COURANT ET TENSION :

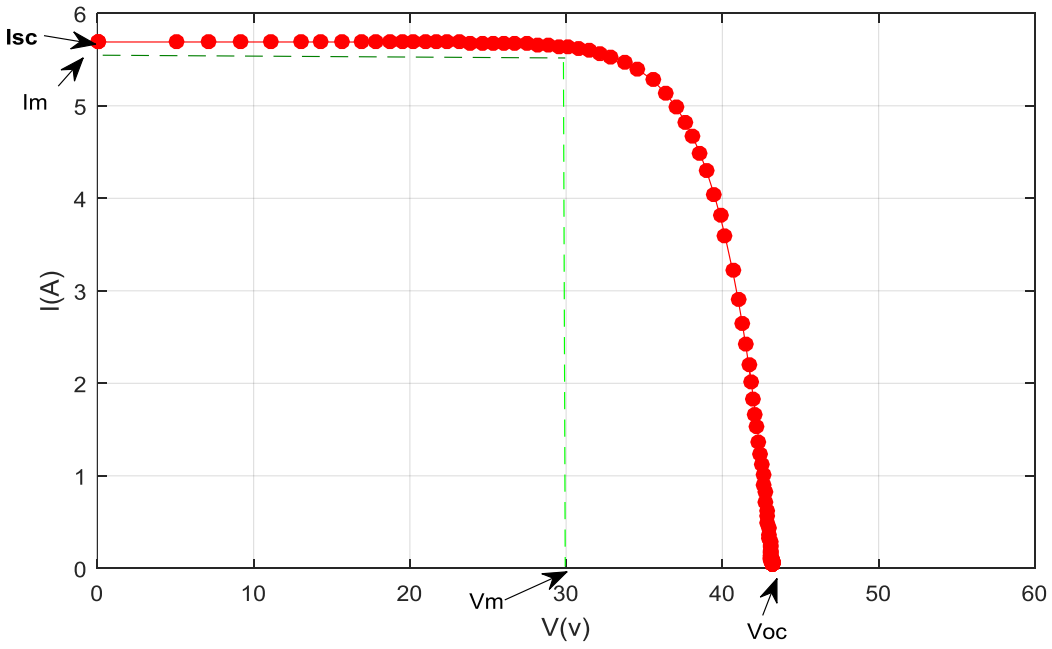


Figure I.18 : Schéma Simulink de PV, de courant

I-8-2 CARACTERISTIQUES PUISSANCE / TENSION :

La puissance délivrée par la cellule a pour expression P = U.I. Pour chaque point de la courbe précédente, on peut calculer la puissance P et tracer la courbe P = f(v). Cette courbe a l'allure suivante

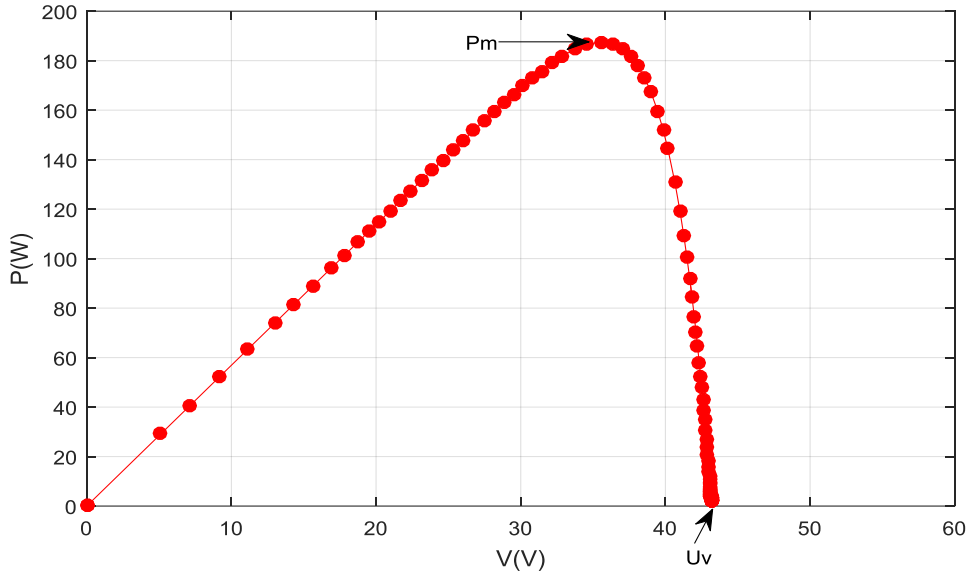


Figure I.19 : Schéma Simulink de PV, de Puissance

I-8-3 L'influence de l'éclairement sur la caractéristique I=f(V) et P=f(V) :

Aussi la figure illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement, ce qui nous permet de déduire l'influence de l'éclairement sur la caractéristique P=*f*(*V*) et I=*f*(*V*) [7]

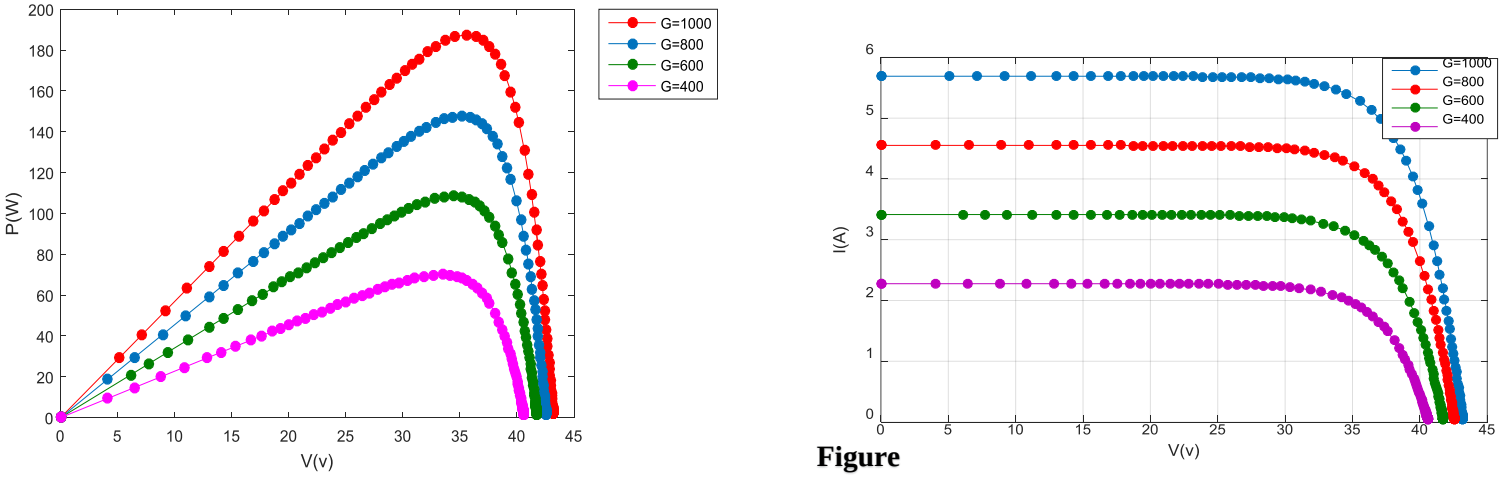


Figure I.20 : Caractéristique courant –tension et puissance –tension d'un module photovoltaïque pour différent niveau d'irradiation (G= 400, 600, 800 ,1000 W/m2) et Tc=25 °C.

La figure (I.20) représente l'évolution de la puissance du module en fonction de la tension à température fixe et éclairement variable, on constats que l'augmentation de l'éclairement entraine une augmentation de la puissance.

On remarque aussi que l'éclairement influe proportionnellement sur la puissance et la tension de circuit ouvert de GPV. Pour un éclairement variable, le courant généré par le module photovoltaïque est pratiquement proportionnel au flux lumineux. Par contre la tension aux bornes de la jonction varie peu car elle est en fonction de la différence de potentiel de la jonction PN du marteau lui-même. La tension du circuit ouvert ne diminue que légèrement avec le flux lumineux.

I-8-4 La figure I.21 montre l'influence de la température sur la caractéristique *I=f(V)*

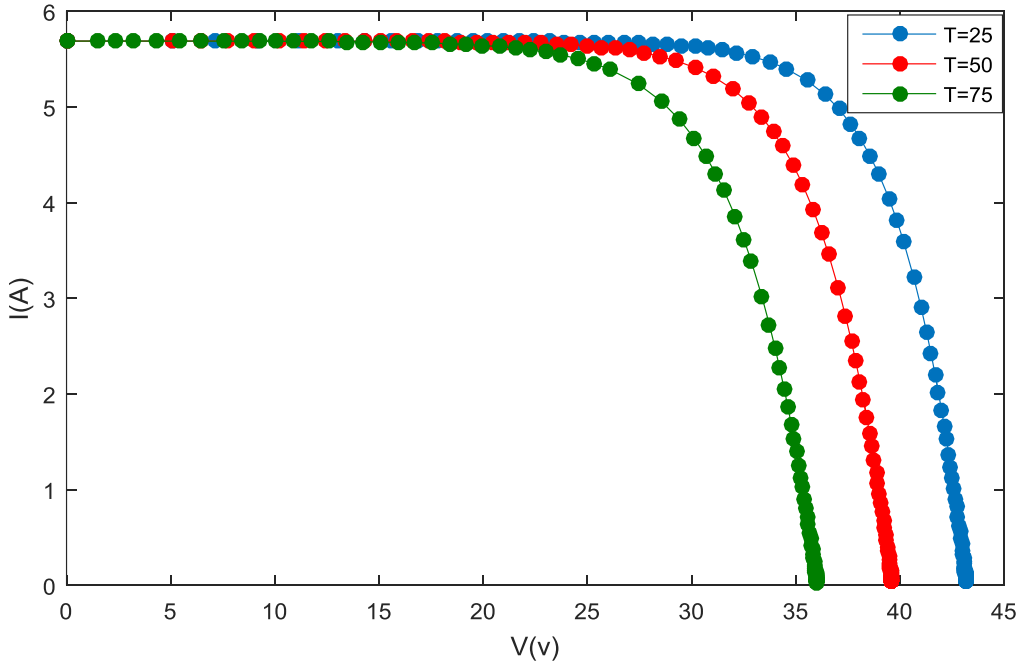


Figure I.21 : Caractéristique courant –tension d'un module photovoltaïque pour une variation de température (Tc= 25, 50, 75°C) et G = 1000W/m2.

Il est essentiel de comprendre l'effet de changement de la température d'une cellule solaire sur la caractéristique *I=f(V)* ; dont le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influe négativement sur la tension de circuit ouvre. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Par conséquent la puissance maximale du générateur subit une diminution. [8]

I-8-5 Figure I.22 montre l'influence de la température sur la caractéristique *P=f(V)*

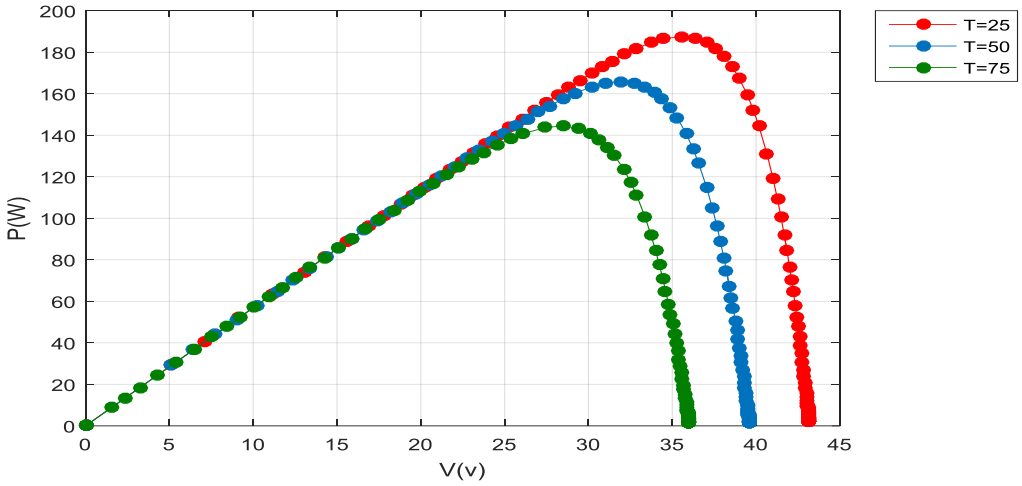


Figure I.22 : Caractéristique puissance –tension d'un module photovoltaïque pour une variation de température (Tc= 25, 50, 75°C) et G = 1000W/m2.

La figure (I.22) illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs de la température, ce qui nous permet de déduire l'influence de la température sur la caractéristique *P=f (V)* [7].

I-9 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a vu la généralité du système photovoltaïque et modélisés, simules et analyse les caractéristiques d'un panneau photovoltaïque. Nous avons aussi étudié l'influence des phénomènes physiques ; la température et l'éclairement sur le générateur.

Chapitre II :

Modélisation et simulation de l’association système PV - hacheur

II-1 Introduction :

Dans un système photovoltaïque (PV), le rendement d'un GPV dépend fortement des conditions d'éclairement et de température, avec l'existence toujours d'un point de fonctionnement où la puissance débitée par le GPV est maximale. Pour optimiser le fonctionnement du système PV, il est nécessaire d'extraire le maximum de puissance du générateur PV et ainsi faire fonctionner le générateur PV à son point de puissance maximale (PPM).

Ceci est réalisé par l'intermédiaire d'un étage d'adaptation d'impédance qui est en fait, un convertisseur statique (hacheur boost) piloté par une commande spécifique appelée commande MPPT (maximum power point tracking) garantissant l'extraction à chaque instant, du maximum de puissance disponible aux bornes du GPV en poursuivant à chaque instant, le PPM du Générateur PV.

Ce chapitre sera consacré à la modélisation d'une méthode de poursuite du point de puissance maximal appliquée au système photovoltaïque que nous avons développé dans le chapitre précédent.

II-2 La commande Mppt :

II-2-1 Définition et principe de la recherche MPPT :

La commande **MPPT** (**M**aximum **P**ower **P**oint **T**racking) est un organe fonctionnel du système PV et permet de chercher le point de fonctionnement optimal du générateur PV qui dépend des conditions météorologiques et de la variation de la charge. Son principe de régulation est basé sur la variation automatique du rapport cyclique α à la valeur adéquate de manière à maximiser continuellement la puissance à la sortie du panneau PV.

II-2-2 Classification des Commandes MPPT :

La classification peut être basée sur la fonction des techniques ou des stratégies de commande utilisées. Ainsi, deux catégories peuvent être présentées : méthodes directes et indirectes.

II-2-2-1 MPPT indirecte :

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées (I_{sc}ou V_{oc}), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP. Il compte aussi les commandes en se basant sur une estimation du point de fonctionnement du GPV réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable. Il existe aussi des commandes qui

établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur. Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser. Elles sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis devant fonctionner dans des zones géographiques où il y a peu de changements climatiques. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de la tension de circuit ouvert du générateur, la méthode de court-circuit etc.… [8]

II-2-2-2 MPPT Directe :

Les méthodes directes sont des méthodes qui utilisent les mesures de tension et de courant des panneaux et dont l'algorithme est basé sur la variation de ces mesures. La détermination de la valeur de la puissance du générateur PV est indispensable pour la recherche du MPP, nécessite la mesure de la tension et du courant du générateur, ainsi que la multiplication de ces deux variables. Si la puissance de sortie est plus grande, alors la direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée. D'autres algorithmes se basent sur l'introduction de variations sinusoïdales en petit signal sur la fréquence de découpage du convertisseur pour comparer la composante alternative et la composante continue de la tension du GPV et pour ainsi placer le point de fonctionnement du GPV le plus près possible du MPP. L'avantage de ce type de commandes est leurs précisions et leur rapidité de réaction. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de différenciation, la méthode Perturbe & Observe (P&O), l'incrément de conductance (Inc.) … [8]

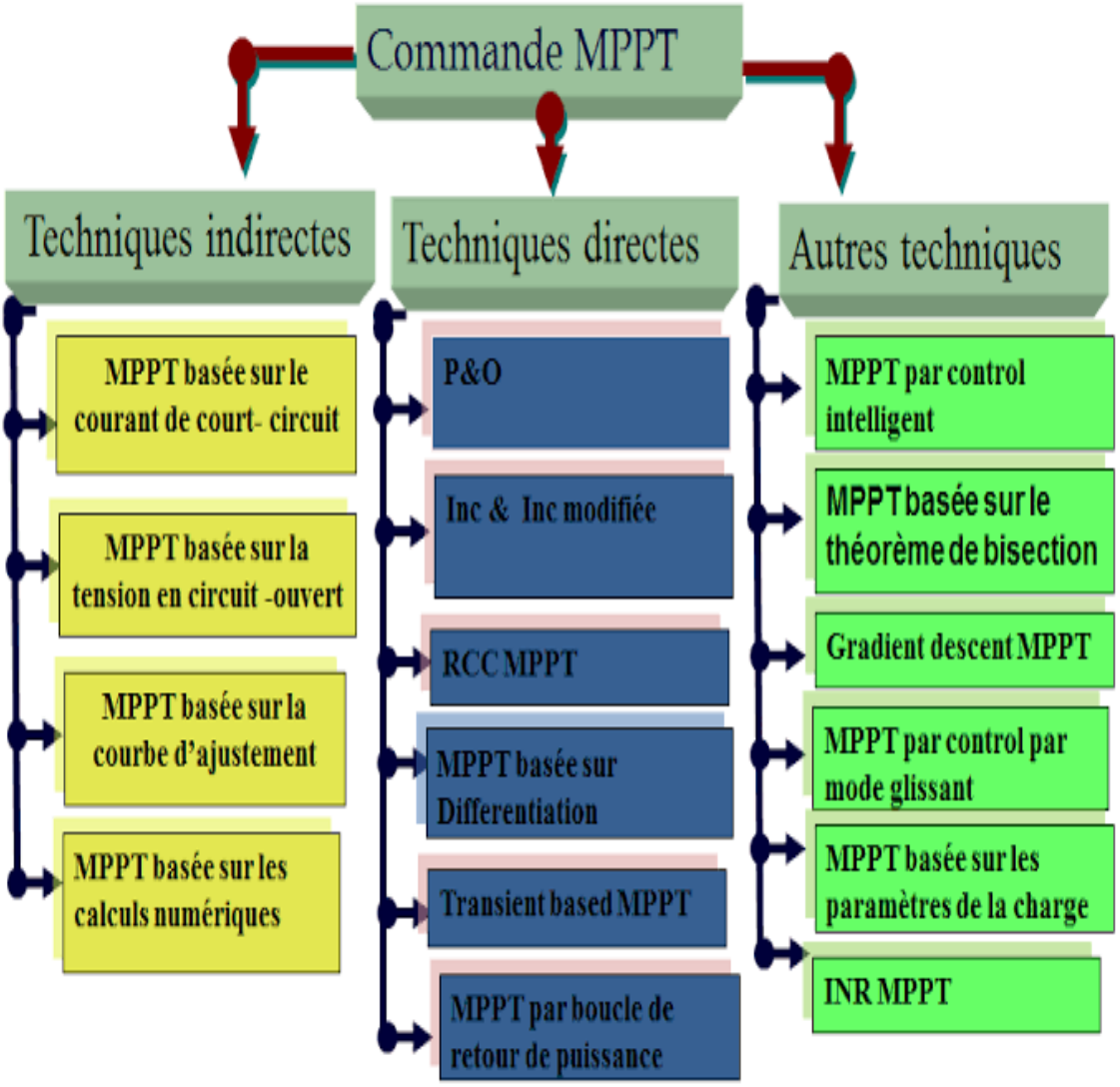


Figure II.1 : Organigramme de classification des commandes MPPT.

II-3 Les algorithmes de recherche du point de puissance maximale (MPPT)

La commande MPPT, (Maximum Power Point Tracking), est une commande essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque. Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le panneau PV. Pour cette raison, on va présenter les algorithmes de commande les plus populaires.

II-3-1 Algorithme Incrément de la conductance (INC) :

Pour chercher les PPM, une autre technique existe qui se base sur la connaissance de la Variation de conductance du GPV et des conséquences sur la position du point de fonctionnement

Par rapport à un PPM.

Ainsi, la conductance du module photovoltaïque est définie par le rapport entre le courant Et la tension du GPV comme indiqué ci-dessous :

$$G = \frac{I_{PV}}{V_{PV}} \qquad \text{(II. 1)}$$

La variation élémentaire (incrément) de la conductance peut être définie par :

$$dG = \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \qquad \text{(II.2)}$$

La puissance produite par le générateur PV peut être exprimé par :

$$P_{pv} = V_{pv} * I_{pv} \qquad \text{(II.3)}$$

D'où en écrivant :

$$\frac{dP_{pv}}{dv_{pv}} = I_{pv}\frac{dV_{pv}}{dV_{pv}} + V_{pv}\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \qquad \text{(II.4)}$$

$$\frac{dP_{pv}}{dv_{pv}} = I_{pv} + V_{pv}\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \qquad \text{(II.5)}$$

Donc :

$$\frac{I}{v_{pv}} * \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} + \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \qquad \text{(II.6)}$$

$$\frac{I}{v_{pv}} * \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = G + dG \qquad \text{(II.7)}$$

La figure suivante présente l'organigramme de poursuit du PPM par la méthode d'incrémentation d'inductance [14].

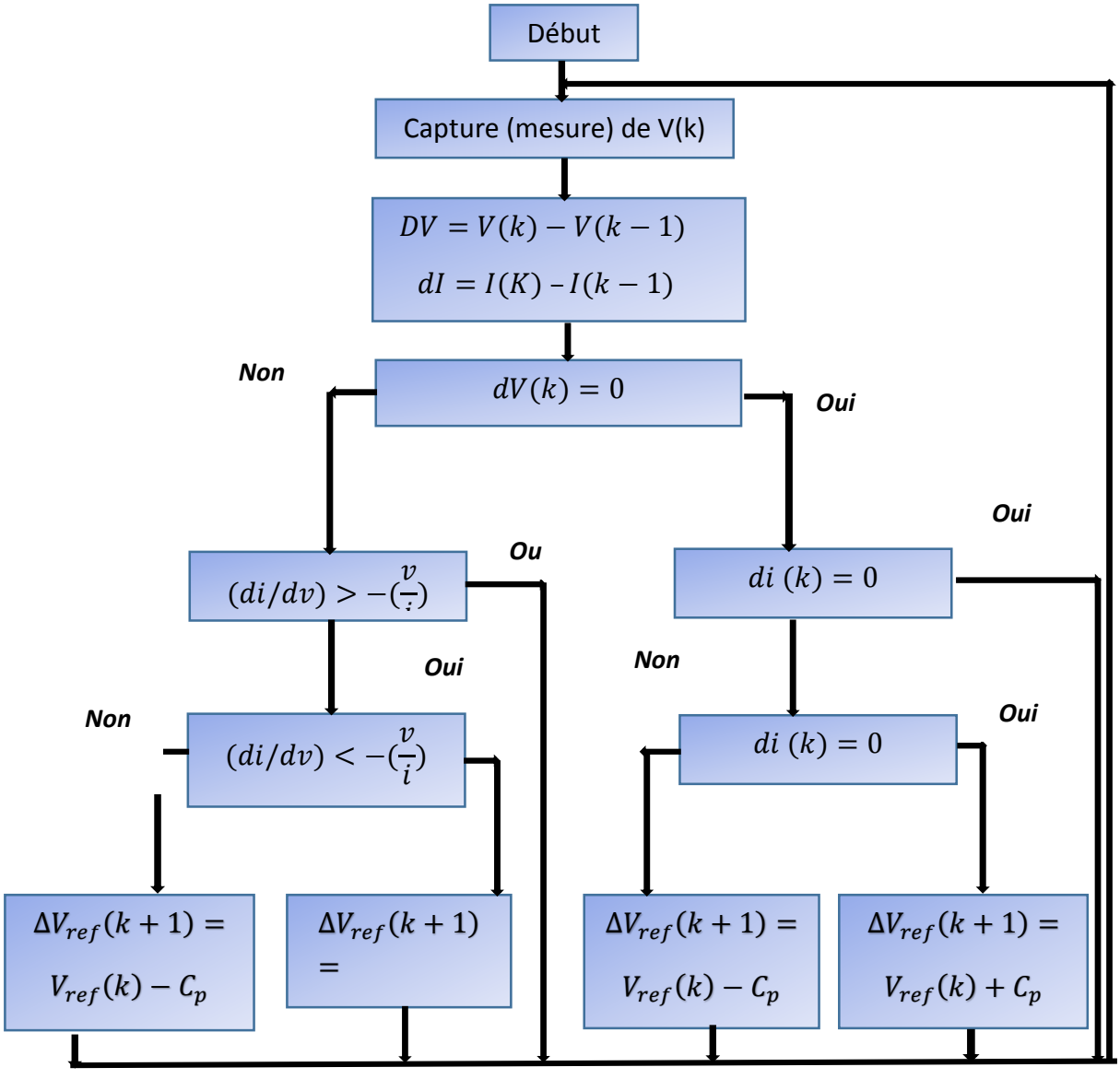


Figure II.2 : organigrammes de l'algorithme INC

II-3-2 Algorithme à base de la logique floue :

La commande à base de la logique floue a été utilisée dans les systèmes de poursuite du point de puissance maximale. Cette commande offre l'avantage d'être une commande robuste et qui ne nécessite pas la connaissance exacte du modèle mathématique du système.

En particulier, cette commande est mieux adaptée aux systèmes non linéaires. Le fonctionnement de cet algorithme se fait en trois blocs : la fuzzification, l'inférence et la défuzzification (figure II.3).

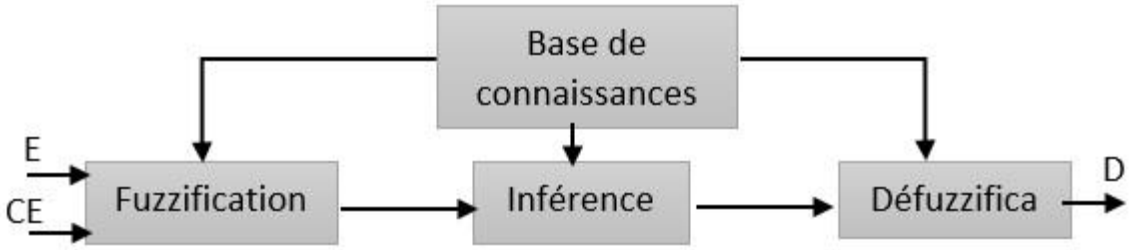


Figure II.3: La structure de base de FLC

La fuzzification permet la conversion des variables physiques d'entrée en ensembles flous. Dans notre cas, on a deux entrées, l'erreur E et la variation de l'erreur CE définies dans équation II.8 :

$$E = \frac{(p(k)-p(k-1))}{(I(k+1)-I(k))} \qquad \text{(II.8)}$$

$$CE=E(k+1)-E(k) \qquad \text{(II.9)}$$

On attribue à ces grandeurs des variables linguistiques : NG (Négative Grand, NP (Négative Petit), Z (Zéro), PP (Positive Petit) et PG (Positive Grand) :

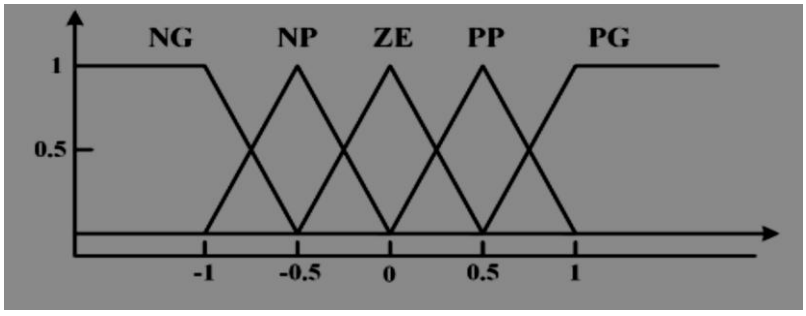


Figure II.4 : Les fonctions d'appartenance des entrées et sorties du FLC

Le tableau (II.1) est basé sur un convertisseur élévateur. Si, par exemple, le point de fonctionnement est loin à gauche du MPP, si E est PG et CE est ZE, alors le rapport cyclique doit être augmenté largement, d'où D devrait être PG pour atteindre le MPP.

Tableau II.1 : Table des entrées et sorties du FLC

	NG	NP	Z	PP	PG
NG	Z	Z	NG	NG	NG
NP	Z	Z	NP	NP	NP
Z	NP	Z	Z	Z	PP
PP	PP	PP	PP	Z	Z
PG	PG	PG	PG	Z	Z

Dans l'étape de défuzzification, la sortie du régulateur logique floue est convertie à partir d'une variable linguistique en une variable numérique [5], en utilisant toujours des fonctions d'appartenance. Ceci permet d'obtenir un signal analogique qui va contrôler le convertisseur de puissance au MPP. L'application des contrôleurs de logique floue (FLC) dans les MPPT a donnée des performances notables dans diverses conditions atmosphériques. Toutefois, leur efficacité dépend beaucoup plus de la connaissance de l'utilisateur dans le calcul exact des erreurs et l'invention des règles de base de la table d'inférence. [6]

II-3-3 Méthode basée sur les réseaux de neurones artificiels (ANN) :

Avec les techniques de poursuite de point de puissance maximale, telles que, la technique de fraction de la tension du circuit ouvert, P&O, INC, ainsi que les réseaux de neurones qui est venu comme une autre technique de MPPT, cette méthode possède généralement trois couches, Un ensemble d'unités d'entrée dont le rôle est de recevoir les signaux externes et de les diffuser aux unités de la couche suivante. Les unités d'entrée sont organisées en une couche appelée couche d'entrée. Bien que la couche d'entrée n'effectue aucune opération sur les signaux d'entrée. Les variables d'entrées peuvent être des paramètres d'un générateur PV (comme le Voc et Isc). Les données atmosphériques telles que l'éclairement et la température ou bien la combinaison entre eux. – Une couche de sortie qui produit la réponse du réseau au signal d'entrée. – Une ou plusieurs couches cachées se trouvant entre la couche d'entrée et la couche de sortie. Elles sont appelées ainsi car elles n'ont aucune connexion avec les entrées ni avec les sorties. La fonction des unités cachées est le traitement des entrées L'opération de l'obtention du PPM, dépond de l'algorithme utilisé par la couche cachée et le type d'apprentissage de réseaux de neurones, toutes les interconnexions sont pondérées entre eux. i et j sont des nœuds

dont l'interconnexion est dite le poids (Wi,j), pour identifier avec précision le MPP. Le poids (Wi, j) peut être déterminé grâce au processus d'apprentissage, par lequel le générateur PV est testé pendant des mois et des années, et les modèles entre l'entrée et la sortie du RNA sont enregistrés. La plupart des générateurs PV a des caractéristiques déférentes, un RNA doit faire un apprentissage pour un GPV dans lequel sera utilisé. Les caractéristiques d'un GPV changent avec le temps, ce qui implique que les réseaux de neurones doivent faire l'apprentissage périodiquement pour assurer une grande précision du MPPT. [15]

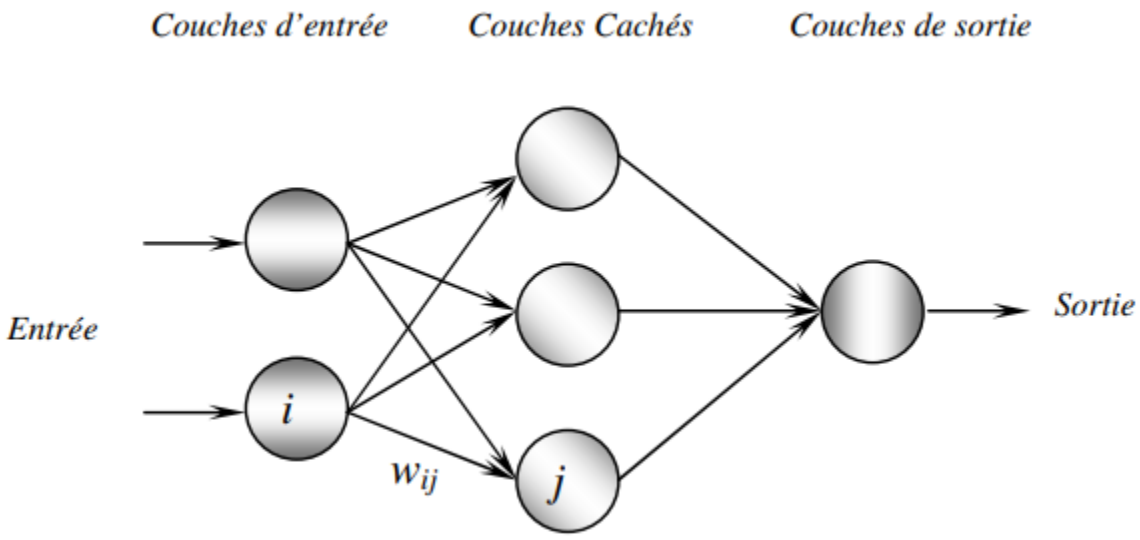


Figure II.5 : Exemple d'un réseau de neurone

II-3-4 Méthode de l'Algorithme P&O :

La figure (II.6) représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. La figure montre les entrées du système MPPT ; ΔP et ΔV calculées à partir des signaux P(k), P(k-1), V(k) et V(k-1), les signes de ces deux entrées sont exploités pour savoir dans quelle position de la courbe P-V on se trouve.

D'abord la tension V et le courant I sont mesurés pour calculer la puissance Pk. Cette valeur Pk est comparée à la valeur de la puissance obtenue durant la dernière mesure Pk-1. Si la puissance fournie par le panneau a augmenté depuis la dernière mesure, l'incrémentation ou décrémentations du rapport cyclique α continuera dans le même sens que lors du dernier cycle et ceci est fait par le test sur ΔV.

- Si $\Delta V > 0$ cela veut dire qu'on a incrémenté V durant le dernier cycle c'est-à-dire $Dk+1 = Dk + \Delta D$
- Si $\Delta V < 0$ cela veut dire qu'on a décrémenté V durant le dernier cycle c'est-à-dire qu'on va mettre $Dk+1 = Dk - \Delta D$.

Donc on termine dans le chemin ou P continue à augmenter. Si la puissance fournie par le panneau a diminué depuis la dernière mesure, l'incrémentation ou la décrémentation du rapport cyclique α sera en sens inverse par rapport au dernier cycle et ceci est fait aussi par le test sur ΔV. Avec cet algorithme la tension de fonctionnement V est perturbée à chaque cycle. Dès que le MPP sera atteint, V oscillera autour du point de fonctionnement idéal V_{mpp}. Mais ceci cause des pertes de puissances qui dépendent de la largeur du pas d'une simple perturbation ΔD. Si la largeur du pas est grande, l'algorithme de MPPT répondra rapidement aux changements soudains mais occasionnera des pertes dans des conditions changeantes lentement et dans les états stables. Si la largeur du pas est très petite les pertes dans les états stables ou les conditions changeantes lentement seront réduites, mais le système aura une réponse lente aux changements rapides de la température ou d'insolation. La valeur pour la largeur idéale du pas du système ne peut être déterminée qu'expérimentalement où par simulation, est ainsi satisfaire un compromis entre la réponse rapide et perte de puissance dans les états stables. [35]

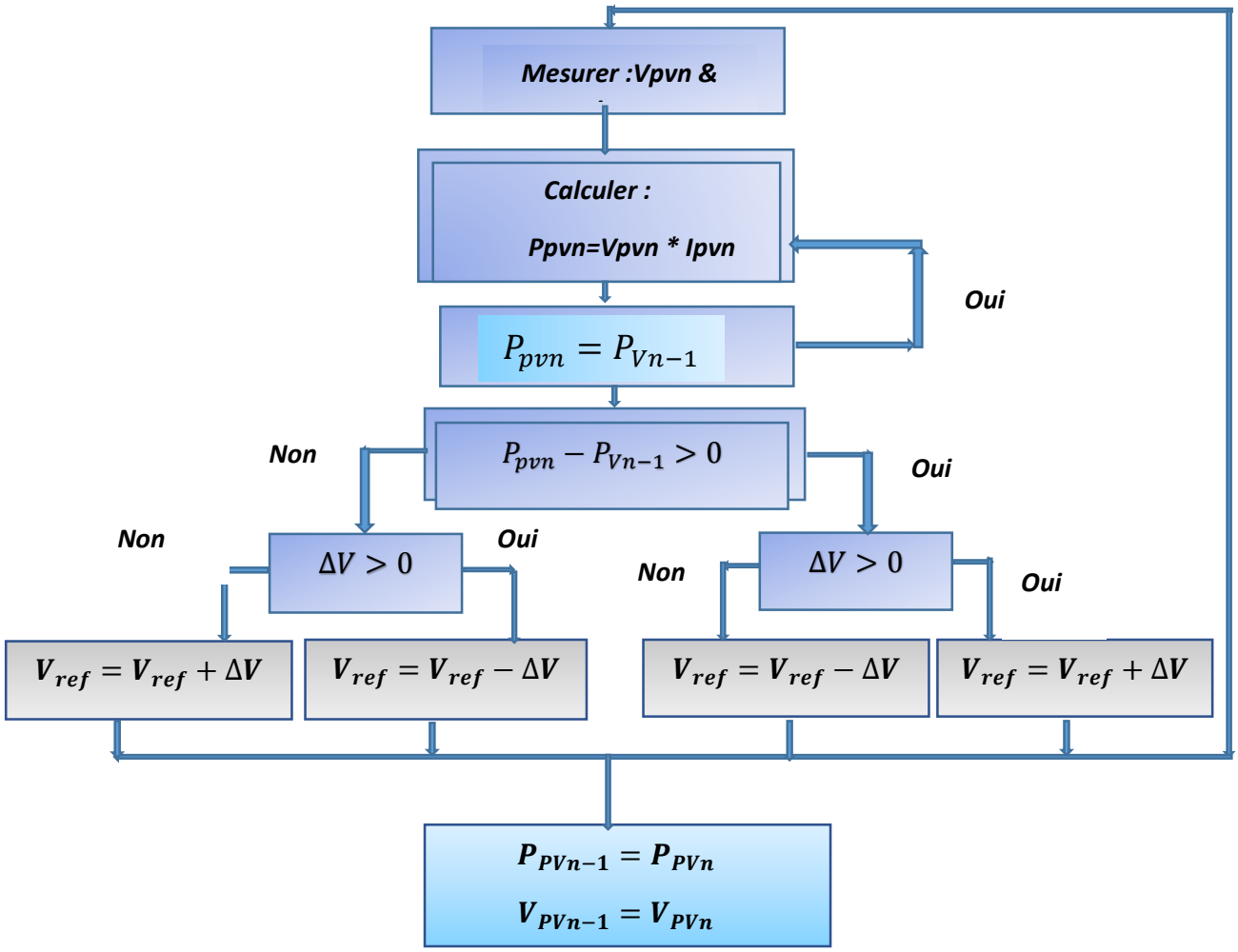


Figure II.6: Algorithme de la méthode P&O

II-4 Le hacheur boost :

II-4-1 Définition :

Le hacheur ou convertisseur continu - continu est un dispositif de l'électronique de puissance mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs commandés et qui permet de modifier la valeur de la tension d'une source de tension continue avec un rendement élevé. Le découpage se fait à une fréquence très élevée ce qui a pour conséquence de créer une tension moyenne. C'est l'analogue, pour les sources de tensions continues, du transformateur utilisé en régime alternatif. Si la tension délivrée en sortie est inférieure à la tension appliquée en entrée, le hacheur est dit dévolteur. Dans le cas contraire, il est dit survolteur. Il existe des hacheurs capables de travailler des deux manières (Boost-Buck).

II-4-2 Différents types d'hacheurs :

Selon la position du commutateur et de l'hacheur, différents types de convertisseurs de tension peuvent être réalisés :

• Abaisseur de tension (back)

• Élévateur de tension (boost)

• Abaisseur élévateur (back-boost)

Ce qui nous intéresse dans notre sujet, c'est le convertisseur élévateur de tension (boost).

II-4-3 Convertisseur Boost :

Un convertisseur Boost, ou hacheur parallèle, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur. 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).[6]

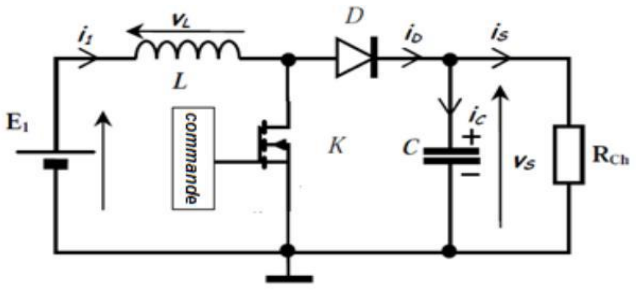


Figure II.7: Le fonctionnement d'un hacheur boost

L'interrupteur K1 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).

II-4-4 Principe de fonctionnement :

L'interrupteur (K1*)* est fermé pendant la fraction (DT*)* de la période de découpage (T*)*. La source d'entrée fournit l'énergie à la charge (R) à travers l'inductance (L*)*. Lors du blocage du transistor, la diode (K2*)* assure la continuité du courant dans l'inductance. L'énergie emmagasinée dans cette inductance est alors déchargée dans le condensateur et la résistance

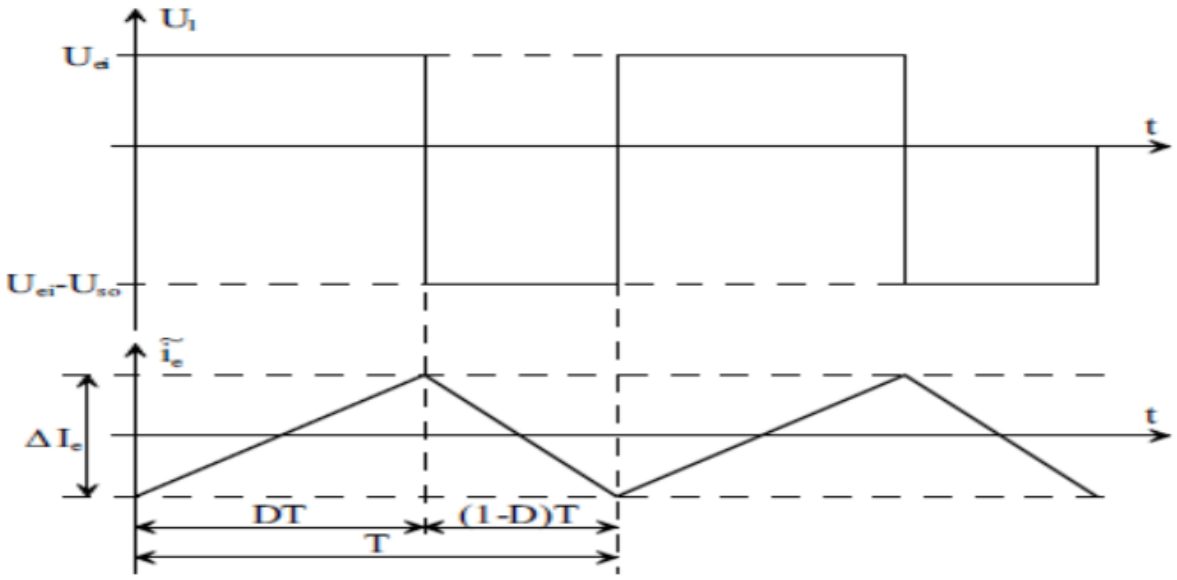


Figure II.8 : Formes d'ondes de la tension de sortie d'un hacheur de type BOOST

II-5 Simulation du system PV avec hacheur commandé en MPPT

Pour avoir une meilleure connexion entre le GPV et la charge et bénéficier de la puissance maximale, on présente l'une des méthodes de la commande MPPT qui est la méthode IC, partant de la modélisation de cet algorithme aux résultats des tests.

II-5-1 Résultat de Simulation

Dans cette simulation nous somme utilisé un générateur photovoltaïque avec des conditions variables de l'irradiation (G) et température (T), on a aussi modélisé un hacheur de type Boost avec les paramètres suivants.

1. C_1= 100e-6 (F)
2. C_2= 12000e-06 (F)
3. C_3=12000e-06 (F)
4. L= 5e-3 (H)
5. R= 2.9 (Ω)

On a utilisé aussi une commande MPPT de type IC

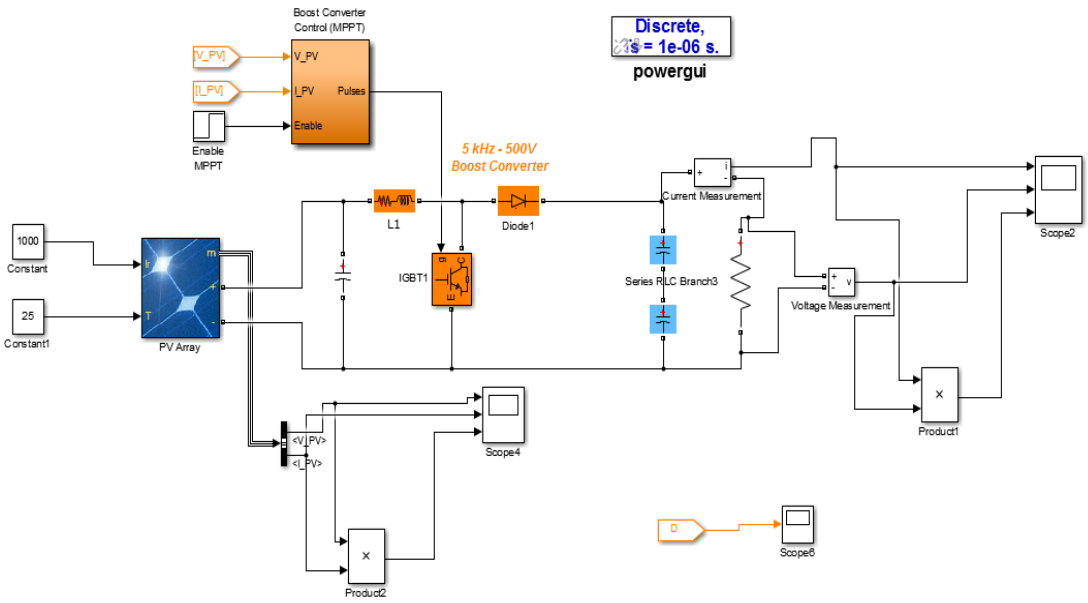


Figure II.9. Schéma block sous Simulink de la commande MPPT incrémental conductance

Le générateur PV de 100KW utiliser 330 module Sun Power (SPR-330-WHT-D). Le réseau compose de 66 chaine de 5 module connectés au réseau et en parallèle (66*5*305.2) =100.7KW

Les spécifications du fabricant pour un module sont :

Nombre de cellules en série : 96

Tension à vide : Voc =64.2(V)

Courant de court-circuit : Icc=5.96(A)

Tension et courant maximal à puissance maximal : Vmp 54.7(V) et Imp= 5.38(A).

Le générateur PV délivrant un maximum de 100(KW) à 1000w/m2 d'ensoleillement et le convertisseur (hacheur Boost) élévateur DC-DC 5KHz augmentant la tension de PV (273(V) à 540(V) DC. Le rapport cyclique de commutation est optimisé par un contrôleur MPPT.

II-5-2 Résultat de simulation

Nous avons simulé le fonctionnement d'un ensemble (GPV-BOOST-MPPT et une charge) sous des conditions atmosphériques fixes (un éclairement 1000W\m^2 et une température de 25°C). La Figure suivante représente, respectivement, l'évolution de la puissance et la tension et le courant à l'entrée et la sortie du système.

II-5-2-1 Comparaison entre les entrées et les sorties du système PV :

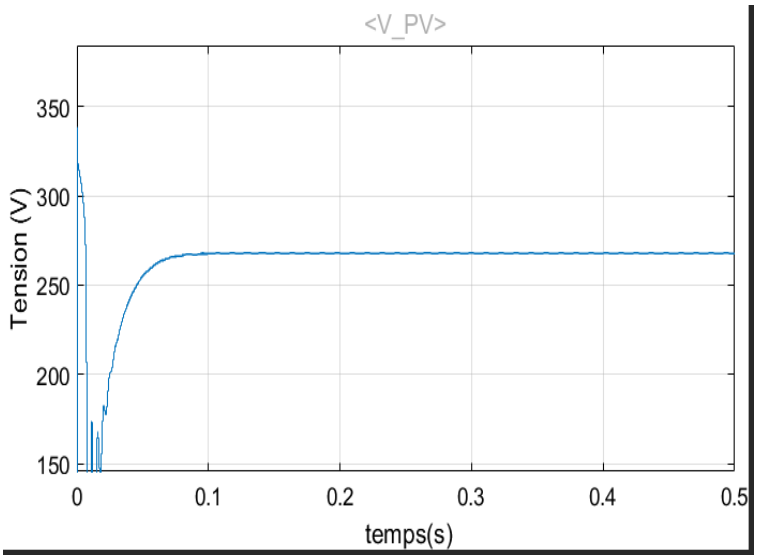


Figure. II.10: Courbe V(t), entrer du système (E=1000W/m² T=25°).

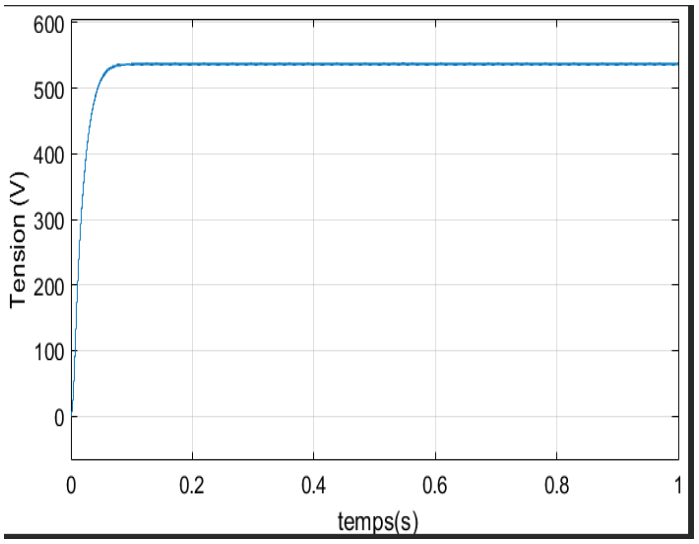


Figure. II.11: Courbe V(t), sortir du système (E=1000W/m² T=25°).

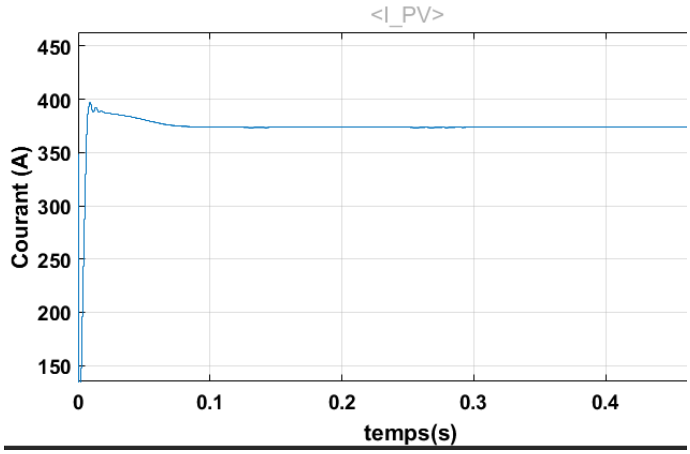


Figure. II.12: Courbe I(t), entrer du système (E=1000W/m²T=25°).

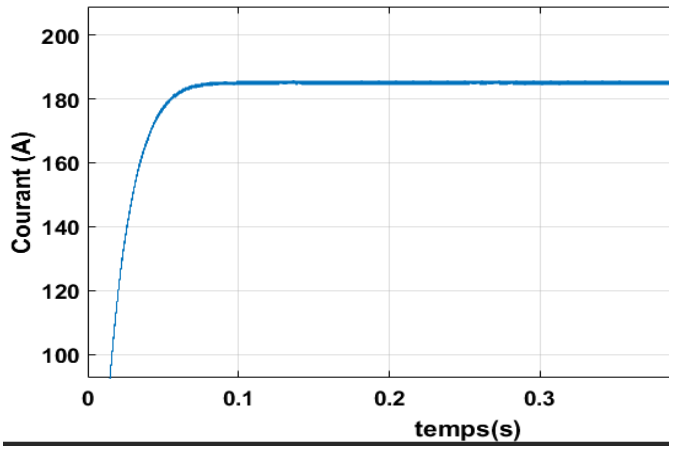


Figure. II.13: Courbe I(t), sortir du système (E=1000W/m² T=25°).

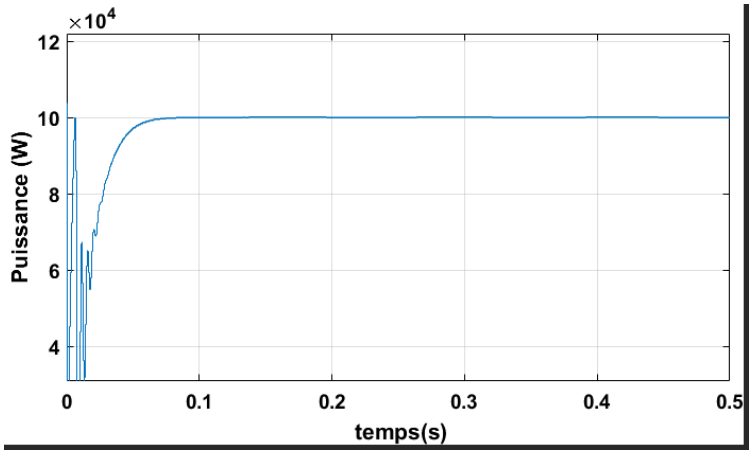


Figure. II.14: Courbe P(t), entrer du système (E=1000W/m²T=25°).

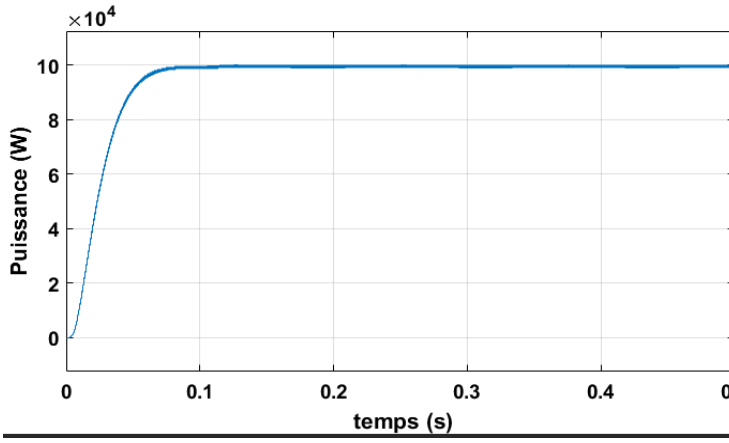


Figure. II.15: Courbe P(t), sortir du système (E=1000W/m² T=25°

II-5-2-2 Fonctionnement sous des conditions climatiques.

Nous avons testé le fonctionnement du système étudié sous une température fixe de 25°C et éclairements (500W\m^2, 800W \m^2) comme illustré dans les figures suivantes :

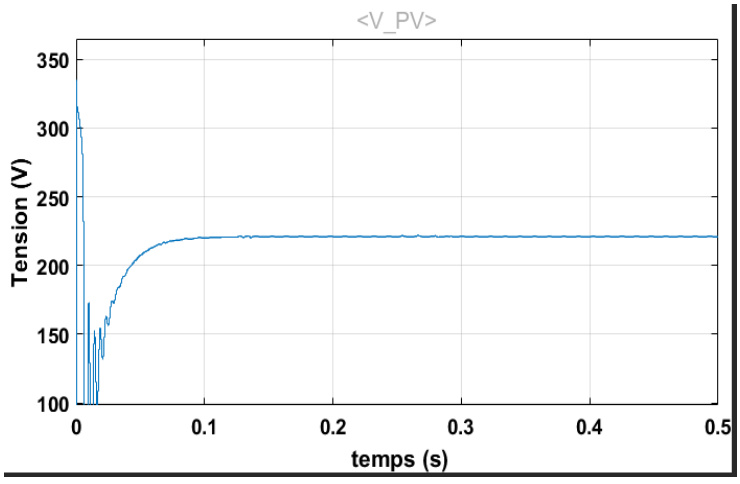


Figure. II.16: Courbe, V(t) entrer du système (E=800W/m² T=25°).

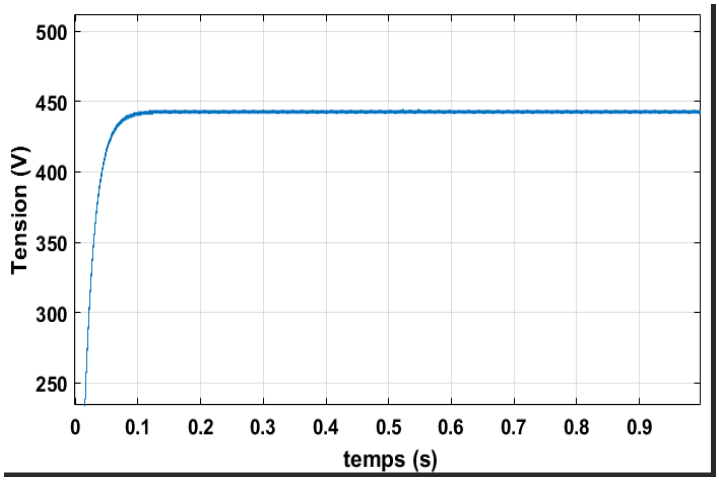


Figure II.17: Courbe, V(t) sortir du système (E=800W/m²T=25°).

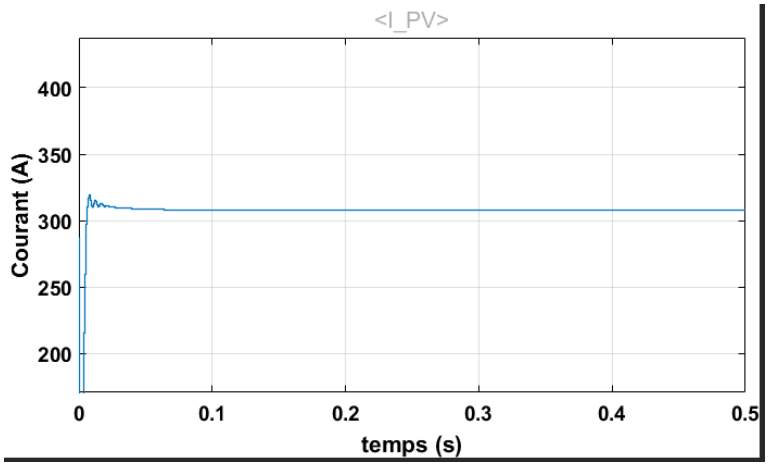


Figure II.17 : Courbe, I(t) entrer du système (E=800W/m² T=25°).

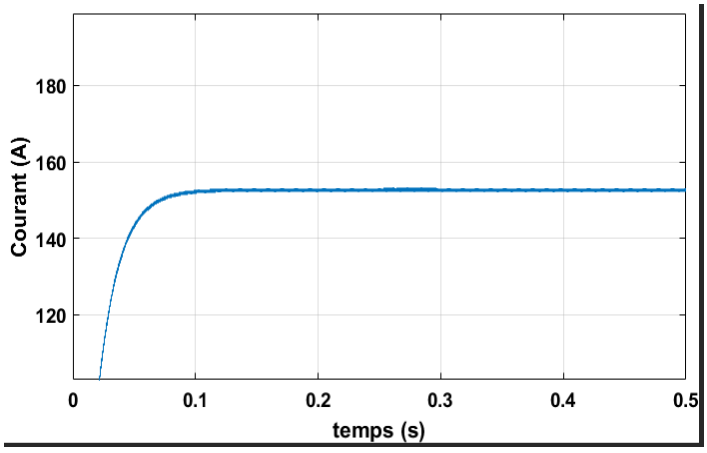


Figure II.18: Courbe, I(t) sortir du système (E=800W/m²T=25°).

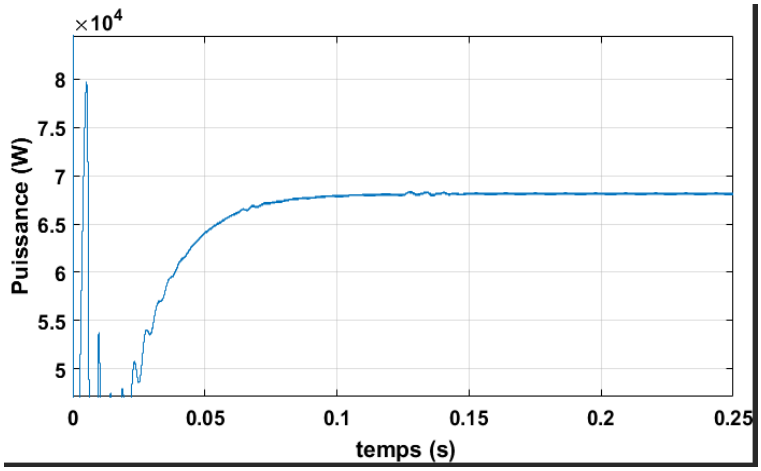


Figure II.19 : Courbe, P(t) entrer du système (E=800W/m² T=25°).

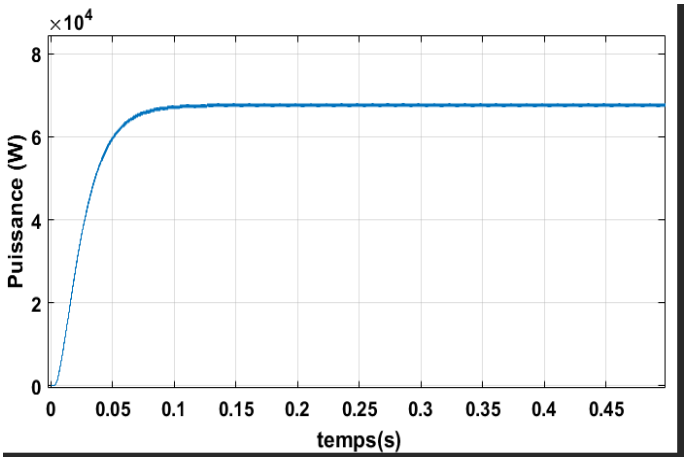


Figure II.20: Courbe, P(t) sortir du système (E=800W/m²T=25°).

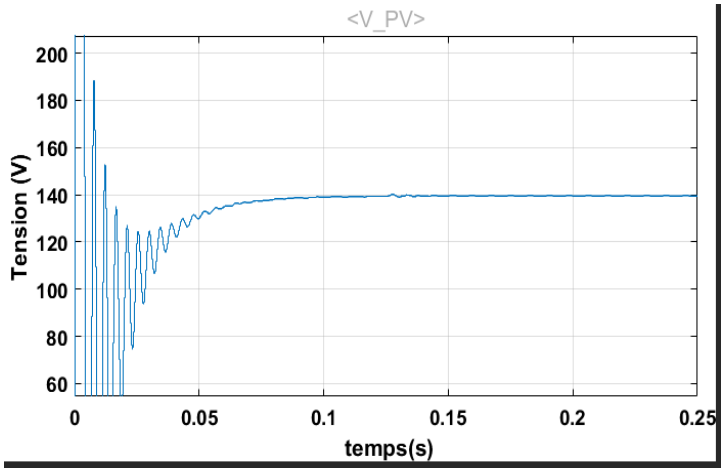


Figure II.21: Courbe V(t)) à entrer du système(E=500W/m²T=25°).

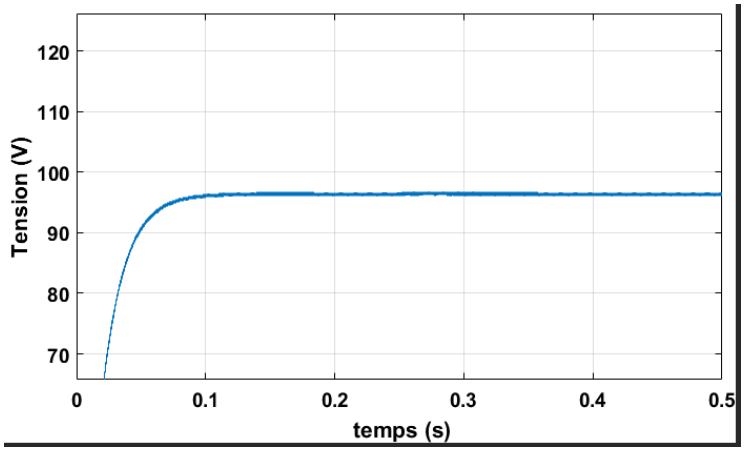


Figure II.22 : Courbe V(t)) à sortir du système(E=500W/m²T=25°).

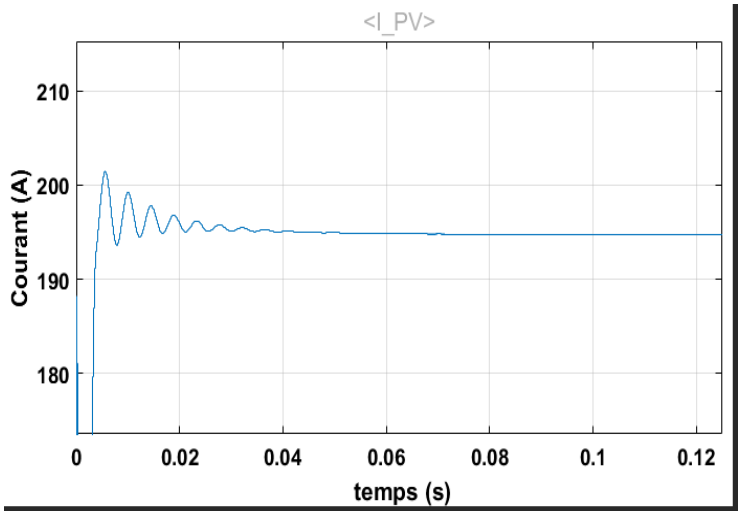


Figure II.23: Courbe I(t)) à entrer du système(E=500W/m²T=25°).

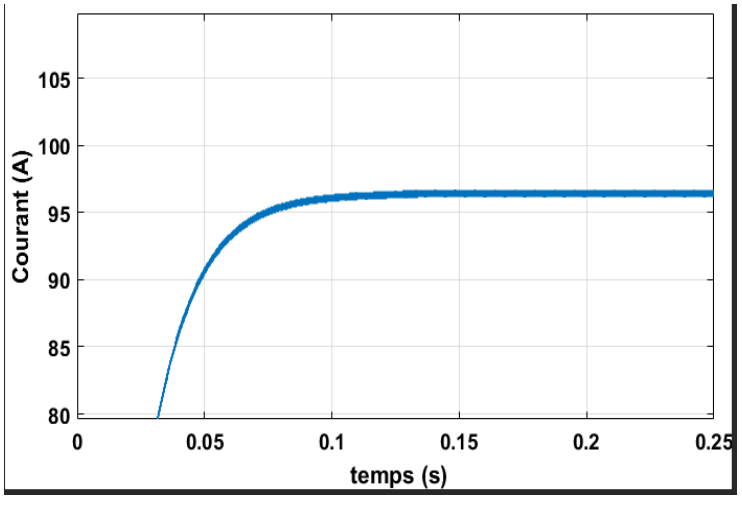


Figure II.24: Courbe I(t)) à sortir du système(E=500W/m²T=25°).

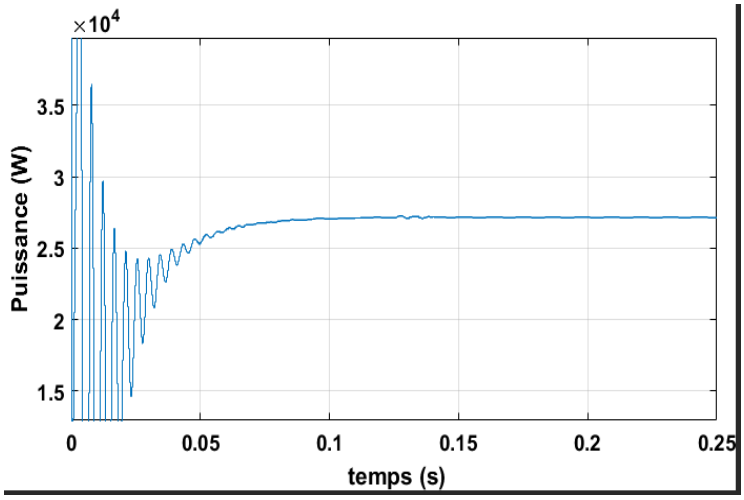


Figure II.26: Courbe P(t)) à entrer du système(E=500W/m²T=25°).

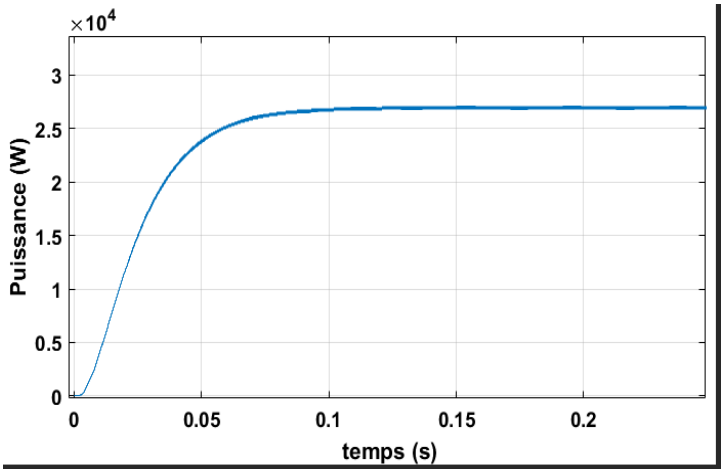


Figure II.27: Courbe P(t)) à sortir du système(E=500W/m²T=25°).

II-5-2-3 Température variable :

Dans ce cas nous allons inverser le test de fonctionnement du système étudié sous un éclairement fixe de 1000W/m² et une température variable (0°, 50°). Les figures suivantes montrent les résultats obtenus :

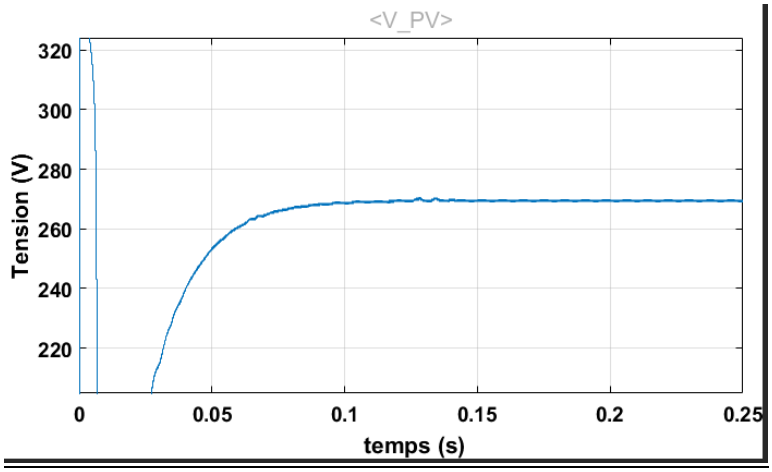


Figure II.28: Courbe V(t) à entrer du système (E=1000W/m² T=-0°).

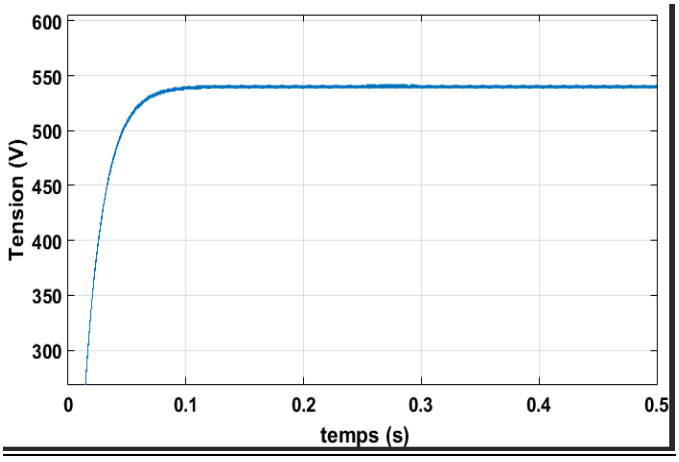


Figure II.29: Courbe V(t) à sortir du système (E=1000W/m² T=0°).

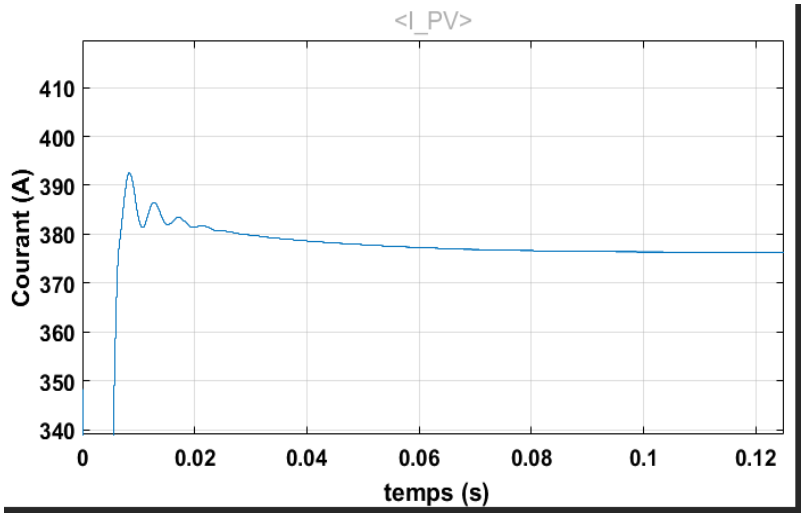


Figure II.30 : Courbe I(t) à entrer du système (E=1000W/m² T=-0°).

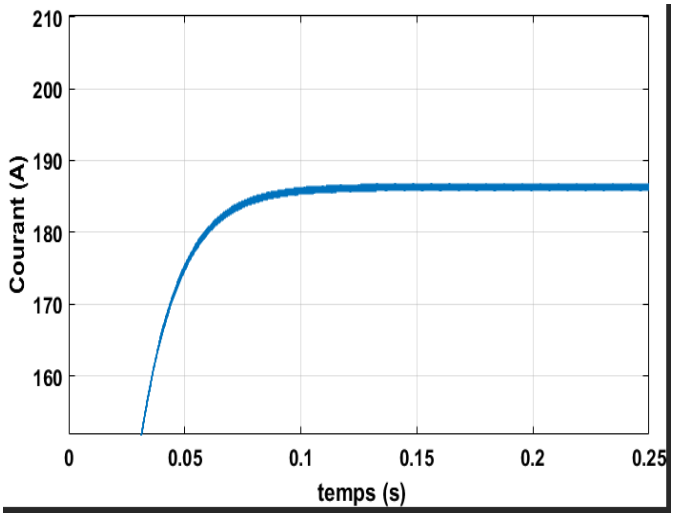


Figure II.31: Courbe I(t) à sortir du system (E=1000W/m² T=-0°).

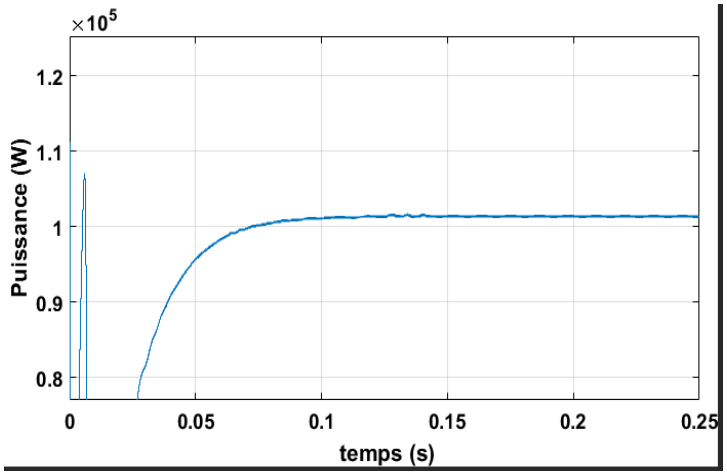


Figure II.32: Courbe P(t) à entrer du système (E=1000W/m² T=-0°).

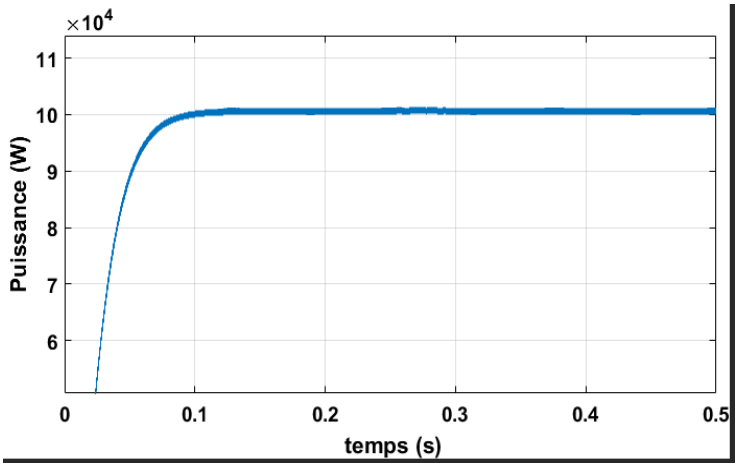


Figure II.33: Courbe P(t) à sortir du système (E=1000W/m² T=-0°).

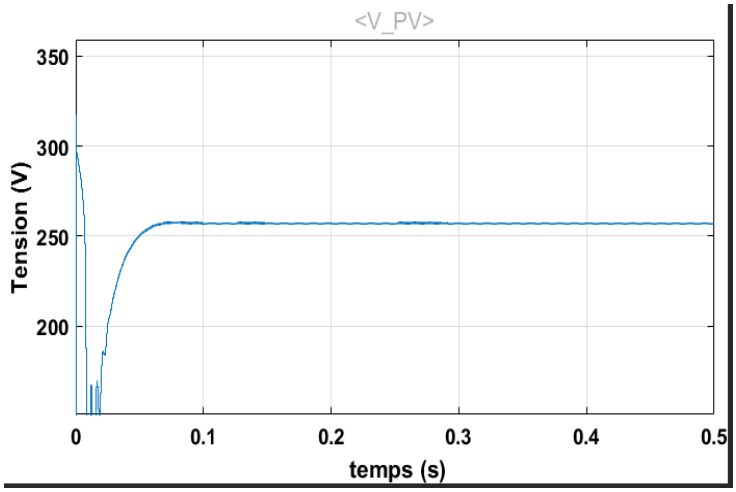


Figure II.34: Courbe V(t) à entrer du système (E=1000W/m² T=-50°).

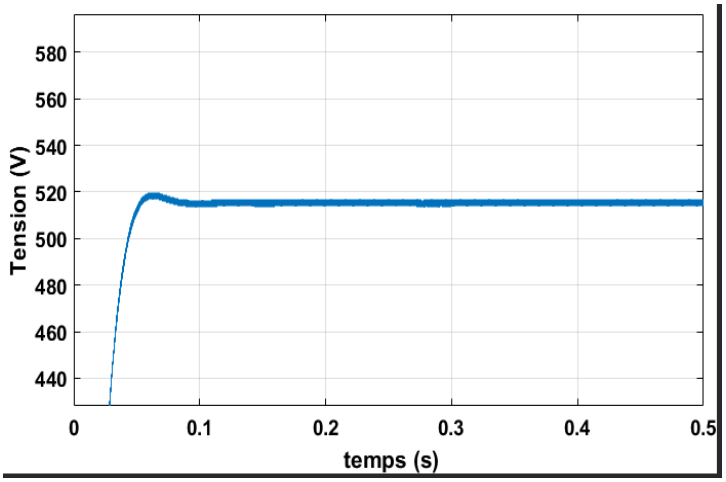


Figure II.35: Courbe V(t) à sortir du système (E=1000W/m² T=-50°).

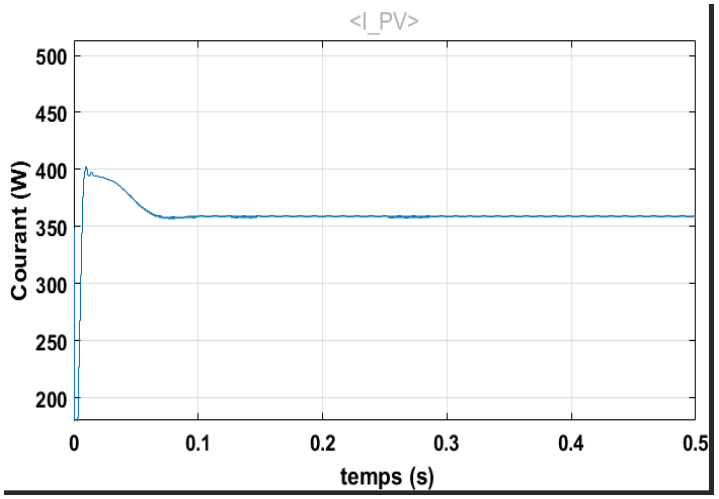


Figure II.36: Courbe I(t) à entrer du système (E=1000W/m² T=-50°).

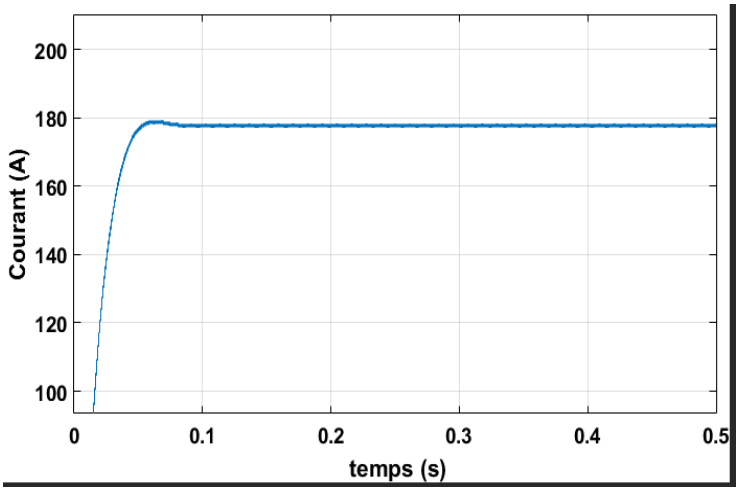


Figure II.37: Courbe i(t) à sortir du système (E=1000W/m² T=-50°).

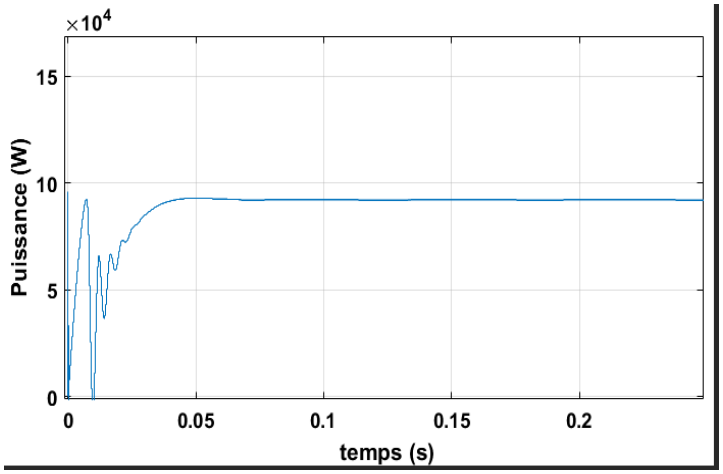


Figure II.38: Courbe P(t) à entrer du système (E=1000W/m² T=-50°).

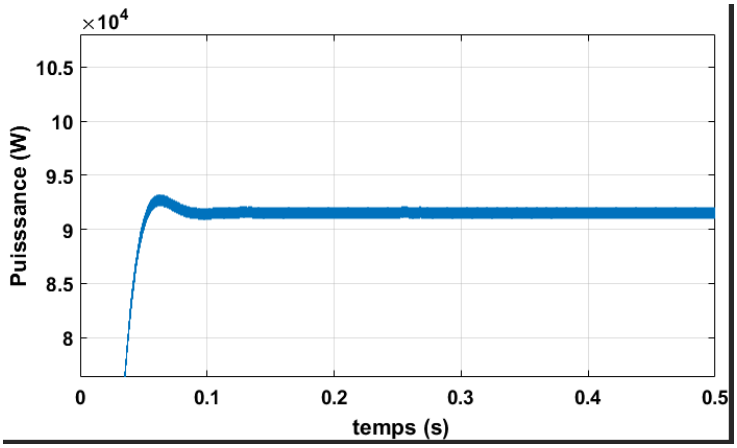


Figure II.39: Courbe P(t) à sortir du système (E=1000W/m² T=-50°).

II-5-2-4 Le rapport cyclique :

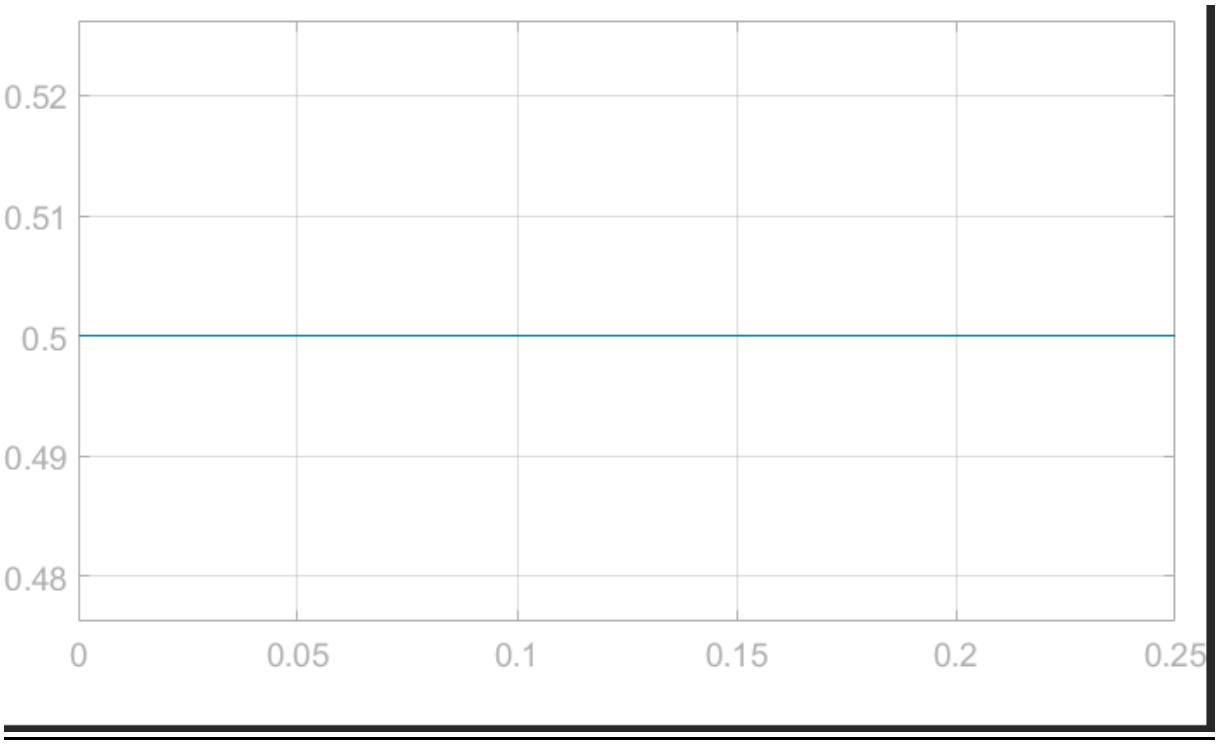


Figure II.40 : Courbes de rapport cyclique (D)

II-5-3 Analyse des résultats de la commande IC :

À partir des résultats obtenus, on remarque que la commande IC a permis de retrouver le point de puissance maximale du générateur PV. Avec la présence de la commande IC, on remarque que : la courbe de la puissance illustrée dans la Figure (14,15) atteint jusqu'à 100 KW à sortie du générateur PV et 100 KW à sortir d'hacheur avec de grandes oscillations. À partir des courbes présentées pour les différents cas de simulation, le hacheur Boost fournit une tension de sortie Vs supérieure à celle du générateur photovoltaïque. Donc l'hacheur Boost effectue correctement son rôle Dans le cas du fonctionnement avec l'éclairement variable, on note que la MPPT a un rendement très important dans le but de poursuivre le PPM.

II-5-4 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons décrit les différents points de fonctionnement du panneau PV notamment le point à puissance maximale, ensuite nous avons présenté la technique de la poursuite du point maximal. Ainsi nous avons rappelé le principe de l'algorithme MPPT conductance Incrémentale. Enfin, on a obtenu les résultats de l'implémentation de cette algorithme dans Matlab Simulink

Chapitre III :

Raccordement du système photovoltaïque Au réseau

III-1 Introduction

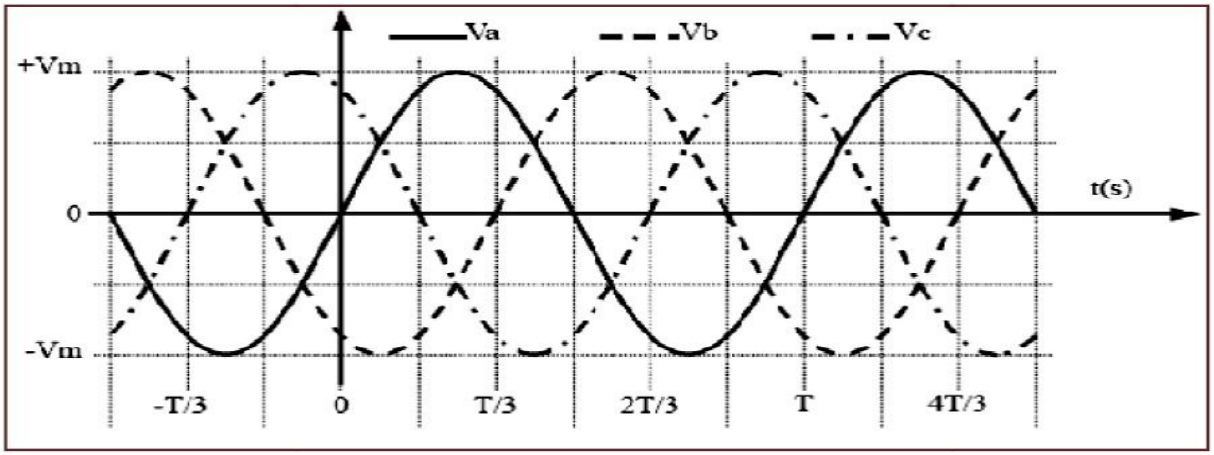
Ce chapitre décrit le système photovoltaïque solaire connecté au réseau utilisant un convertisseur élévateur DC-DC et l'onduleur DC/AC (VSC) pour fournir de l'énergie électrique au réseau électrique. Le modèle contient une représentation des principaux composants du système qui sont : un générateur solaire de 100 KW, un convertisseur élévateur et l'onduleur côté réseau. L'algorithme de point de puissance maximale intégré dans un convertisseur DC/DC est utilisé pour suivre la puissance maximale de la cellule PV et le suivi du point de puissance maximale (MPPT) est implémenté dans le convertisseur boost. Enfin, l'onduleur DC/AC (VSC) de trois niveaux et une unité de contrôle de courant fournissent une tension alternative qui répond aux exigences du réseau pour la connexion et la synchronisation. Les résultats de la simulation montrent comment un changement de rayonnement solaire peut affecter la puissance de sortie de tout système PV, ils montrent également les performances de contrôle et le comportement dynamique du système photovoltaïque connecté au réseau.

III -2 Le réseau transport THT

C'est généralement le réseau qui permet le transport de l'énergie depuis les centres éloignés de production vers les centres de consommation. C'est sur le réseau THT que sont en principe branchées les centrales de grandes puissances.

III-2-1 Modélisation du réseau électrique

Le réseau triphasé à trois grandeurs sinusoïdales de même fréquence, déphasées entre elles de $\frac{2\pi}{3}$ et ayant la même valeur efficace, forment ainsi un système triphasé équilibré. D'après la figure (4.14). On peut généralement considérer que (V_a, V_b, V_c) est un système de tensions triphasé équilibré direct. Il est de même pour (V_{ab}, V_{bc}, V_{ac}).



Modélisation du réseau électrique

On a :

$$V_a = V_m \sin(\omega t) \qquad \text{(III.1)}$$

$$V_b = V_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \qquad \text{(III.2)}$$

$$V_c = V_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \qquad \text{(III.3)}$$

Et un modèle de simulation est :

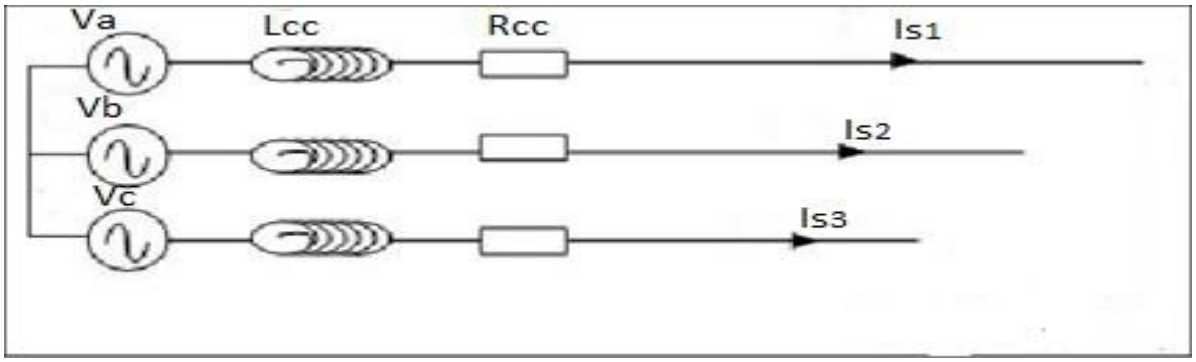


Figure III.1 : Modèle de simulation de réseau triphasé

III-2-2 Schéma de réseau de simulation :

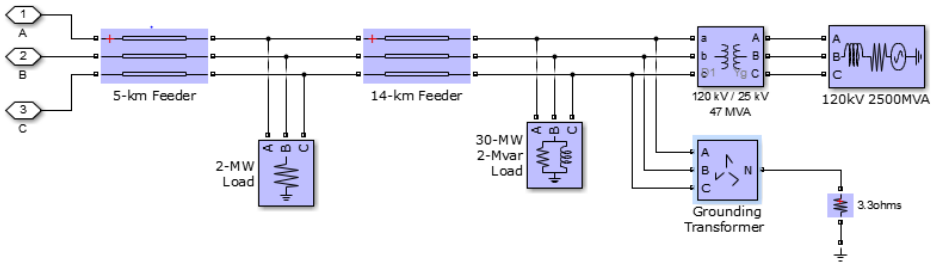


Figure III.2 : schéma de simulation

III-3 Algorithme dit du référentiel au synchronisme (SRF : synchro référence frame) d-q :

Concernant la méthode du référentiel lié au synchronisme, appelée aussi méthode d-q. Les courants de charge sont transformés dans le repéré référentiel lié au synchronisme afin d'extraire les composantes harmoniques Elle permet d'obtenir des meilleures performances même si la tension du réseau est perturbée ou déséquilibrée. [18]

Son principe est basé sur la transformée de Concordia appliquée aux courants de ligne ic1(t), ic2(t) et ic3(t) vers un système diphasé (d-q) [19]

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \qquad \text{(III.4)}$$

Ensuite nous allons transformer les courants du repère $\alpha\,\beta$ vers le repère dq en générant deux signaux cos(θ^) et sin(θ^)) obtenu grâce à l'utilisation d'une PLL (Phase Locked Loop). Ce qui nous donne l'expression suivante :

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\theta & -\cos\theta \\ \cos\theta & \sin\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \qquad \text{(III.5)}$$

Ainsi les courants fondamentaux dans les axes dq sont donnés par :

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{i_d} & \overline{i_d} \\ \overline{i_q} & \overline{i_q} \end{bmatrix} \qquad \text{(III.6)}$$

En appliquant ensuite la transformation inverse, nous obtenons les courants dans les axes $\alpha\beta$ qui auront pour expressions :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\theta & \cos\theta \\ \cos\theta & \sin\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \qquad \text{(III.7)}$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\theta & \cos\theta \\ \cos\theta & \sin\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{i_d} \\ \overline{i_q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sin\theta & \cos\theta \\ \cos\theta & \sin\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{i_d} \\ \overline{i_q} \end{bmatrix} \quad \text{(III.8)}$$

L'objectif est de compenser les harmoniques de courant et l'énergie réactive en même temps, l'équation (III.9) devient

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\bar{\theta} & \cos\bar{\theta} \\ \cos\bar{\theta} & \sin\bar{\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{i_d} \\ i_q \end{bmatrix} \quad \text{(III.9)}$$

Les courants de référence sont alors calculés à partir de la transformation inverse de Concordia, soit :

$$\begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sb} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{3}}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{-1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{-1}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad \text{(III.10)}$$

La figure 3.4 représente le schéma de principe de cette méthode.

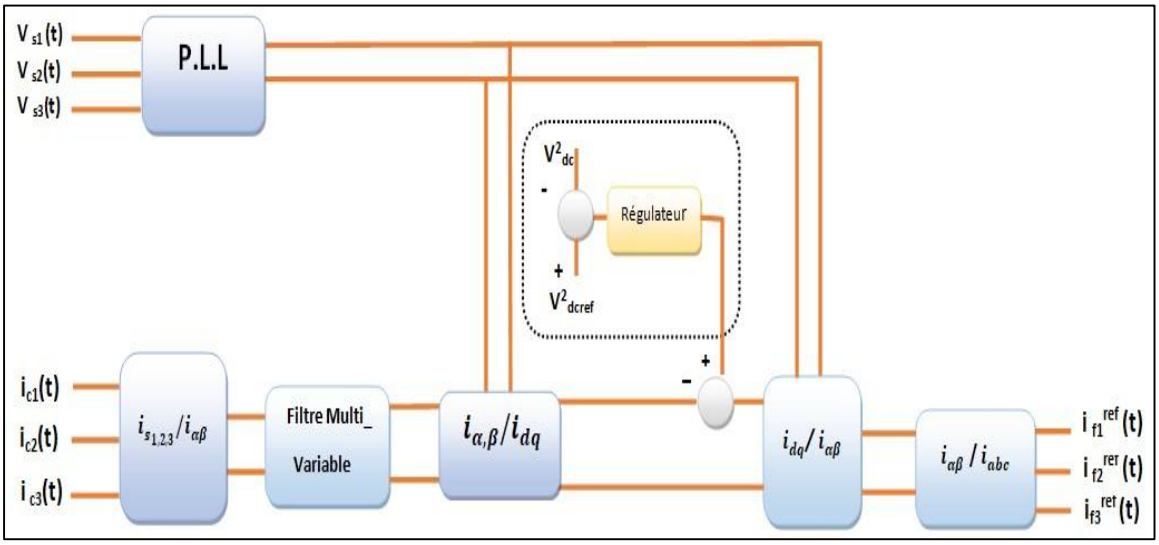


Figure III.13 : Commande du filtre actif pour la compensation des harmoniques de courant et l'énergie Réactive par la méthode des courants instantanés

III-4 Onduleurs PV :

Un onduleur, dit convertisseur DC/AC, est un dispositif électronique central dans le système PV connecté au réseau et qui permet de transformer la puissance continue générée par le module PV en puissance alternative pouvant être transmise au réseau électrique. Il est constitué d'une commande MPPT qui traque le point de fonctionnement optimal provenant des modules, d'un pont qui permet de transformer l'électricité continue en électricité alternative et d'un transformateur.

III-4-1 Les onduleurs (DC-AC) :

Un convertisseur continu-alternatif permet d'obtenir une tension alternative (éventuellement réglable en fréquence et en amplitude) à partir d'une source de tension continue.

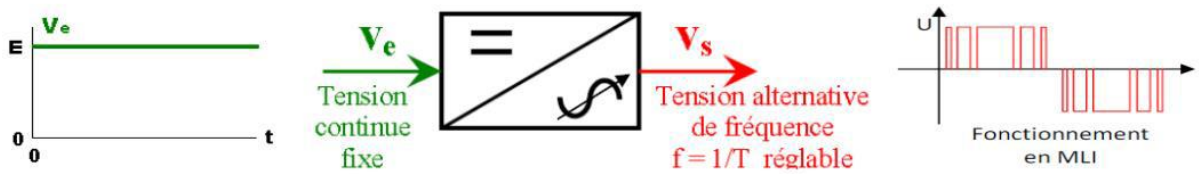


Figure III.3 : Principe de base de l'onduleur.

III-4-2 Onduleur de tension triphasé :

L'onduleur autonome de tension triphasé réalise une conversion réversible continu- alternatif, de type $(U) \leftrightarrow (\boldsymbol{V}', f')$, avec $U>0$. On se limite ici au montage en trois demi-points représentés à la Figure III.4 On verra l'intérêt de cette présentation pour la commande de l'onduleur en modulation de largeur d'impulsions.

Les sources de tension continuent et de courant alternatif sont parfaites :

• la tension U reste constante pour toute valeur positive ou négative, et toute évolution du courant Im(t).

• la valeur efficace $\boldsymbol{I}$ des courants i1(t), i2(t), i3(t) reste constante pour toute valeur et toute évolution de la tension V_m (t).

En fonctionnement normal, la source (U) est génératrice et les sources $i1(t)$, $i2(t)$, $i3(t)$ sont réceptrices. On désigne toujours par F_{ij} le signal de commande de l'interrupteur K_{ij}. On admet que les courants sont sinusoïdaux : [6]

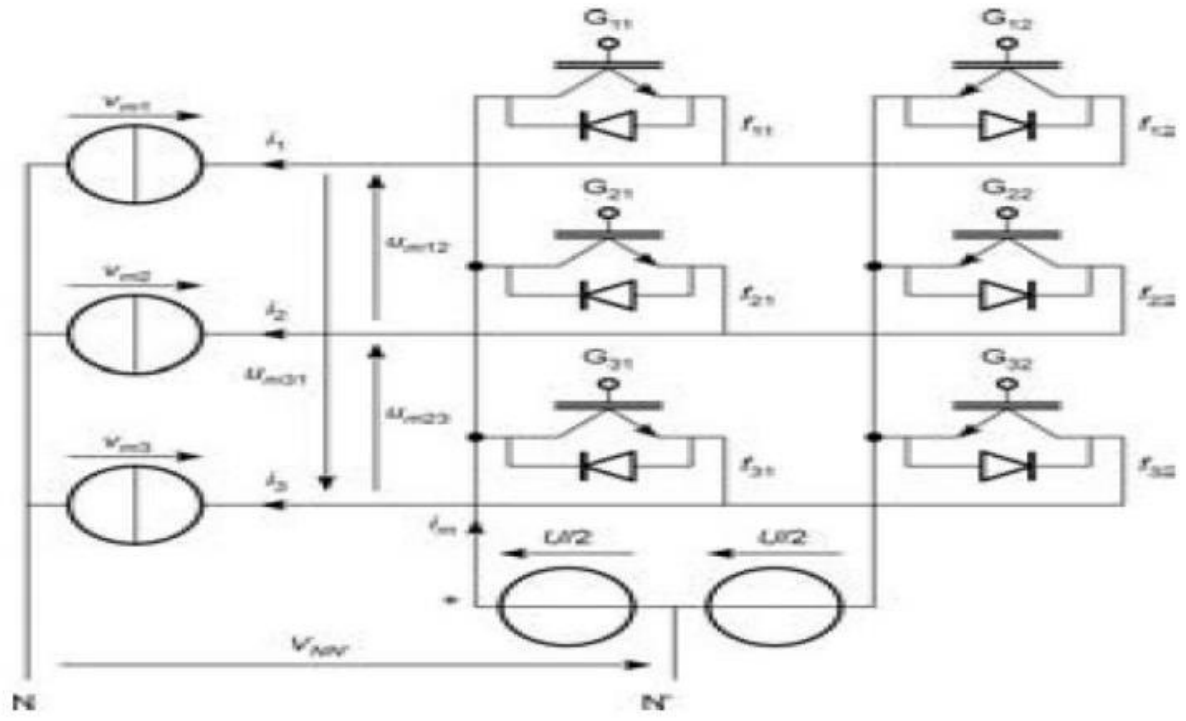


Figure III.4 : Montage de l'onduleur triphasé de tension en trois demi-points

III-4-3 MODELE DE L'ONDULEUR A TROIS NIVEAUX

La figure III.5 montre la structure d'un onduleur de tension triphasé à trois niveaux à structure NPC.

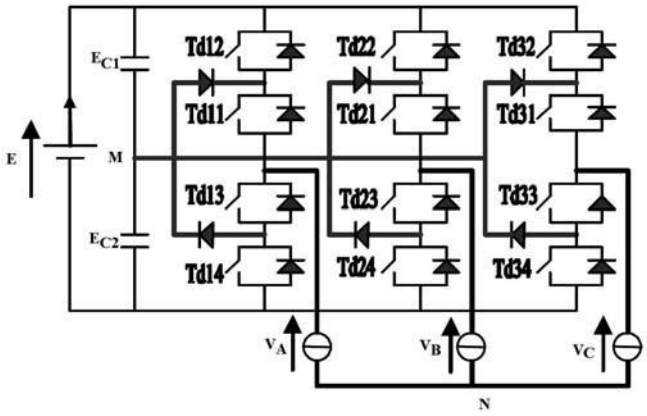


Figure III.5 : Onduleur à trois niveaux à structure NPC

On commence par définir la fonction de connexion Fki de l'interrupteur. Elle vaut 1 si l'interrupteur est fermé et 0 dans le cas contraire. En mode commandable, les fonctions de connexion de l'onduleur sont liées par la relation (1).

$$\begin{cases} fk1 = 1 - fk4 \\ fk2 = 1 - fk3 \end{cases} \quad \text{(III.11)}$$

Avec, k = 1, 2 ou 3, représente le numéro du bras.

On définit la fonction de connexion b F

Km du demi-bras comme suit :

$$\begin{cases} f_{k1}^{b} = f_{k1} \times f_{k2} \\ f_{k0}^{b} = f_{k3} \times f_{k4} \end{cases} \qquad \text{(III.12)}$$

On désigne par : m = 1 : le demi-bras du haut et m = 0 : le demi-bras du bas. Les potentiels des nœuds A, B et C de l'onduleur triphasé à trois niveaux, par rapport au point M s'expriment comme suit :

$$\begin{cases} v_{am} = f_{11}^{b} \times u_{c1} - f_{10}^{b} \times u_{c2} \\ v_{bm} = f_{21}^{b} \times u_{c1} - f_{20}^{b} \times u_{c2} \\ v_{cm} = f_{31}^{b} \times u_{c1} - f_{30}^{b} \times u_{c2} \end{cases} \qquad \text{(III.13)}$$

Les tensions simples de sortie s'écrivent :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \times \left[\begin{bmatrix} f_{11}^{b} \\ f_{21}^{b} \\ f_{31}^{b} \end{bmatrix} Uc1 - \begin{bmatrix} f_{10}^{b} \\ f_{30}^{b} \\ f_{30}^{b} \end{bmatrix} Uc2 \right] \qquad \text{(III.14)}$$

III-4-4 Stratégie de commande de l'onduleur triphasé

Les récents progrès technologique dans le domaine des dispositifs à semi-conducteur ont élargi le domaine d'application des techniques de modulation de largeur d'impulsion dans le contrôle de la tension de sortie des convertisseurs statique. An de générer une tension la plus sinusoïdale possible, déférentes stratégies de modulation de largeur d'impulsion ont été proposées. Elle consiste à adopter une fréquence de commutation supérieur à la fréquence des grandeurs de sortie et à former chaque alternance de la tension de sortie d'une succession de créneaux de largeur convenable. Dans la suite de travail nous allons présenter la stratégie de commande MLI (modulation de largeur d'impulsion) avec modulation triangulé-sinusoïdale [23]

III-4-5 La stratégie de commande MLI

Cette technique consiste à comparer un signal de référence (modulante) à un signal porteuse. Le signal de référence représente l'image de la sinusoïde qu'on désiré à la sortie de l'onduleur ce signal est module en amplitude et en fréquence. Quant à la porteuse, elle dénit la cadence de la commutation

des interrupteurs statiques de l'onduleur, c'est un signal de haute fréquence . La Figure (III.6) illustre le principe de la modulation de largeur d'impulsion.

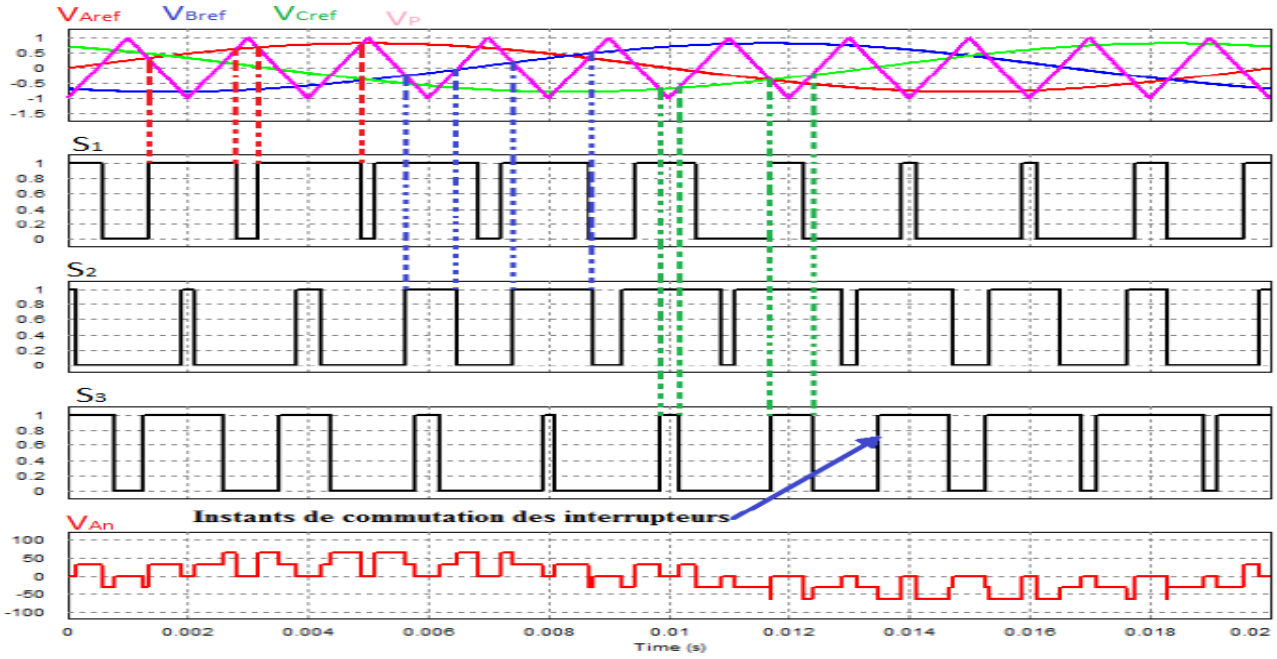


Figure III.6: modulation d'un signal de commande MLI

III-4-6 Caractéristiques de la modulation

La technique de la MLI se caractérise par deux grandeurs :
Le coefficient de réglage **:** qui est défini comme étant le rapport de l'amplitude de l'onde modulante à celle de l'onde porteuse. Il permet de déterminer l'amplitude du fondamental de l'onde de modulation de largeur d'impulsion

$$Mr = \frac{Vm}{Vd} \qquad (III.15)$$

L'indice de modulation : Il est défini comme étant le rapport de la fréquence de l'ondeporteuse à celle de l'onde modulante :

$$Mi = \frac{Fp}{f} \qquad (III.16)$$

III-3-7 Onduleurs centralisés (central invertir)

Un onduleur centralisé de forte puissance transforme l'ensemble du courant continu produit par un champ de cellules solaires en courant alternatif. Le champ de cellules solaires est en règle générale constitué de plusieurs rangées connectées en parallèle. Chaque rangée est elle-même constituée de

plusieurs modules solaires connectés en série. Pour éviter les pertes dans les câbles et obtenir un rendement élevé, on connecte le plus possible de modules en série.

III-4-8 COMMANDE PAR MODULATION DE LARGEUR D'IMPULSION

La modulation de largeur d'impulsion (en anglo-saxon pulse with modulation) consiste à adapter une fréquence de commutation supérieure à la fréquence des grandeurs de sortie et à former chaque alternance d'une tension de sortie d'une succession de créneaux de largeurs convenables. Cette technique peut être considéré comme une extension du principe de la commande par découpage ou la durée des impulsions n'est plus régulière mais choisie de façon à supprimer le maximum d'harmoniques de rangs faibles difficiles à filtrer.

III-4-9 Modélisation de l'onduleur avec unité de contrôle de courant

Une partie importante d'un système PV connecté au réseau est l'onduleur et son unité de contrôle pour la synchronisation du réseau. L'unité de contrôle comprend un contrôleur de boucle à verrouillage de phase (PLL), qui est utilisé pour la synchronisation du système PV avec le réseau. III.8 montre le sous-système Simulink de l'onduleur avec boucle de contrôle de courant pour la synchronisation du réseau. Il se compose d'un onduleur à trois niveaux composé de trois bras de dispositifs de commutation de puissance. Chaque bras se compose de quatre dispositifs de commutation avec leurs diodes antiparallèles et de deux diodes de serrage neutres. Le contrôleur de courant de l'onduleur se compose d'une PLL, d'un régulateur Vdc, d'un régulateur de courant, d'un générateur de référence et d'un générateur de modulation de largeur d'impulsion (PWM). Le régulateur Vdc mesure la tension continue et la compare à la tension de référence. L'unité de contrôle PLL convertit la tension et le courant du réseau du cadre de référence abc au cadre de référence dq en utilisant la transformation de Park. La tension du réseau est incontrôlable, le moyen le plus efficace de contrôler le fonctionnement du système est de contrôler le courant continu (Id) et le courant en quadratique (Iq) qui circulent vers le réseau, Comme la puissance active dépend du courant Id, pour injecter de la puissance réelle dans le réseau, Id doit être mis à zéro. Le régulateur de courant consiste en un régulateur intégré utilisé pour régler Id = 0, donc l'injection de puissance réactive dans le réseau est réglée sur zéro. La sortie du contrôleur de courant est introduite dans les impulsions de commutation via le générateur PWM pour générer les impulsions de grille de l'onduleur.

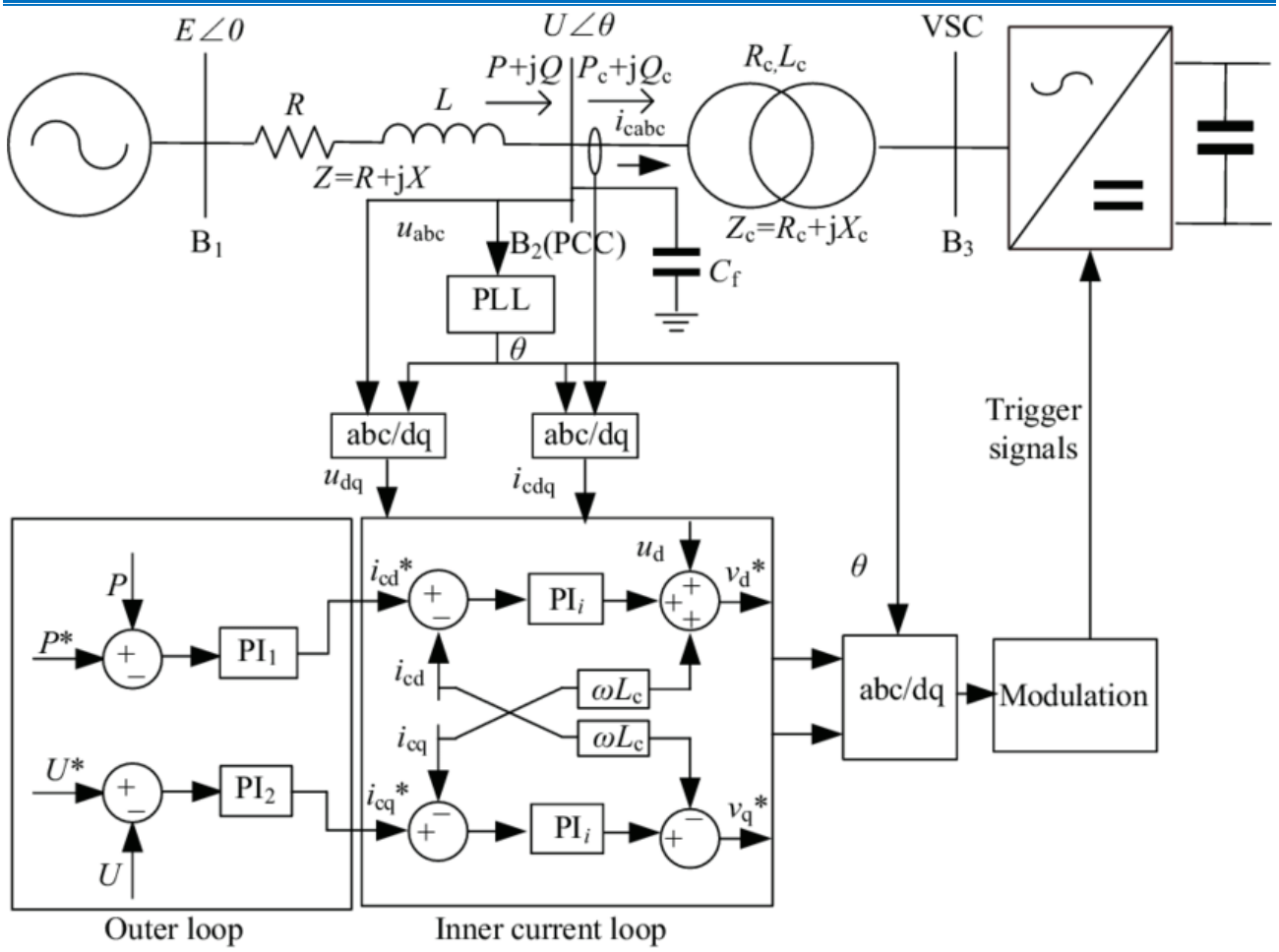


Figure III.7: Schéma de principe d'un VSC et de son système de contrôle.

III-4-10 Résultat de simulation de la commande de la tension de l'onduleur :

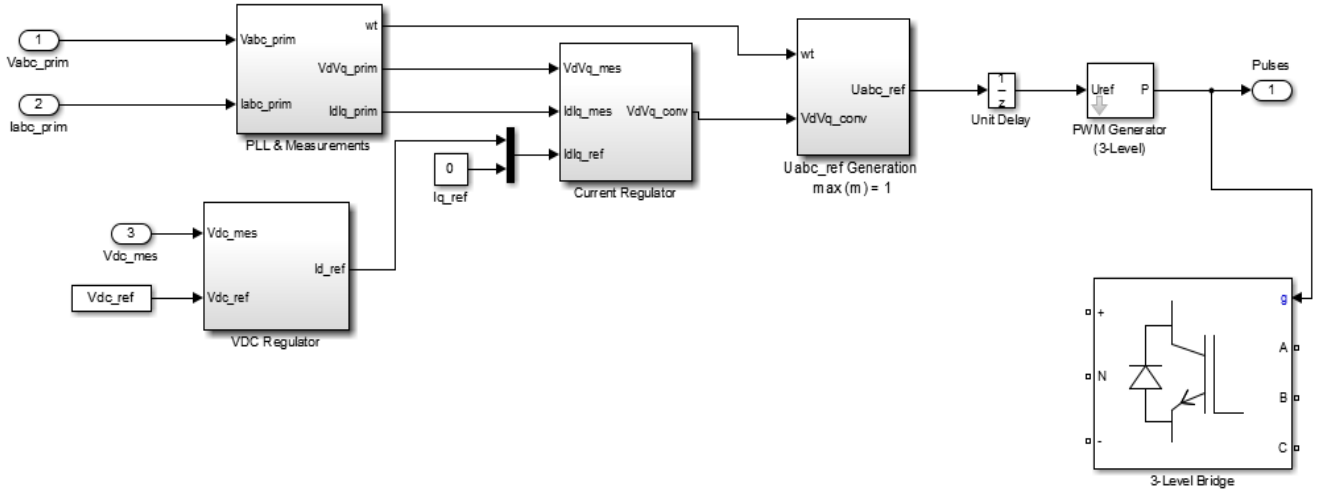


Figure III.8: Onduleur avec sous-système de contrôle de courant

Le système de contrôle VSC utilise deux boucle de contrôle, externe qui régule la tension de circuit intermédiaire à +/- 250(V) et une boucle de contrôle interne qui régule les courant de réseau Id et Iq (composant de courant active et réactive), la référence de courant Id est la sortie du contrôle externe de tension continue et le courant Iq est mise à zéro afin de maintenir le facteur de puissance unitaire.

La sortie de tension Vd et Vg du régulateur de courant sont convertis en trois signaux modulant Uabc générés par le générateur PWM. Le système de contrôle utilise un temps d'échantillonnage de 100(micro seconde) pour les contrôles de tension et de courant ainsi que pour l'unité de synchronisation PLL. Les générateur d'impulsion des convertisseur boost et VSC utilisant un temps d'échantillonnage rapide de 1(micro seconde) afin d'obtenir une résolution approprie des formes d'onde PWM.

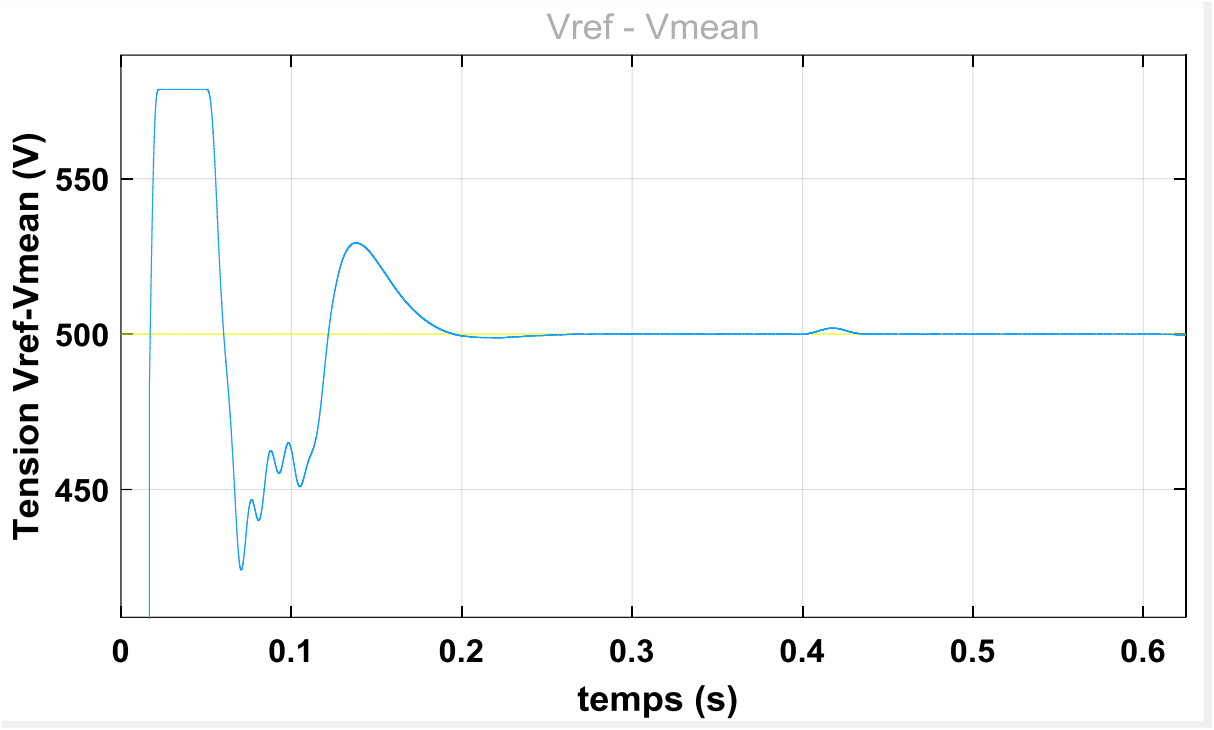


Figure III.9 : L'entrer d'onduleur

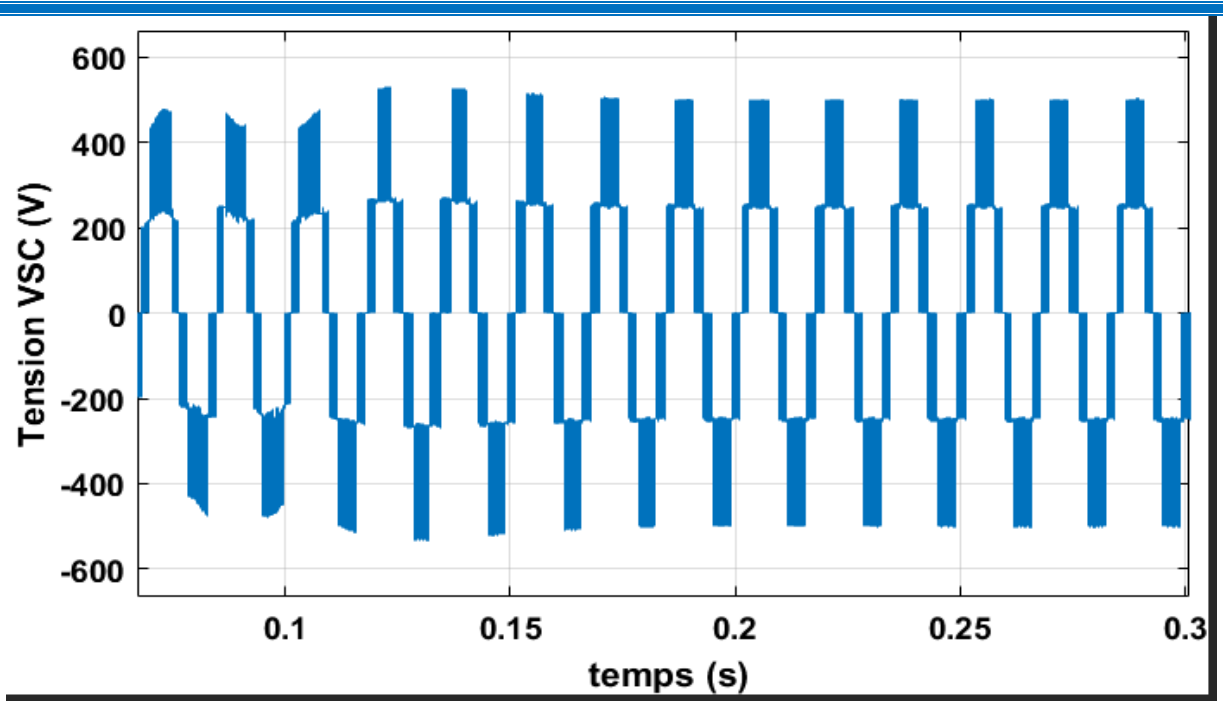


Figure III.10 : La sortie d'onduleur

III-5 Définition d'une harmonique

Un harmonique est défini comme étant une composante sinusoïdale d'un signal périodique, ayant une fréquence multiple de l'onde fondamentale. Le domaine des fréquences qui corresponde à l'étude des harmoniques est généralement compris entre 100 HZ et 2000 HZ (entre les harmoniques de rangs h=2 et h=40). Il peut exister dans la tension des réseaux des sous harmoniques [3]. L'amplitude de rang 1 est appelée la composante fondamentale du signal électrique périodique ; dans notre cas c'est la (50 HZ ou 60 HZ). L'harmonique d'ordre zéro correspond à la composante directe du signal, l'amplitude de chaque harmonique est inversement proportionnelle à son ordre. Les premiers rangs harmoniques ont des amplitudes élevées, d'où l'importance des courants injectés, raison pour laquelle il faut limiter ces données par : Ih= I1/h

h : harmonique d'ordre h

*I*1 : Amplitude du courant fondamentale

Ih : Amplitude de l'harmonique de rang (h)

III-5-1 Origine des harmoniques

L'apparition des équipements électriques utilisant des convertisseurs statiques a entraîné ces dernières années une augmentation sensible du niveau de pollution harmonique des réseaux électriques. Ces équipements électriques sont examinés comme des charges non linéaires distribuant des courants

harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale, ou parfois à des fréquences quelconques. Le passage de ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peut entraîner des tensions harmoniques aux points de raccordement et ainsi polluer les consommateurs alimentés par le même réseau électrique

III-5-2 Solutions aux perturbations harmoniques

Pour minimiser les perturbations en tension ou en courant, il est possible d'agir à deux niveaux : Du côté de la source en filtrant la tension du réseau ou en améliorant le réseau de transport et celui de distribution ; Du côté du client en rendant le courant de ligne le plus sinusoïdal possible. Deux groupes de solutions de dépollution pour compenser toutes les perturbations peuvent être distingués : les solutions traditionnelles et les solutions modernes.

III-6 Les filtres :

III-6-1 Les filtres R, L

Les courants qui transitent entre le convertisseur DC-AC et le réseau sont imposés par les bobines constituant le filtre R, L.

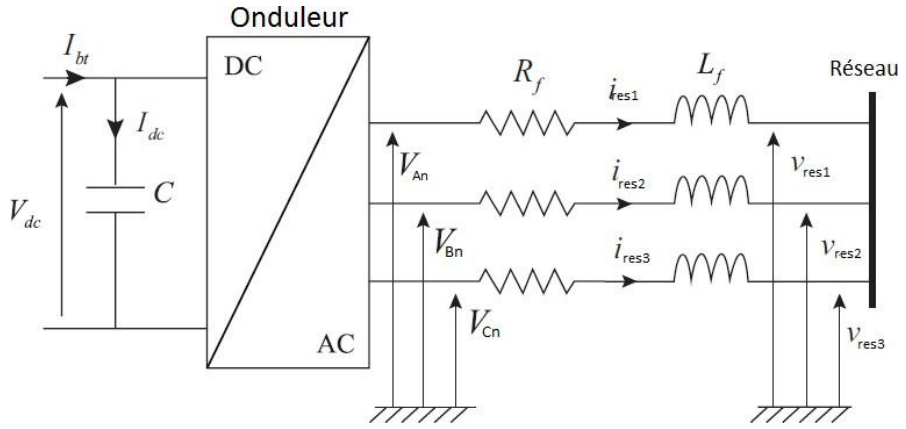


Figure III.11 : Système onduleur-filtres-réseau

En théorie, la puissance du côté réseau doit correspondre à la puissance du côté générateur photovoltaïque, cas du facteur de puissance unitaire

$$p_{res} = p_{pv} = 3 \times v_{res} \times i_{res} \qquad \text{(III.17)}$$

Où :

- $Vres$: la tension du côté réseau (V),

- $Ires$: le courant du côté réseau (A)

Dans notre cas la puissance de la du panneau est égale à 1.75 kW.

En considérant que le réseau est équilibré et sinusoïdal, et dont la valeur de la tension de phase côté réseau est égale à $Vres$ = 230V , le courant de phase nominale peut être calculé comme suit :

$$i_{res} = \frac{p_{res}}{3 \times v_{res}} \qquad \text{(III.18)}$$

En négligent la chute de tension dans les résistances et en considèrent l'ondulation $Ires$ = 0, 05$*Ires$ sur le courant côté réseau, l'inductance du filtre d'entrée de l'onduleur est donnée par [17] :

$$l = \frac{\sqrt{3} \times 230}{6 \times \sqrt{2} \times \Delta_{ires} \times f_s} \qquad \text{(III.19)}$$

fs Représente la fréquence de commutation de l'onduleur (fs est fixé à 10 KHz)

$$R = \frac{3V_{res}^2}{p_{res}} \qquad \text{(III.20)}$$

III-6-2 Modélisation filtre passif :

En appliquant la loi des mailles de Kirchhoff on obtient les équations de tension $VAn; VBn$ et VAn suivantes [17] :

$$\begin{cases} v_{an} = R_{fires1} + L_f \frac{d_{ires1}}{dt} + v_{res1} \\ v_{bn} = R_{fires2} + L_f \frac{d_{ires2}}{dt} + v_{res2} \\ v_{cn} = R_{fires2} + L_f \frac{d_{ires3}}{dt} + v_{res3} \end{cases} \qquad \text{(III.21)}$$

En appliquant la transformation de Park vers la référence synchrone, l'équation précédente devient :

$$\begin{cases} v_{cd} = R_{firesd} + L_f \frac{d_{iresd}}{dt} - wsL_{firesq} \\ v_{cq} = R_{firesq} + L_f \frac{d_{iresd}}{dt} + wsL_{firesq} \end{cases} \qquad \text{(III.22)}$$

Avec :

– Vcd, Vcq : les tensions modulées par le convertisseur dans le référentiel de Park,

– $Vresd, Vresq$: les tensions du réseau dans le référentiel de Park,

– $Iresd, Iresq$: les composante directe et quadratique des courants du filtre,

- ws : la fréquence du réseau.

III-6-3 Résultat de simulation

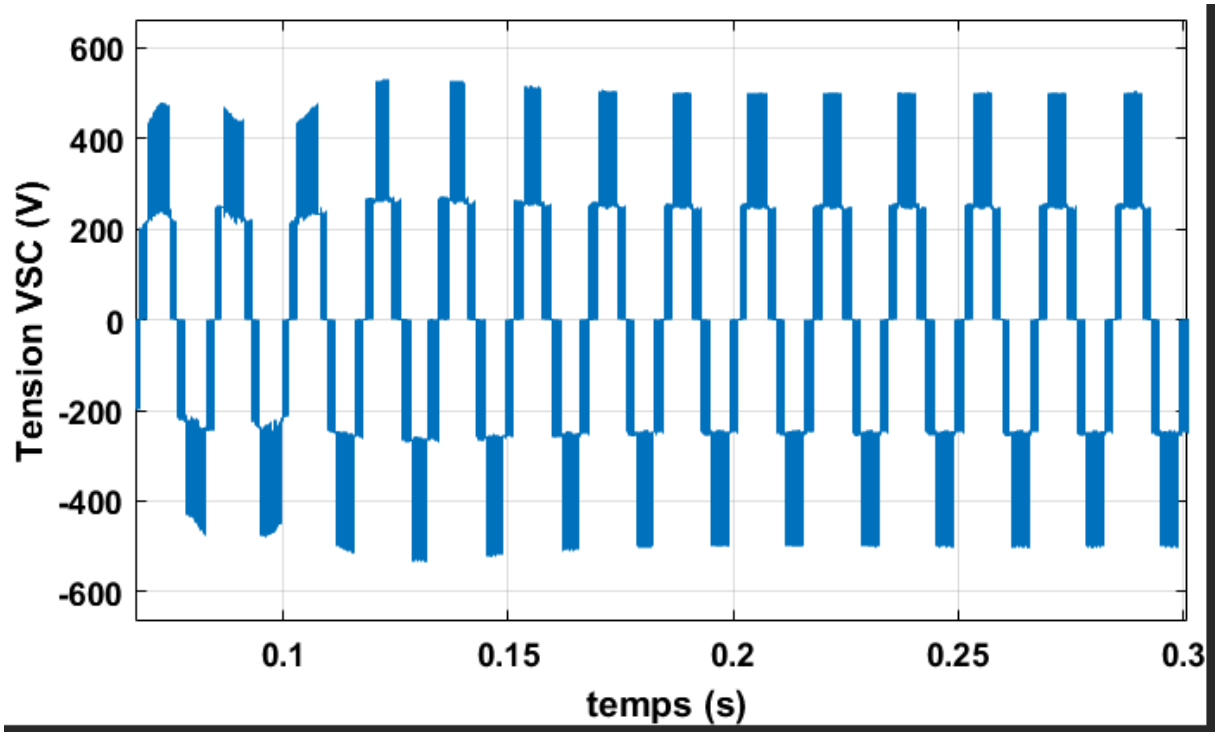


Figure III.12 : La sortie d'onduleur

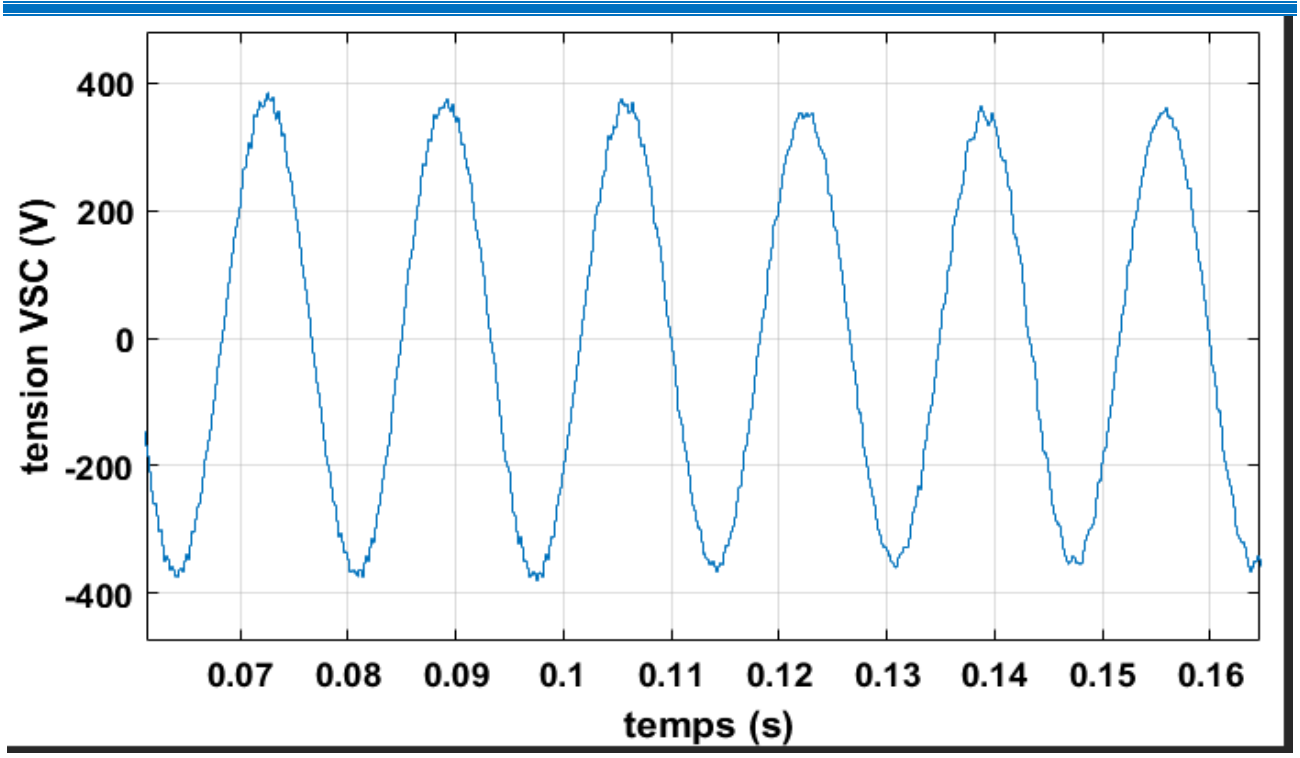


Figure III.13 : La tension après le filtrage

III-7 Résultat de simulation du système PV relie au réseau :

La figure III.14 montre le modèle de simulation d'un système PV à deux étages connecté au réseau. Ici, le générateur photovoltaïque délivre une puissance de sortie conforme aux conditions de test standard avec une température de module de 298 K (25 ºC) et l'irradiation de 1000 W/m2. Le convertisseur élévateur est utilisé pour augmenter la tension PV de 273,5 V à 500 V. Le rapport cyclique du convertisseur élévateur est contrôlé par le contrôleur MPPT. L'onduleur convertit 500V DC en tension AC. Pour compenser les harmoniques produites par l'onduleur, un condensateur de 10 kvar est utilisée. Un transformateur triphasé de 100 KVA est utilisé pour connecter le système solaire au réseau électrique de 25 kV.

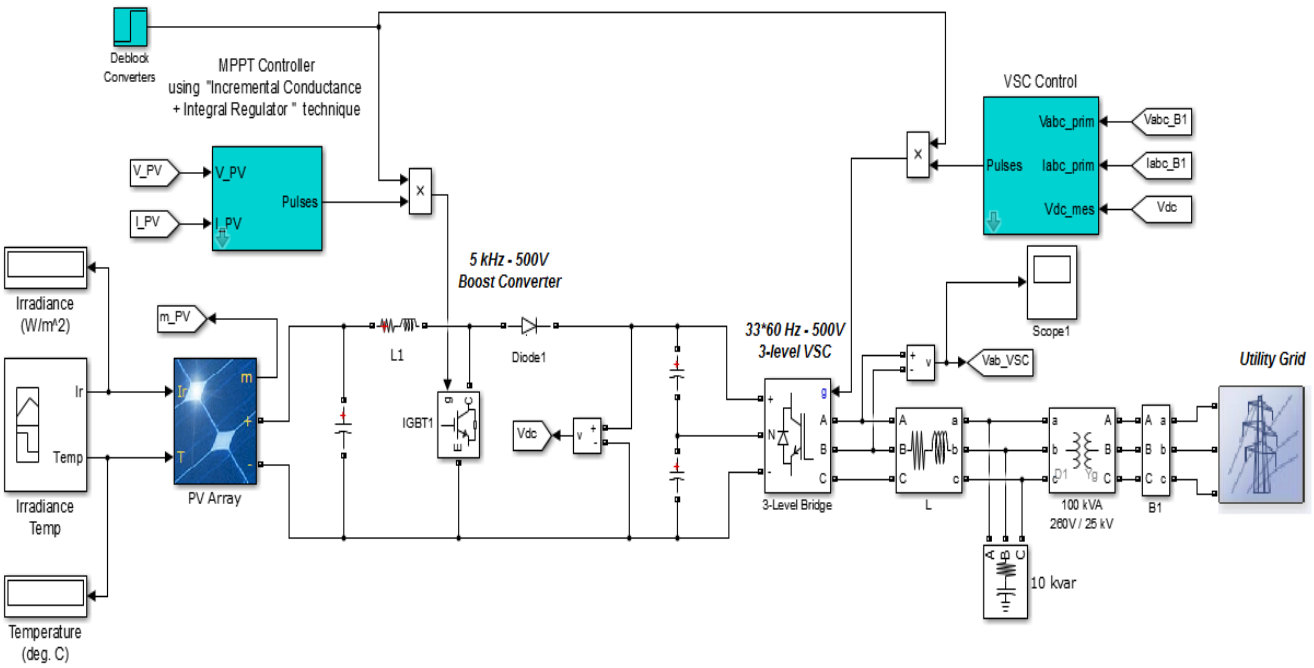


Figure III.14: Schéma globale d'un système photovoltaïque relie au réseau

La figure 15 montre l'évolution de la tension du bus continu. Après un régime transitoire, elle se stabilise sur sa valeur de référence. A la sortie de l'hacheur entrelacée, la tension est élevée à hauteur de 500(V). C'est la tension du bus continu qui alimente l'onduleur.

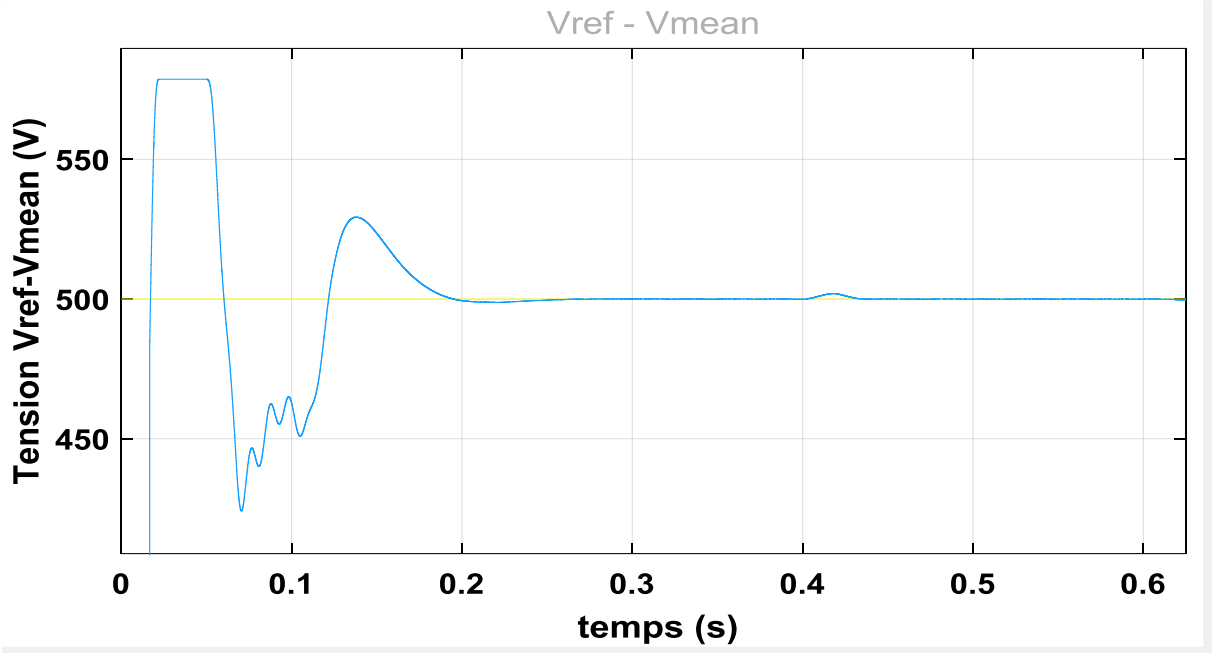


Figure III.15 : la tension de convertisseur boost

La figure 16 représente la puissance générée par le GPV

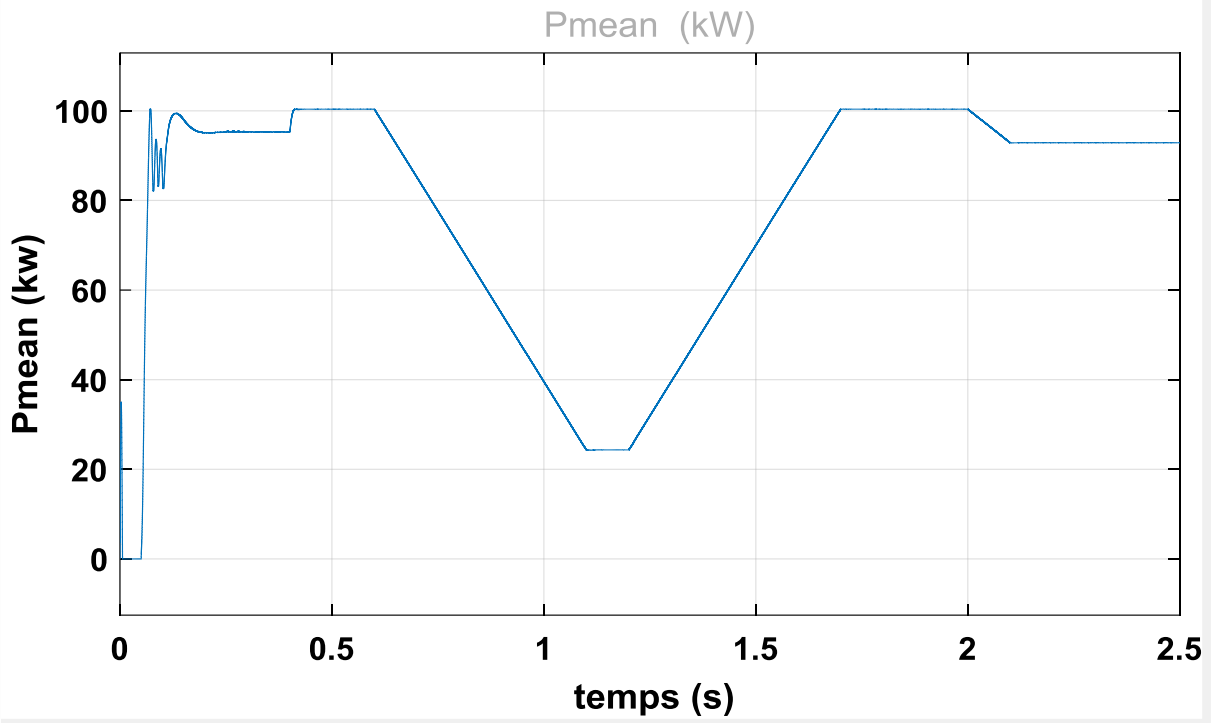


Figure III.16 : La puissance de générateur PV

L'algorithme MPPT (maximum power point tracking) régule cette puissance en la gardant au maximum de sa valeur à chaque variation de I et de V du panneau PV.

On peut noter dans cette figure la baisse des ondulations. C'est l'objectif de l'hacheur entrelacée. De même la transition entre le régime transitoire et le régime permanent est réduite.

La figure 17 représente la tension générée par le GPV :

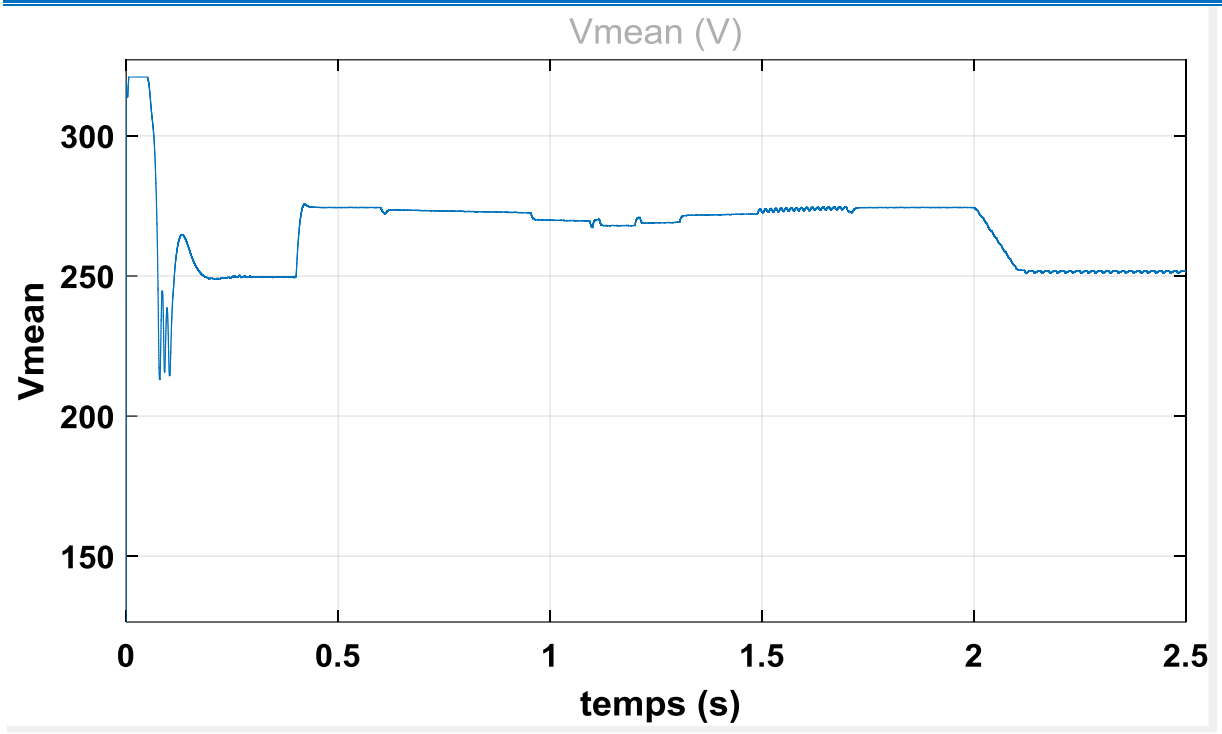


Figure III.17 : La tension de générateur PV

La figure 18 représente le rapport cyclique :

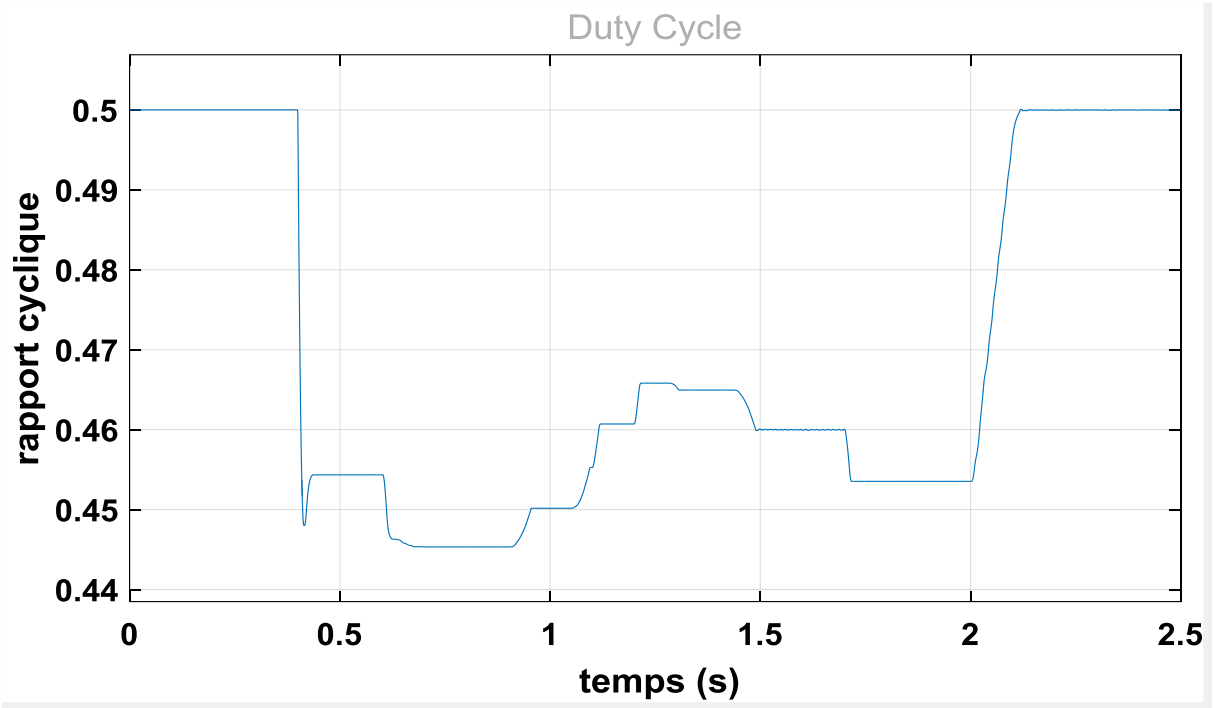


Figure III.18 : Le rapport cyclique

La figure 19 représente l'irradiation :

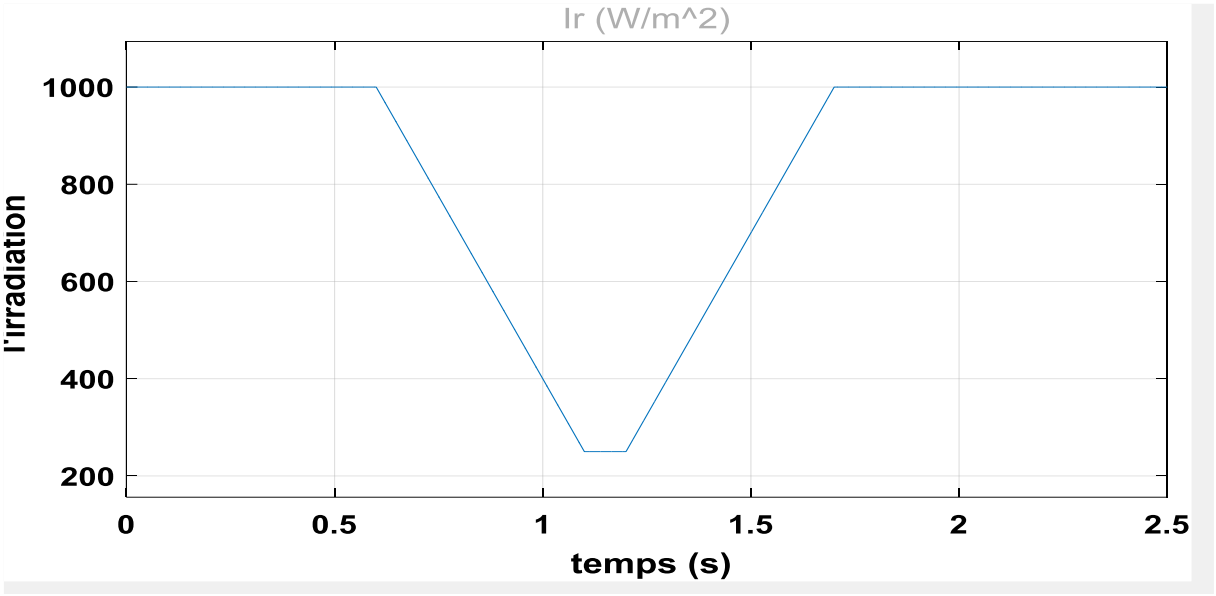


Figure III.19 : L'irradiation

La figure 20 représente la variation de température :

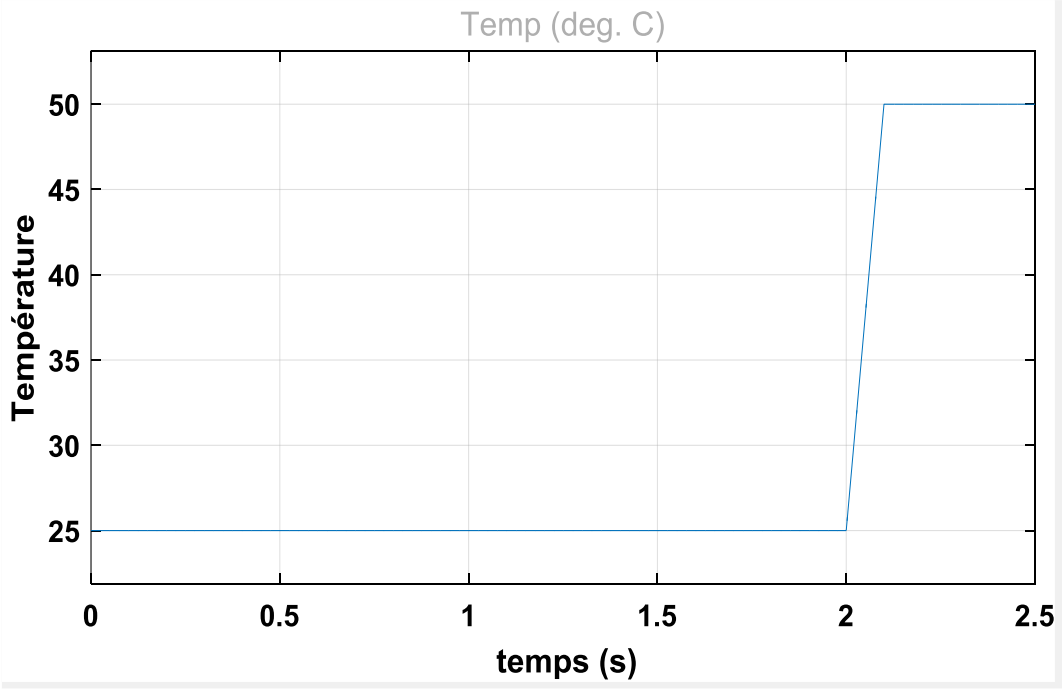


Figure III.20 : La variation de température

III-9 Les résultats et discussion de la simulation

De t=0(s) à t= 0.05(s), les impulsions vers les convertisseur Boost et VSC sont bloquées. C'est

La tension PV correspond à la tension en circuit ouvert (Nser*Voc= 5*64.2=321(V)).

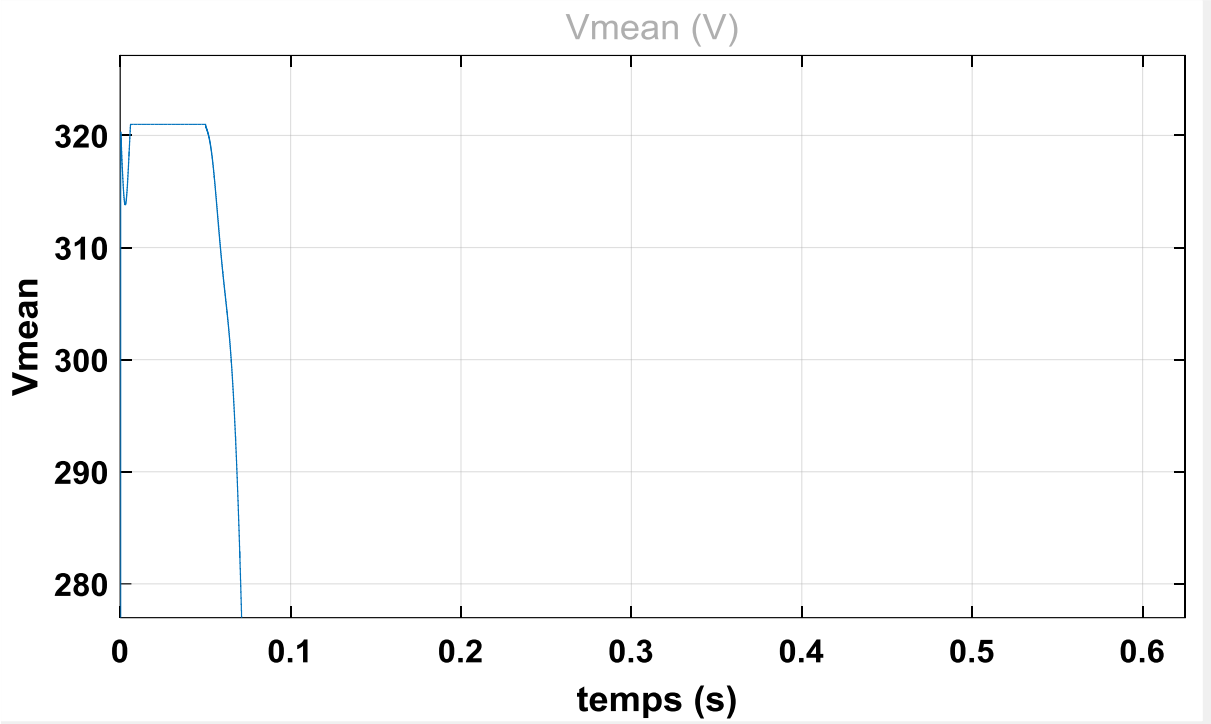


Figure III.21 : la tension du générateur PV après zoom

Le point à trois niveau fonctionne comme un redresseur à diode et les condensateurs de liaison CC sont changé au-dessus de 500V.

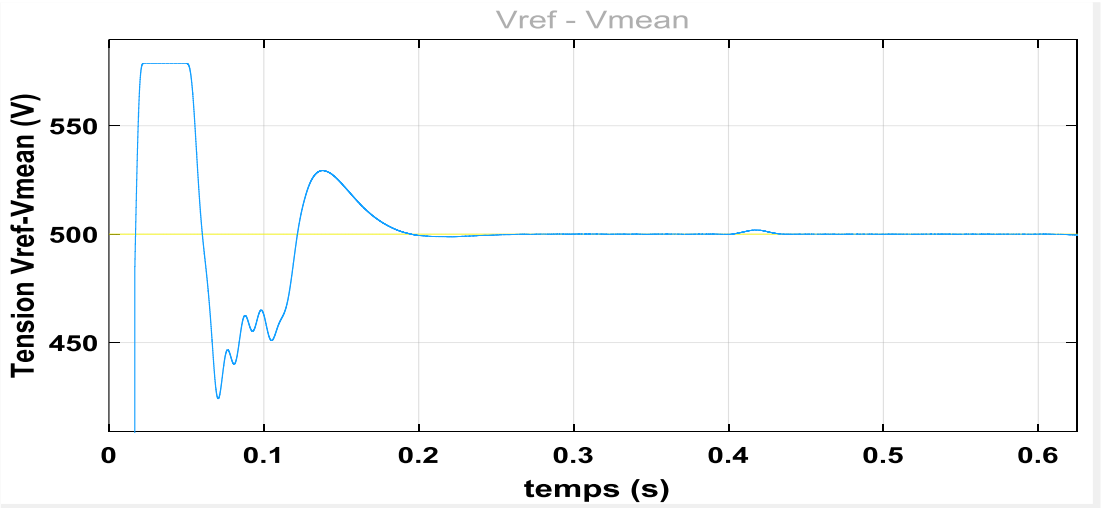


Figure III 22 : la tension de sortir du convertisseur boost

A t=0.05(s), les convertisseur boost et VSC sont débloqués. La tension de circuit intermédiaire est régulée à Vdc 500(V). Le rapport cyclique du convertisseur élévateur est fixé (D=0.5)

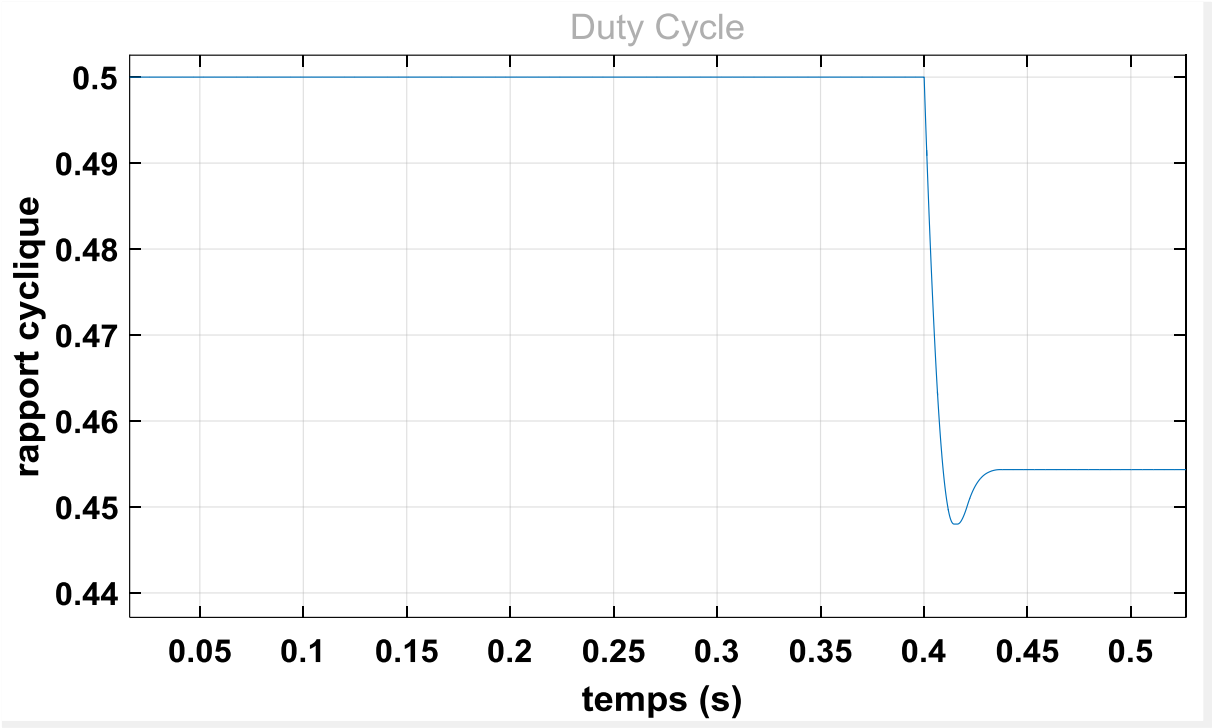


Figure III.23 : Le rapport cyclique après zoom

Le régime permanent est atteint à t=0.25(s) la tension PV résultant est donc VPV=(1-D) *VDC = (1-0.5) *(500) =250(V)

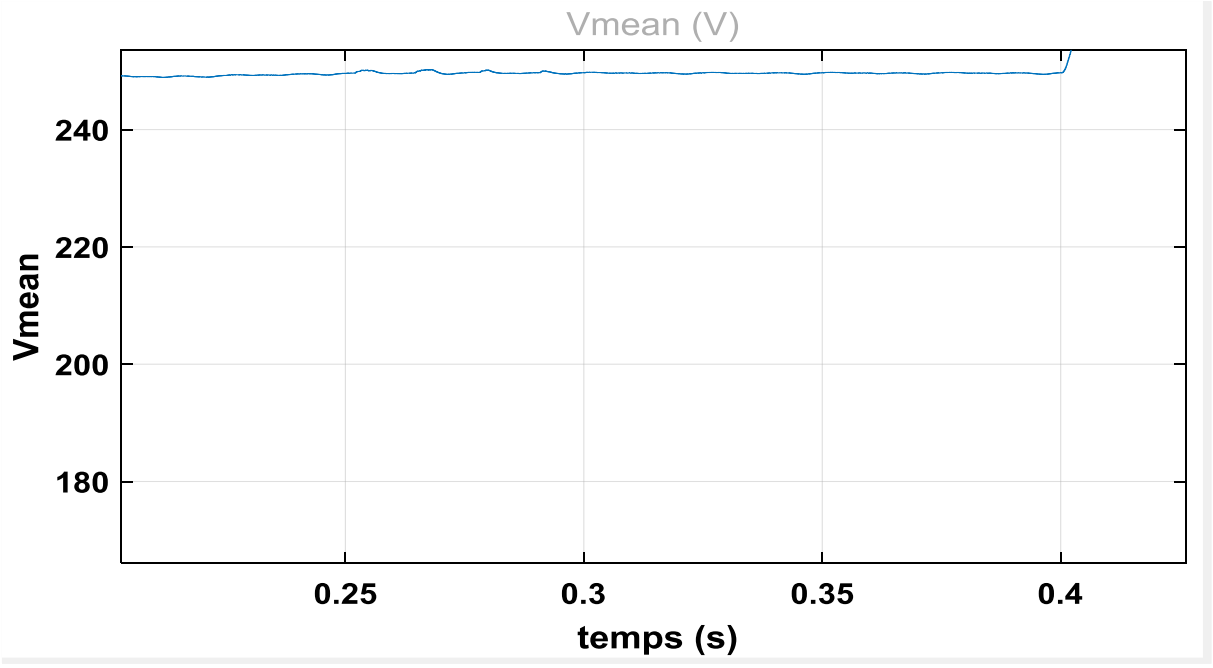


Figure III.24 : La tension de générateur après zoom

La puissance de sortie du générateur est de 96(KW) alors que la puissance maximale spécifiée avec un éclairement de 1000(w/m2) et de 100.7(KW) et le courant au bus 25(kV) sont en phase (facteur de puissance unitaire).

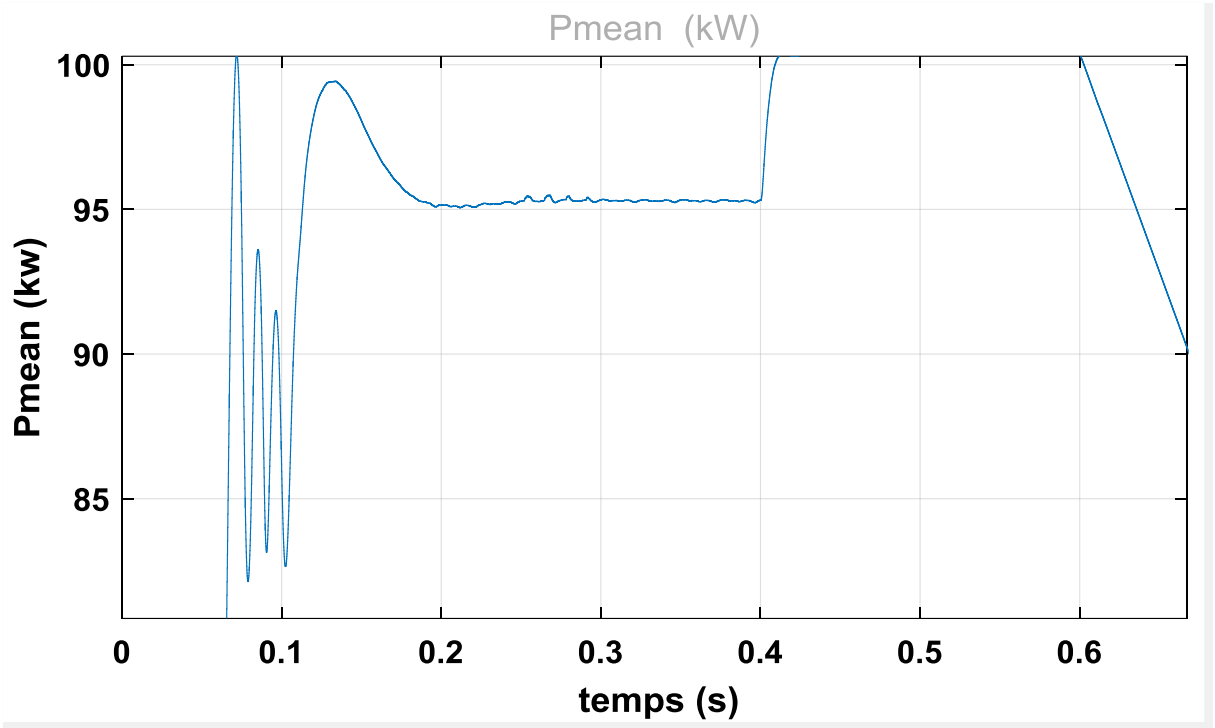


Figure III.25 : La puissance de générateur après zoom

A t=0.4(s), MPPT commence à réguler la tension PV en faisant varier le rapport cyclique afin d'extraire la puissance maximale. La puissance maximale est (100.4 KW) es obtenue lorsque le rapport cyclique est D=0.454.

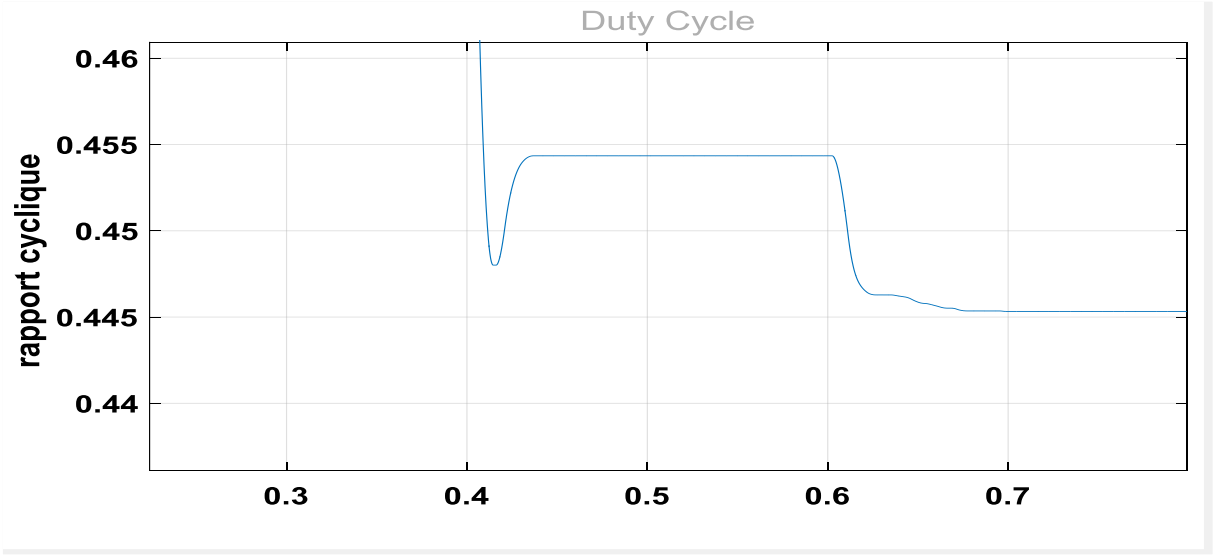


Figure III.26 : Le rapport cyclique après zoom

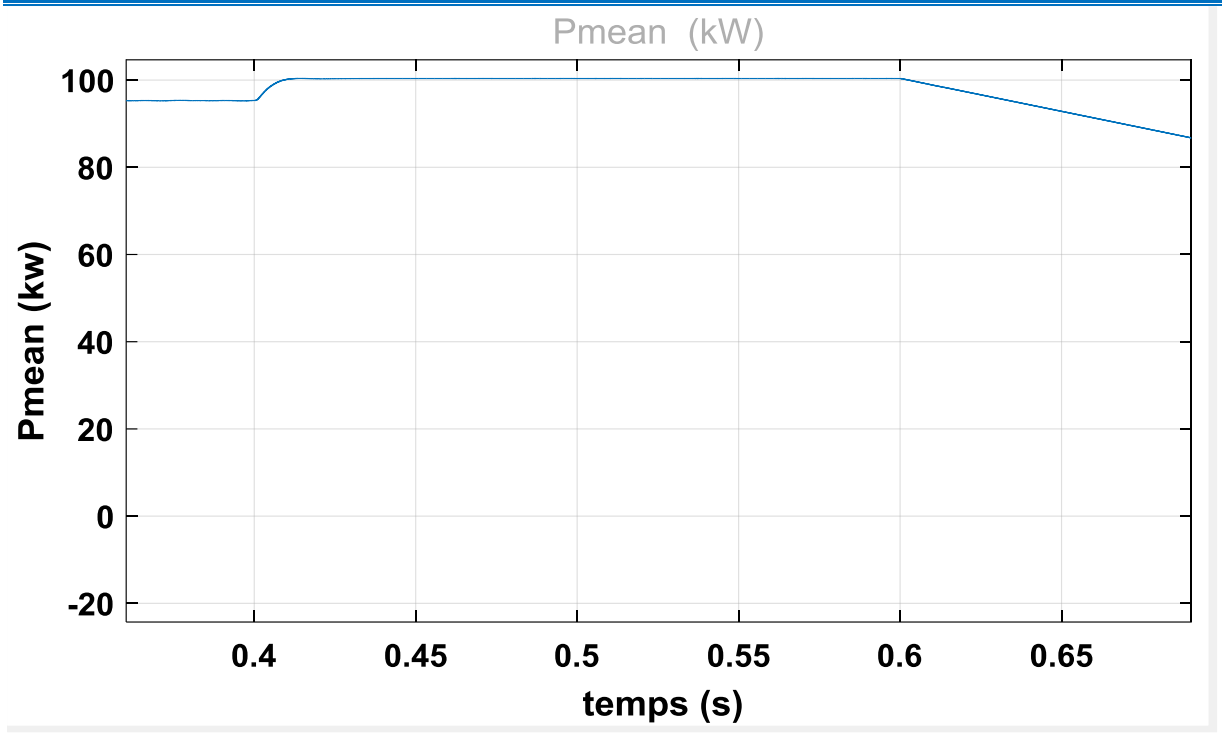


Figure III.27 : La puissance de générateur après zoom

A t=0.6(s) la tension moyenne du générateur PV=274(V) comme prévu à partir des caractéristiques spécifiques du module PV (Nser*Vmp=5*54.7=273.5(V)).

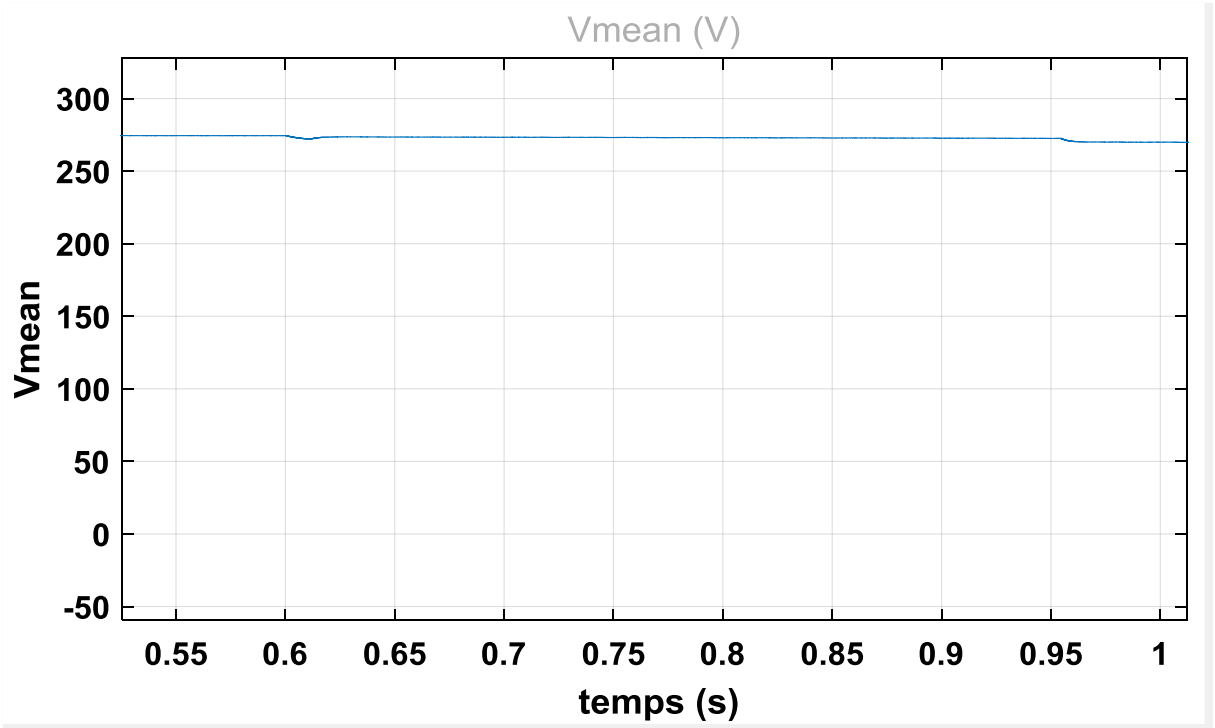


Figure III.28 : La tension de générateur après zoom

De t=0.6(s) à t=1.1(s) l'irradions solaire est réduite de (1000 à 250 w/m2) le MPPT continue de rechercher la puissance maximale.

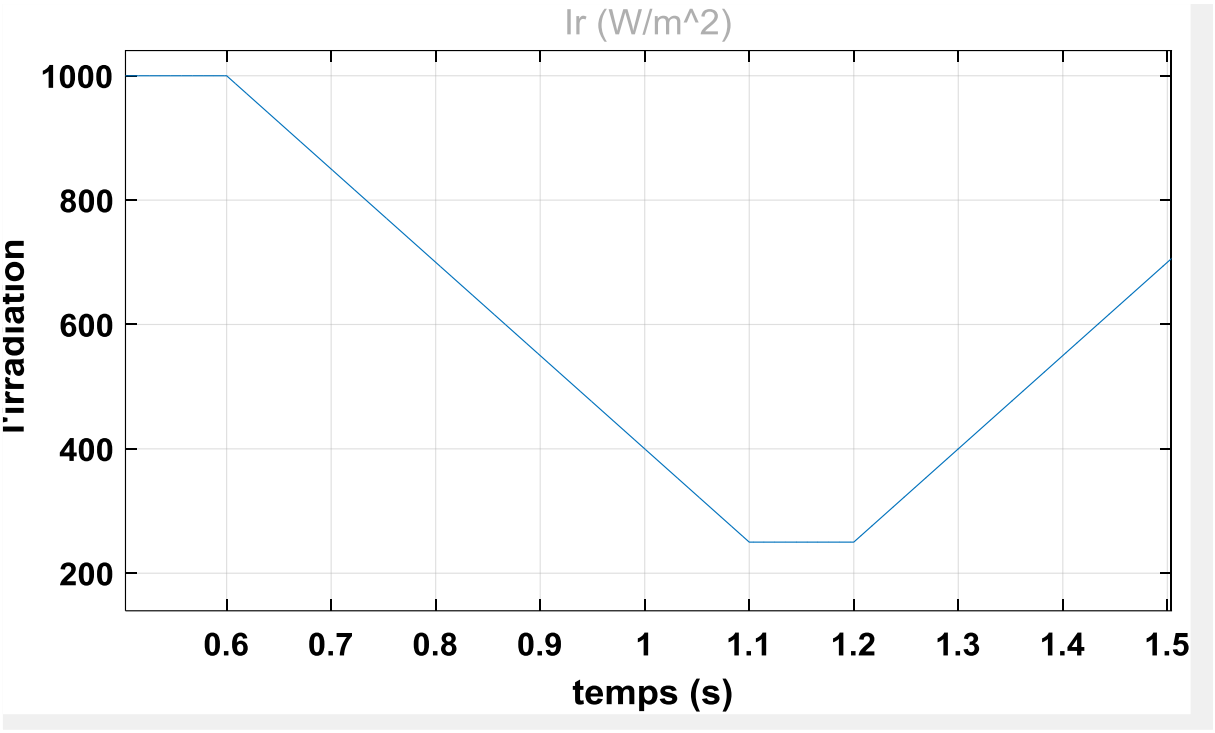


Figure III.29 : L'irradiation après zoom

A t=1.2(s) lorsque l'éclairement a diminué à 250w/m2, le rapport cyclique est D=0.461. La tension et puissance PV correspondant sont Vmean=268(V) et Pmean=24.3(KW)

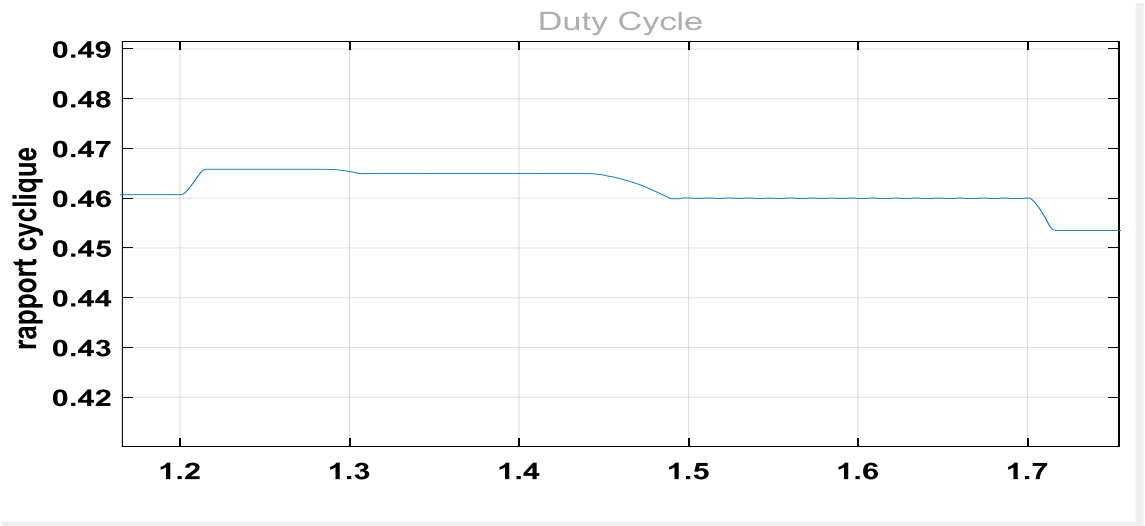


Figure III.30 : Le rapport cyclique après zoom

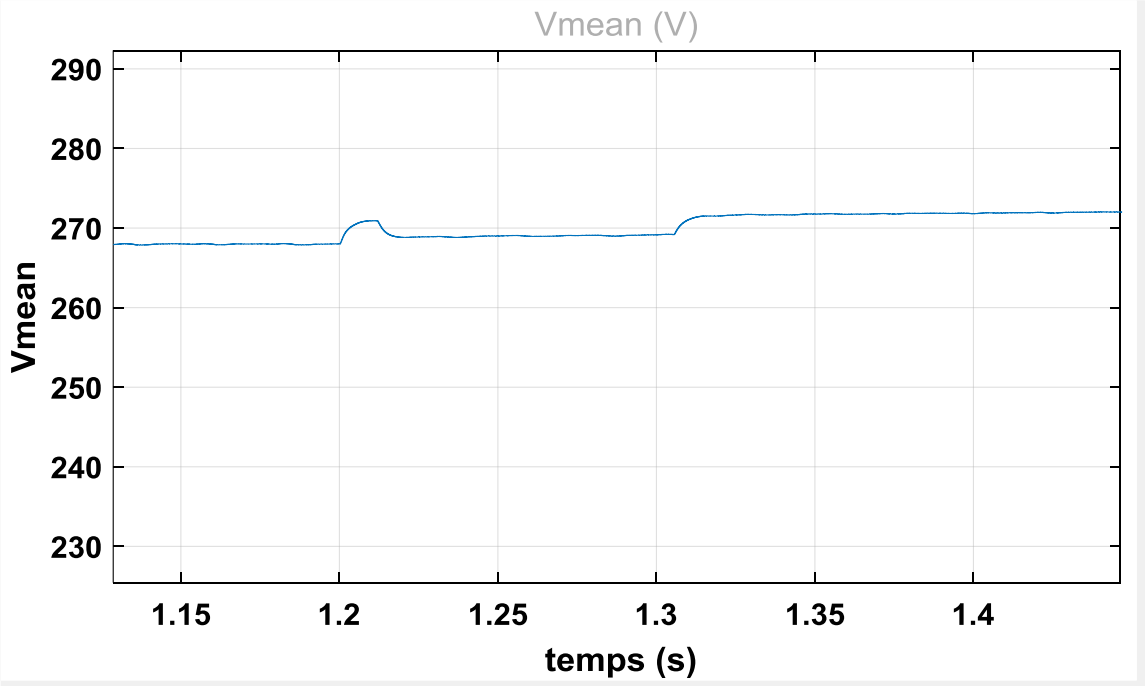


Figure III.31 : La tension de générateur après zoom

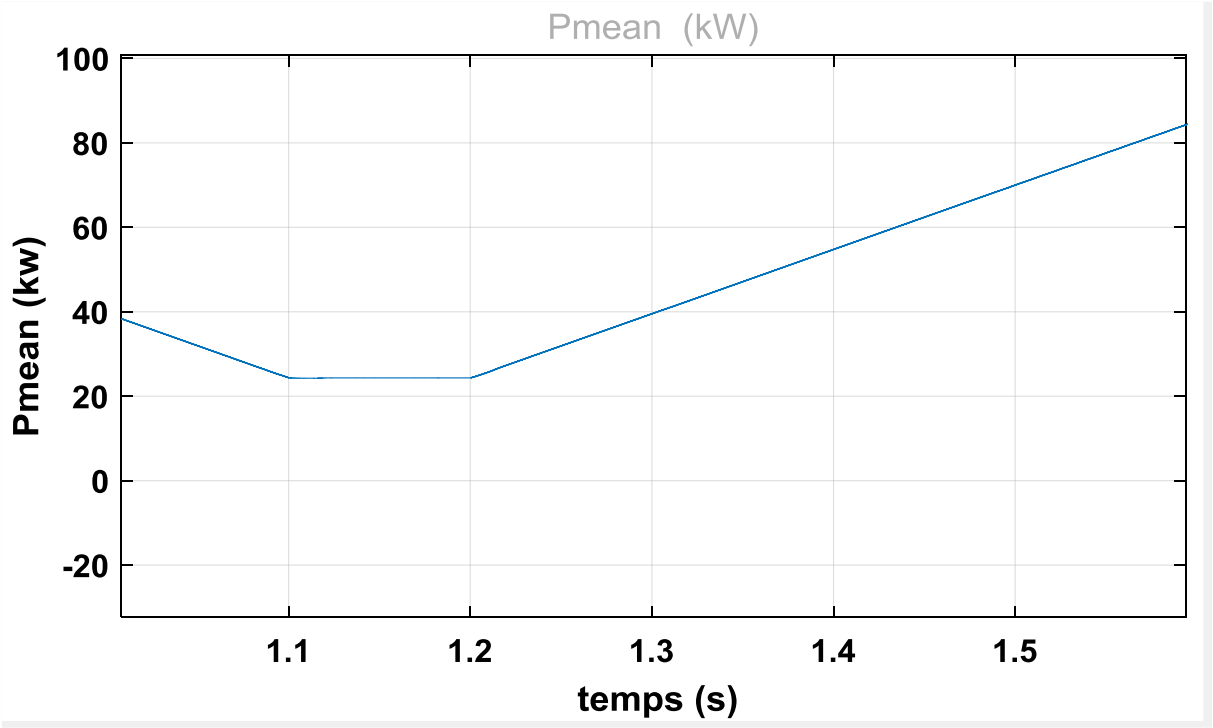


Figure III.32 : La puissance de générateur après zoom

De t=1.2(s) à 2.5(s) l 'irradiante solaire est rétablie à 1000(w/m2) puis la température est augmentée à 50 degrés afin d'observer l'impact de l'augmentation de la température. Notez que lorsque la température augmente de 25 à 50 (deg) c'est la puissance de sortie du générateur (PV) diminue de 100.7 à 93(KW).

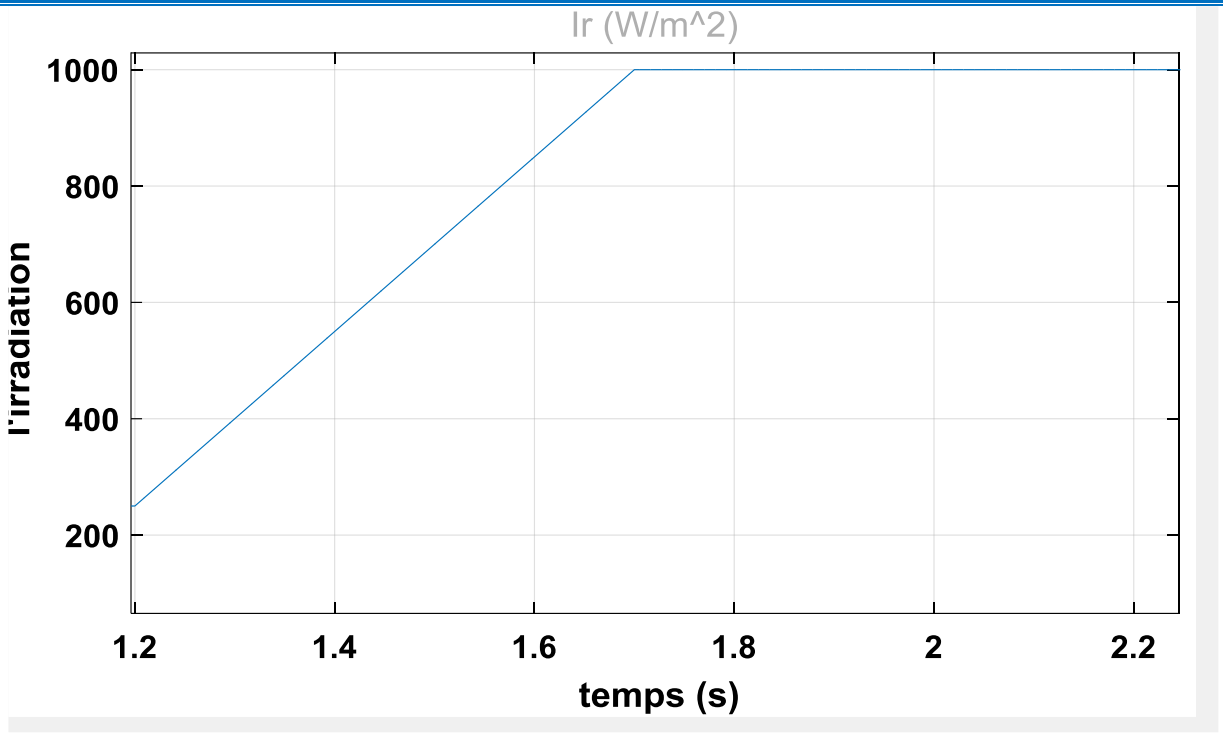


Figure III.33 : L'irradiation après zoom

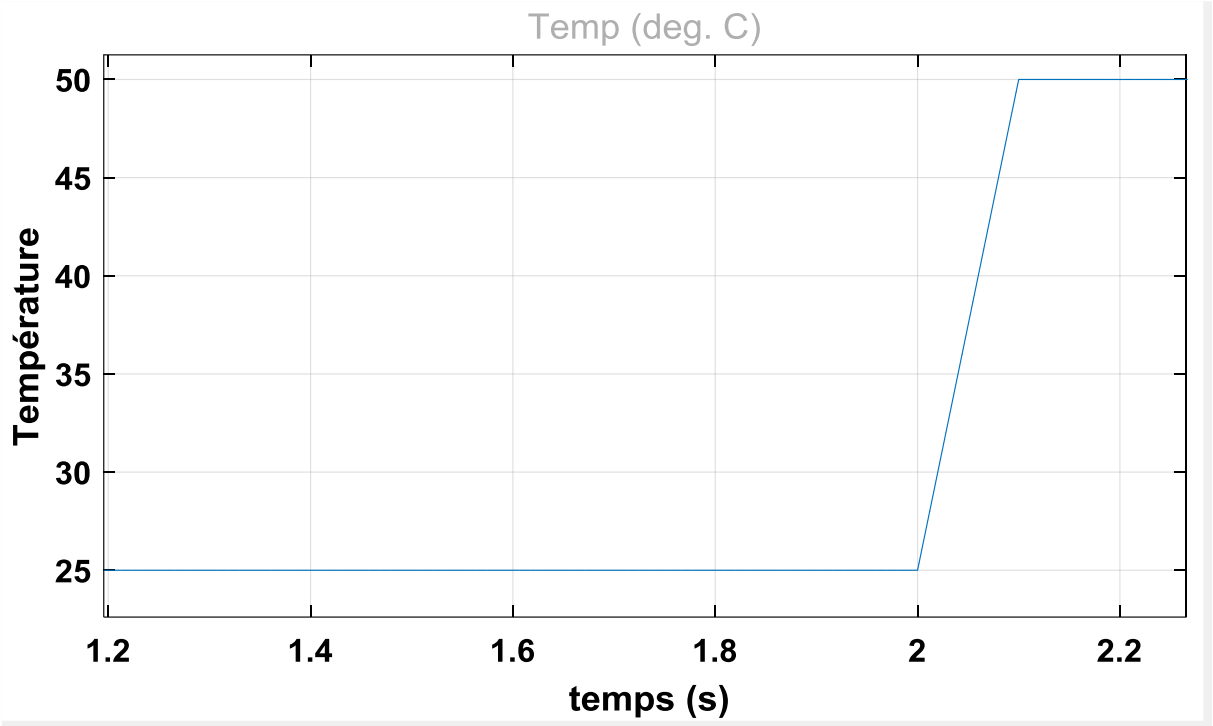


Figure III.34 : La variation de température après zoom

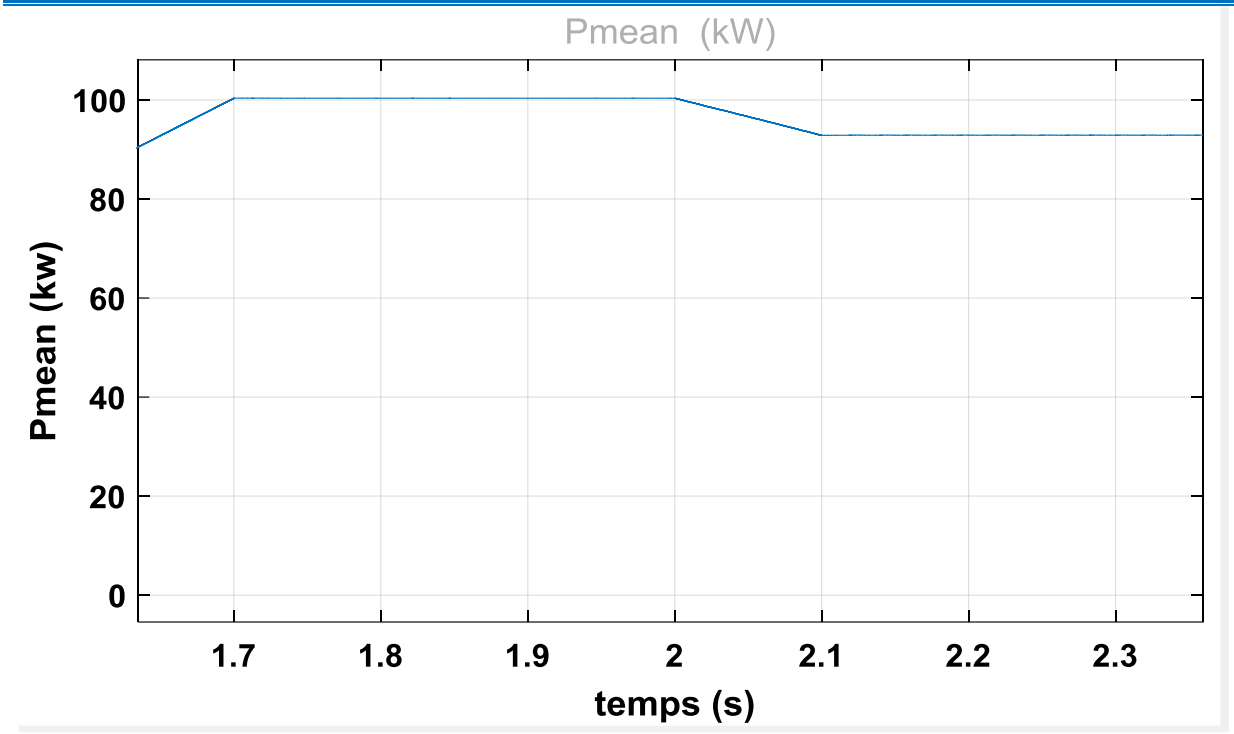


Figure III.35 : La puissance de générateur après zoom

La puissance injectée au réseau :

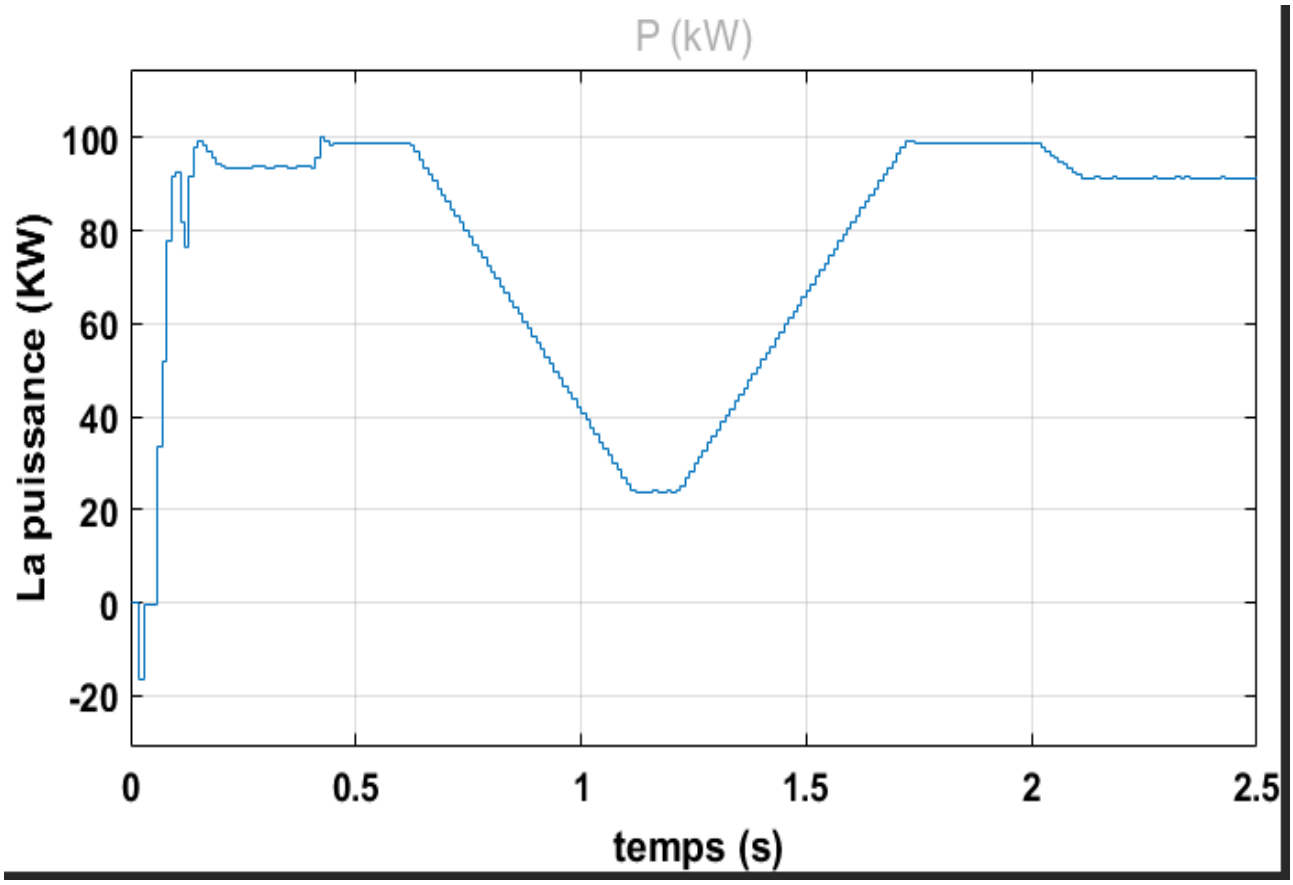


Figure III.36 : La puissance injectée au réseau

La tension injectée au réseau :

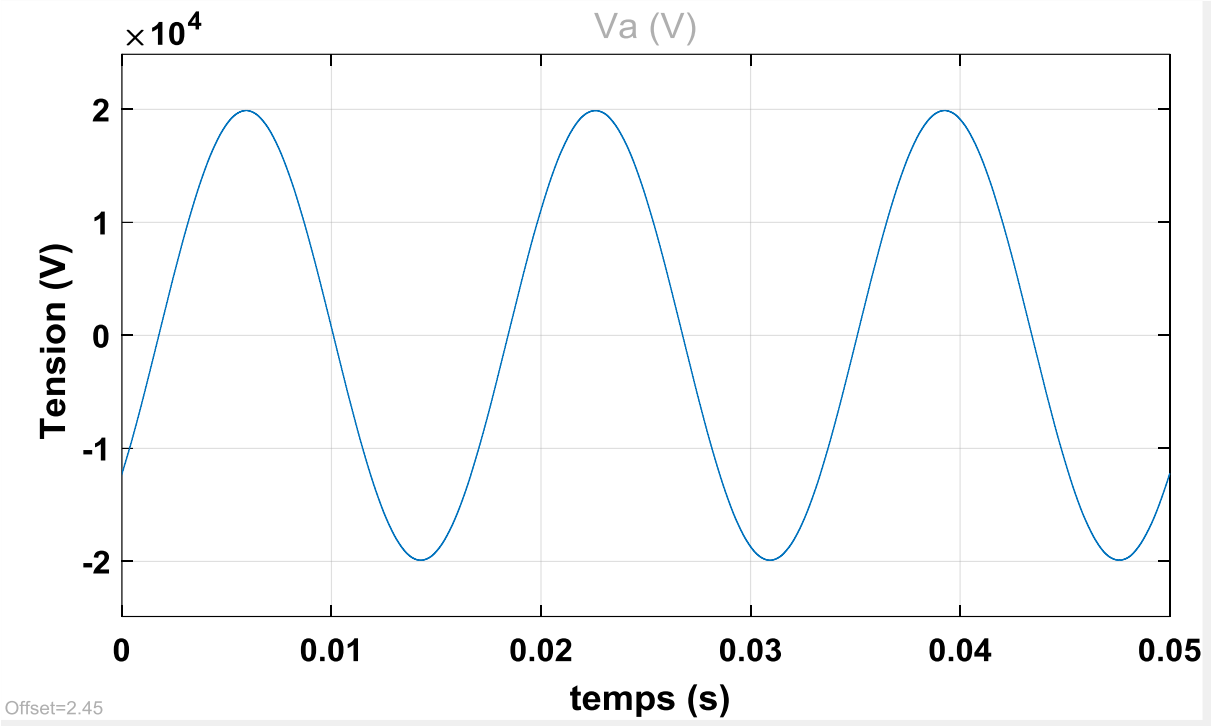


Figure III.37 : La tension du réseau

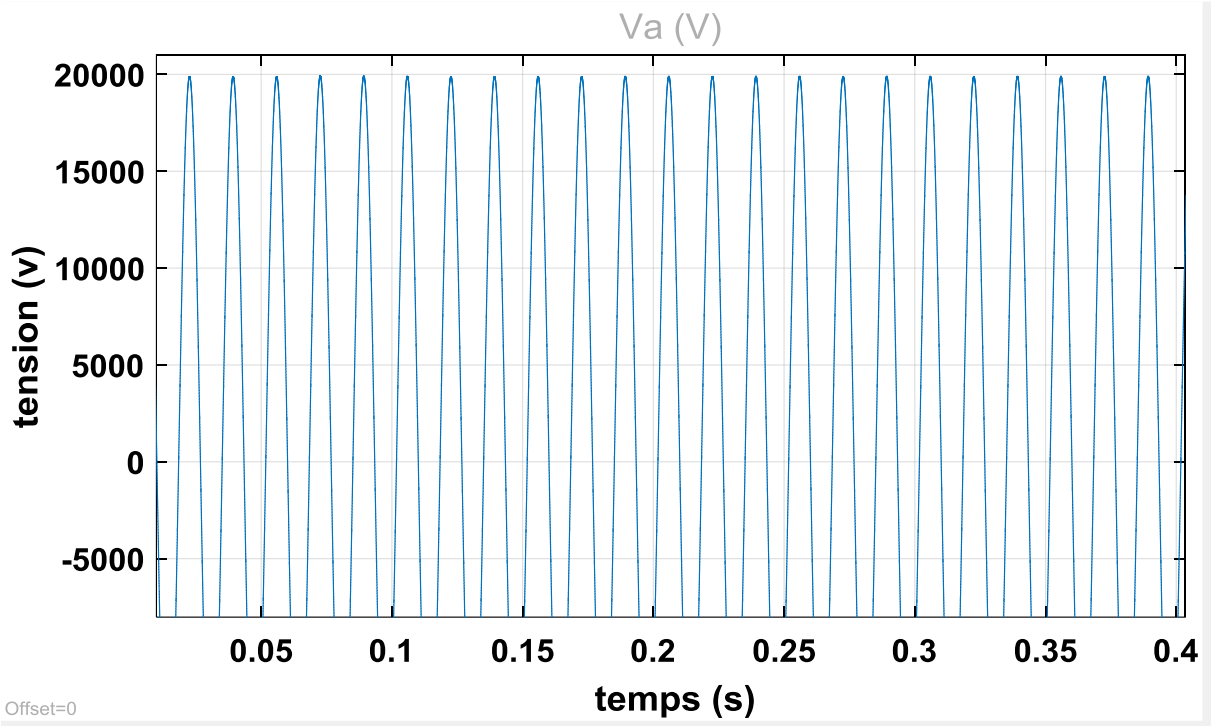


Figure III.38 : La tension du réseau après zoom

Le courant injectée au réseau :

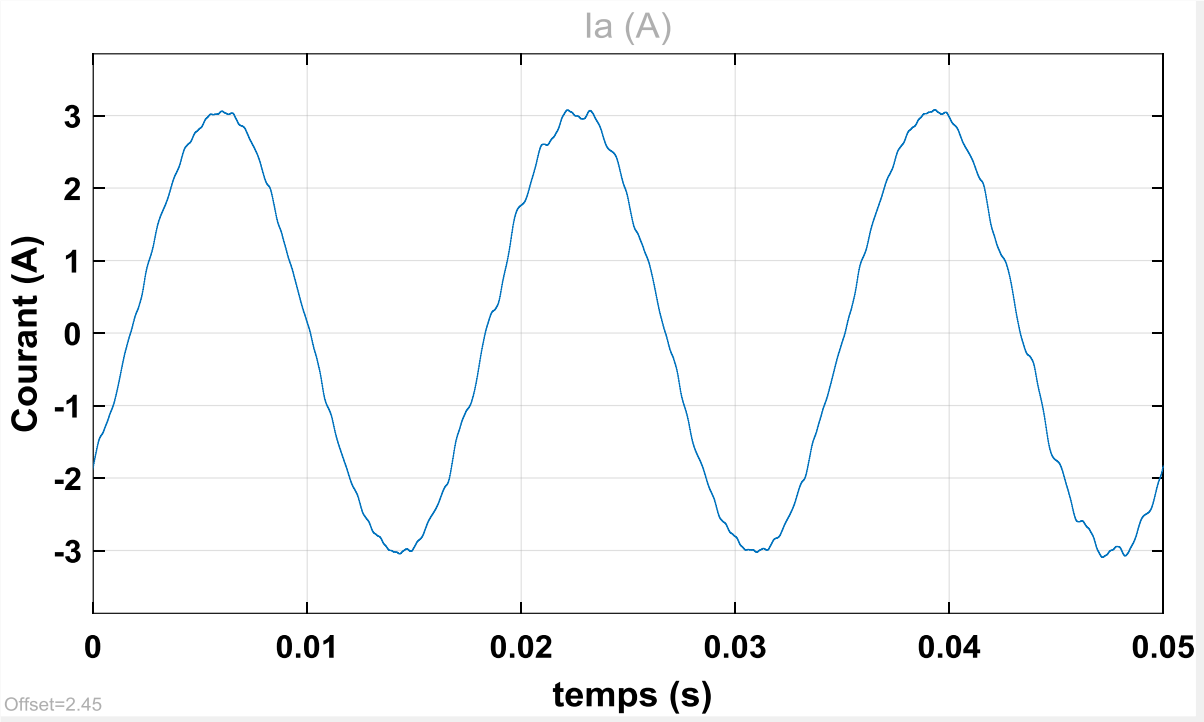


Figure III.39 : Le courant injectée au réseau

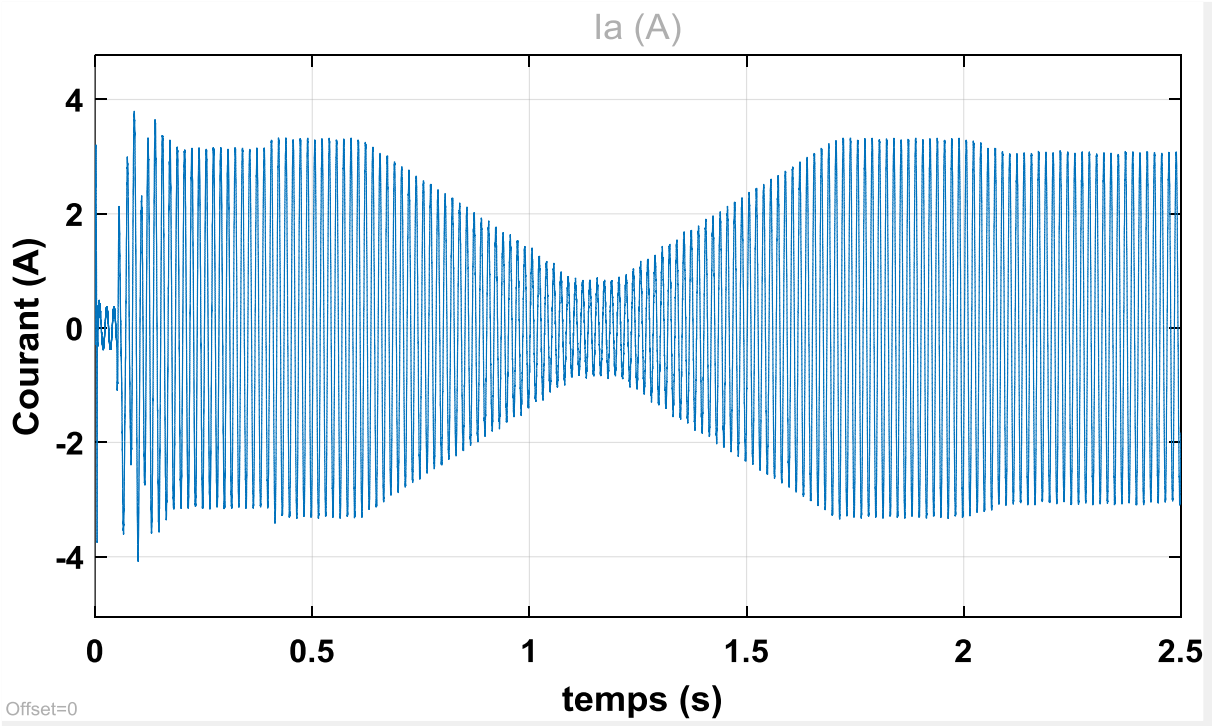


Figure III.40 : Le courant injectée au réseau

III-10 Conclusion

Ce chapitre présente la modélisation et la simulation d'un système PV connecté au réseau avec la technique "Conduction incrémentale + régulateur intégral", l'algorithme MPPT pour injecter la puissance extraite d'un générateur photovoltaïque et obtenir un facteur de puissance unitaire dans des conditions météorologiques variables. Selon les résultats obtenus à partir de la simulation, nous pouvons dire qu'il est essentiel de faire fonctionner le système au MPP (Maximum Power Point) d'un générateur PV, en d'autres termes, nous devons toujours extraire la puissance maximale du module PV en modulant le rapport cyclique du convertisseur élévateur, afin d'améliorer la puissance injectée dans le réseau, sinon le générateur photovoltaïque n'est pas pleinement exploité, ce qui se traduit par des pertes plus élevées dans l'énergie transférée du générateur photovoltaïque au réseau électrique. La technique de modulation de largeur d'impulsion (PWM) a également été développée à côté des onduleurs. Ainsi, nous pouvons obtenir une forme d'onde sinusoïdale à la sortie de l'onduleur et la distorsion harmonique totale (THD) de la tension de sortie peut être réduite. Les résultats confirment la performance adéquate de l'ensemble du contrôle conçu.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire concerne les systèmes photovoltaïques connecté au réseau électrique. Ce dispositif est amené à connaître des développements importants liés essentiellement à une volonté de plus en plus affichée de diversification des moyens de production et d'un meilleur respect de l'environnement.

Ce mémoire décrit le système photovoltaïque solaire connecté au réseau utilisant convertisseur élévateur DC-DC et un onduleur DC/AC pour fournir de l'électricité en alimentant un réseau électrique. Le modèle mathématique contient une représentation des principaux composants du système à savoir un champ PV de 100 kW, un convertisseur élévateur DCDC et un convertisseur DC AC relie réseau électrique via un transformateur.

Au début nous avons donné une présentation générale des systèmes photovoltaïque, leur modélisation et l'influence de l'irradiation et la température sur le point de fonctionnement.

Ensuite, nous avons fait l'étude de l'ensemble du système comportant le générateur photovoltaïque, et le hacheur survolteur classique ou entrelacé pour différents lois de commandes. Les résultats de simulation ont été présentés en détails afin d'illustrer le fonctionnement du système.

Dans le dernier chapitre, nous avons étudiés l'onduleur triphasé commandé par la stratégie de commande la MLI (Modulation de largeur Impulsion), puis les filtres reliant celui-ci au réseau électrique. Ensuite nous avons présenté le système global à savoir l'ensemble des composants : panneau, Hacheur, onduleur et le réseau de distribution BT.

Les résultats de la simulation montrer comment le changement d'un rayonnement solaire peut affecter la puissance de sortie du système PV, ils montrent également les performances de contrôle et le comportement dynamique du système photovoltaïque connecté au réseau.

Pour injecter de l'énergie dans le réseau, il est nécessaire que la synchronisation soit effectuée ; raison pour laquelle nous avons utilisés une stratégie de commande de l'onduleur basé sur le réglage de la position par le PLL et le réglage de la tension du bus continu.

Enfin nous avons effectué la simulation du système photovoltaïque globale raccordé au réseau de distribution basse tension BT. Les résultats obtenus sont satisfaisants (moins de pollution harmonique, facteur puissance unitaire), néanmoins la puissance injectée dépend des conditions climatiques

Bibliographie

[1] : *http : //*www.iufmrese.cict.fr/…/A…/Energie solaire photovoltaïque

[2] : *http : //*www.jsatechnology.net/energie_solaire_installati_panneaux-4Fran

[3] L. ABBASEEN, « Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque », Mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Algérie, 2013.

[4] D. Mohamed daffalah, « Etude et conception d'une chaine photovoltaïque connecté au réseau et étude de la qualité de l'énergie injectée », Mémoire de master, Université de Tunis, Tunisie, 2016.

[**5]** Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque.

[6] Boualem BOUKEZATA, Etude et commande d'une chaine de conversion d'énergied'un système

[7] - [21] S. Bellakehal, « Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables », thèse de Doctorat, Université de Constantine, Algérie, 2010

[8] =M. Hatti, « contrôleur flou pour la poursuite du point de puissance maximum mppt d'un système photovoltaïque ». Jcge'08 Lyon, 2008.

(22) M. Adouane, «Etude et conception d'une stratégie de commande d'un onduleur connecté au réseau électrique», Mémoire de magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2008.

[2] :*http : //www.photovoltaique.info/.../Epia_Techno*

[3] :*http : //*www.iufmrese.cict.fr/…/A…/Energie solaire photovoltaïque

[4] : :Belhadj Mohammed « Modélisation D'un Système De Captage hotovoltaïque Autonome » Mémoire de Magister Universitaire De Bechar 2008

[4] [12] http://www.univ-pau.fr/□scholle/écosystèmes/4-pv.

[5] [15] Gernigon Véronique, "Utilisation de copolymères à blocs dans les cellules solaires organiques morphologie, transport de charges et conversion photovoltaïque", thèse de Doctorat, Université de Strasbourg, 04/01/2012**[**

[6] :https://www.researchgate.net/publication/332846895_MODELISATION_ET_SIMULATION_D'UN_MODULE_PHOTOVOLTAIQUE

[10] **T.** Esram et al., "Comparaison of Photovoltaïque Array Maximum Power Point Tracking Techniques" IEEE, Transactions on energy conversion, vol. 22, no. 2, 2007

[11] Dr. BOUBOU-BOUZIANI Naima, *Potentiel et développement des énergies renouvelables en Algérie*, article, ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUES -ORAN (AL- GERIE),2014.

[12] D. mouhamet daffalah, « Etude et conception d'une chaine photovoltaïque connecté au réseau et étude de la qualité de l'énergie injectée », Mémoire de master, Université de Tunis, Tunisie, 2016.

[13] L. ABBASEEN, « Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque », Mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Algérie, 2013.

[14] O. BENSEDDIK et F. DJALOUD, Etude et optimation du fonctionnement d'un système photovoltaïque, mémoire de master, Université Kasdi Merbah Ouargla, Algérie, 2012.

[15] T. Esram et al., "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques" IEEE, Transactions on energy conversion, vol. 22, no. 2, 2007

[16] Hadj Attou Radhia, Saidi Hemza, « Etude et optimization d'une chaine GPV au Réseau b.t de Sonelgaz », Editions universitaires européennes,2012.

[17] L. MOURAD, « Synthèse de lois de commande non-linéaires pour le contrôle d'une machine asynchrone à double alimentation dédiée à un système aérogénérateur»

[18] M. M. ABDUSALAM, *Structures et Stratégies de Commande des Filtres Actifs Parallèle etHybride avec Validations Expérimentales* , Thèse de doctorat, Universitè Henri Poincaré-Nancy-IFrance, 29 mai 2008.

[19] M.C. Benhabib, *Contribution à l'étude des différent topologie et commandes des filtres actifs parallèle à structure tension* , Thèse de doctorat en génie électrique le 17 décembre 2004