

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE
N° : 09



DOMAINE : Génie électrique
FILIERE : Electrotechnique
OPTION : Commande électrique

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Intitulé

Optimisation énergétique de chaîne de conversion
d'énergie photovoltaïque

Proposé et dirigé par :

Dr. BOUDJELLAL Bilal

Présenté par :

Samiha BELHOUT

Malika BOUCHAREB

ANNÉE UNIVERSITAIRE : 2020 / 2021

Dédicaces

Aux lecteurs de ce mémoire, pour qui, je l'espère, leur sera utile.

A mes parents, qu'ALLAH les protège,

A mes frères et sœurs, merci pour vos encouragements ;

À la famille BELHOUT et BOUCHAREB.

A mon encadreur Dr. BOUDJELLAL Bilal

Merci pour tout le soutien que vous m'avez apporté,

Samîha et Malîka

Remerciements

Je tiens à remercier dieu de m'avoir donné la patience de terminer ce travail. Mes remerciements les plus particuliers vont à mon encadreur Dr. BOUDJELLAL Bilal pour son rôle majeur dans l'élaboration de ce travail par ses remarques constructives et ses suggestions pertinentes, reconnaissance de son rôle important dans l'amélioration du manuscrit de ce mémoire. Je remercie les membres du jury, qui m'ont fait l'honneur de participer au jugement de ce travail.

Enfin, j'aimerais remercier ma famille, ainsi que mes amis qui m'ont aidé et encouragé tout au long de mon travail.

Résumé

Le générateur photovoltaïque est une source caractérisée par un seul point de fonctionnement où la puissance générée est maximale. Ce point se déplace en fonction des conditions climatiques. Une adaptation adéquate entre le générateur solaire et la charge permet de diminuer le coût de l'installation de tels systèmes. Une utilisation optimale de l'énergie fournie par le générateur solaire nécessite l'utilisation des moyens techniques permettant d'assurer cette tâche.

L'objectif de cette mémoire est de contribuer à l'optimisation d'une chaîne de conversion PV. Dans ce mémoire, nous avons étudié un système de production de l'énergie photovoltaïque. Simulations ont été étudiées à savoir la maximisation de puissance MPPT par les technique 'perturbe et observe" (P&O) pour assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur photovoltaïque à l'aide du convertisseur boost classique, nous l'avons remplacé par un boost entrelacé à deux et trois bras. Les résultats de la simulation obtenue sont très encourageants.

Mots clés : Système photovoltaïque, Convertisseur boost, Boost entrelacé, Commande MPPT, P&O.

Table des matières

Table des matières	i
Liste des Figures	iv
Liste des Tableaux	vi
Glossaire	vii
Nomenclature	viii
Introduction générale	2
Chapitre I. Énergies renouvelables et système photovoltaïque	5
I.1 Introduction.....	5
I.2 Énergies renouvelables	5
I.2.1 Énergie éolienne	6
I.2.2 Énergie Géothermique	6
I.2.3 Énergie de la Biomasse	6
I.2.4 Énergie hydraulique.....	7
I.2.5 Énergie solaire photovoltaïque.....	7
I.2.5.1 Énergie solaire en l'Algérie	7
I.2.5.2 Rayonnement solaire.....	9
I.3 Chaîne de conversion électrique	10
I.3.1 Notions de rendement dans la chaîne photovoltaïque.....	11
I.3.2 Rendement d'un GPV	12
I.3.3 Rendement d'un convertisseur.....	12
I.3.4 Rendement de la MPPT	13
I.4 Historique de la cellule photovoltaïque	13
I.4.1 Cellule photovoltaïque	13
I.4.2 Conversion photovoltaïque.....	14
I.4.2.1 Le Principe de la conversion photovoltaïque	14
I.4.3 L'effet photovoltaïque.....	15
I.4.4 Les types des cellules photovoltaïques	15
I.4.5 Association en série et en parallèle d'une cellule PV.....	16
I.4.5.1 Groupement des cellules en série	16
I.4.5.2 Groupement des cellules en parallèle	17
I.4.6 Caractéristiques d'un module	17
I.4.6.1 Caractéristiques des panneaux solaires utilisés	18
I.5 Module photovoltaïque	19
I.5.1 Constitution d'un module de photovoltaïque	19
I.6 Générateur photovoltaïque	20
I.6.1 Protections classiques d'un générateur photovoltaïque	21
I.6.2 Comportement d'un module photovoltaïque	22
I.6.2.1 Influence de la température sur le rendement des cellules	22
I.6.2.2 Influence du rayonnement sur le rendement des cellules	22
I.7 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....	23
I.7.1 Avantage.....	24
I.7.2 Inconvénients	24

I.8	Conclusion	24
Chapitre II. Modélisation et commande d'un système photovoltaïque		26
II.1	Introduction.....	26
II.2	Connexion directe générateur photovoltaïque-charge	26
II.2.1	Étage d'Adaptation entre un Générateur PV et une Charge	28
II.2.2	Modélisation d'un générateur photovoltaïque	29
II.2.2.1	Cas d'une cellule réelle	29
II.2.2.2	Cas d'un générateur photovoltaïque	30
II.3	Convertisseurs DC-DC	31
II.3.1	Le rôle des convertisseurs DC-DC.....	32
II.3.2	Types des convertisseurs DC-DC.....	33
II.4	Le convertisseur boost (hacheur survolteur)	35
II.4.1	Boost classique.....	36
II.4.2	Boost entrelacé.....	36
II.4.3	Boost à trois niveaux de tension.....	37
II.4.4	Boost en cascade	37
II.4.4.1	Convertisseur Boost classique	38
II.4.4.2	Dimensionnement des composants de le hacheur boost	43
II.4.4.3	Commande MLI du hacheur.....	44
II.5	Fonctionnement d'un générateur PV à sa Puissance Maximale	45
II.5.1	Principe	45
II.5.2	Constitution d'une MPPT.....	46
II.5.2.1	Unité de contrôle	46
II.6	Les commandes MPPT	46
II.7	Classification Des Commandes MPPT	47
II.7.1	Classification Des Commandes MPPT Selon Les Paramètres D'entrée.....	47
II.7.2	Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche.....	48
II.7.2.1	MPPT Indirect	48
II.7.2.2	MPPT Direct.....	48
II.8	Les Algorithmes MPPT	49
II.8.1	Perturbation Et Observation	49
II.8.1.1	Les avantages et les inconvénients de P&O.....	53
II.9	Résultat de simulation.....	53
II.9.1	Résultats de simulation de la commande MPPT-P&O.....	55
II.10	Conclusion	59
Chapitre III. Optimisation énergétique de système photovoltaïque		61
III.1	Introduction.....	61
III.2	Convertisseur boost entrelacé à deux bras	61
III.2.1	Simulation du hacheur boost entrelacé à deux bras alimenté par GPV	62
III.2.2	Résultats de simulation	63
III.3	Convertisseur boost entrelacé à trois bras.....	68
III.3.1	Simulation du hacheur boost entrelacé à trois bras alimenté par GPV.....	68
III.3.2	Résultats de simulation	69
III.4	Interprétation des résultats	74
III.5	Conclusion	75
Conclusion générale		77
Références bibliographiques		80

Liste des Figures

Figure I.1– Carte l'irradiation globale reçue dans une surface horizontale en Algérie.	8
Figure I.2– Carte Durée moyenne d'ensoleillement en Algérie.	8
Figure I.3– Spectre du rayonnement solaire reçu hors atmosphère.	9
Figure I.4– Composante du rayonnement global sur un plan horizontal.	10
Figure I.5– Installation photovoltaïque autonome.	10
Figure I.6– Installation au réseau.	11
Figure I.7– Chaîne élémentaire de conversion d'énergie photovoltaïque.	12
Figure I.8– Description d'une cellule photovoltaïque.	14
Figure I.9– Structure et diagramme des bandes d'une cellule photovoltaïque sous éclaircimen t.	15
Figure I.10– Cellule photovoltaïque amorphe à couche mince.	16
Figure I.11– Cellules connectées en série avec leur caractéristique courant-tension.	16
Figure I.12– Cellules connectées en parallèle avec leur caractéristique courant-tension.	17
Figure I.13– Composants d'un GPV.	17
Figure I.14– Module (panneau) photovoltaïque.	19
Figure I.15– Composition d'un module solaire photovoltaïque.	20
Figure I.16– Modules photovoltaïques connectés en série et en parallèle.	21
Figure I.17– Schématisation d'un générateur photovoltaïque élémentaire avec diodes bypass et diode anti-retour.	22
Figure I.18– Influence de la température T sur le rendement des cellules.	23
Figure I.19– Influence de l'éclairement G sur le rendement des cellules, $T = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$	23
Figure II.1– Connexion directe GPV-Charge par le biais d'une diode anti-retour.	27
Figure II.2– Points de fonctionnement d'un GPV en fonction de la charge en connexion directe.	28
Figure II.3– Connexion d'un GPV à une charge à travers un étage d'adaptation.	29
Figure II.4– Circuit électrique du modèle d'une cellule photovoltaïque.	29
Figure II.5– Circuit équivalent du modèle d'un générateur photovoltaïque.	31
Figure II.6– Convertisseur DC/DC.	32
Figure II.7– Différentes topologies du convertisseur Boost.	35
Figure II.8– Schéma de principe d'un hacheur boost.	38
Figure II.9– Circuit équivalents du hacheur boost quand l'interrupteur T est fermé.	40
Figure II.10– Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur T est ouvert.	40
Figure II.11– Formes d'ondes courants/tensions d'un convertisseur.	41
Figure II.12– Principe de la commande MLI.	45
Figure II.13– Chaîne typique de conversion d'énergie photovoltaïque.	46
Figure II.14– Recherche du PPM par la méthode (P&O).	50
Figure II.15– l'algorithme de P&O classique.	51
Figure II.16– Divergence de la méthode P&O.	52

Figure II.17– Schéma bloc du système photovoltaïque dans SIMULINK/MATLAB.	54
Figure II.18– Schéma bloc du GPV dans SIMULINK/MATLAB.	54
Figure II.19– Modèle SIMULINK de l’algorithme MPPT-P&O.	55
Figure II.20– Variation de l’irradiation solaire en fonction du temps.	55
Figure II.21– Evolution du courant du GPV.	56
Figure II.22– Evolution de la tension du GPV.	56
Figure II.23– Evolution de la puissance du GPV.	57
Figure II.24– Evolution du courant aux bornes l’inductance.	57
Figure II.25– Rapport cyclique du convertisseur boost.	57
Figure II.26– Evolution du courant de la charge.	58
Figure II.27– Evolution de la tension de la charge.	58
Figure II.28– Evolution de la puissance de la charge.	58
Figure III.1– Schéma de principe d’un hacheur boost entrelacé à deux bras.	62
Figure III.2– Schéma Matlab/Simulink de boost entrelacé à deux bras.	62
Figure III.3– Evolution du courant du GPV.	63
Figure III.4– Evolution de la tension du GPV.	63
Figure III.5– Evolution de la puissance du GPV.	64
Figure III.6– Rapport cyclique D du convertisseur boost entrelacé à deux bras.	64
Figure III.7 Evolution du courant I_L	65
Figure III.8– Evolution du courant aux bornes l’inductance L_1	65
Figure III.9– Evolution du courant aux bornes l’inductance L_2	66
Figure III.10 Zoom sur l’évolution du courant aux borne l’inductance L_1 et L_2	66
Figure III.11– Evolution du courant de la charge.	67
Figure III.12– Evolution de la tension de la charge.	67
Figure III.13– Evolution de la puissance de la charge.	67
Figure III.14– Schéma de principe d’un hacheur boost entrelacé à trois bras.	68
Figure III.15– schéma Matlab/Simulink de boost entrelacé à trois bras.	69
Figure III.16– Evolution du courant du GPV.	69
Figure III.17– Evolution de la tension du GPV.	70
Figure III.18– Evolution de la puissance du GPV.	70
Figure III.19–Rapport cyclique du convertisseur boost entrelacé à Trois bras en fonction le temps.	71
Figure III.20– Evolution du courant I_L	71
Figure III.21– Evolution du courant aux bornes l’inductance L_1	72
Figure III.22– Evolution du courant aux bornes l’inductance L_2	72
Figure III.23– Evolution du courant aux bornes l’inductance L_3	72
Figure III.24– Zoom sur l’évolution du courant aux borne l’inductances L_1 , L_2 et L_3	73
Figure III.25– Evolution du courant de la charge.	73
Figure III.26– Evolution de la tension de la charge.	74
Figure III.27– Evolution de la puissance de la charge.	74

Liste des Tableaux

Tableau I.1 – Taux d’ensoleillement pour chaque région de l’Algérie.	8
Tableau I.2 – Caractéristiques des panneaux solaires utilisés.	19
Tableau II.1 – Rapports de transformation des principaux convertisseurs DC-DC.	34
Tableau II.2 – Type des convertisseurs DC/DC.	34
Tableau II.3 – Résumé de l’étude des différents boost.	37
Tableau II.4 – Paramètres du système photovoltaïque étudié.	53
Tableau III.1 – Comparaisons entre les trois types du convertisseur boost.	75

Glossaire

IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor.
MCC	Mode de Conduction continue.
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion.
MPPT	Maximum Power Point Tracking.
PV	Photovoltaïque.
GPV	Générateur Photovoltaïque.
FF	Facteur de forme.
P&O	Perturbation et observation.
MPP	Pointe de puissance maximale.
PWM	Pulse Width Modulation (Modulation à Largeur d'Impulsion).

Nomenclature

Indice	Description	Unité
C_{dc}	Condensateur de sortie du convertisseur boost	F
C_{pv}	Condensateur d'entier du convertisseur boost	F
f_s	Fréquence de système PV	Hz
i_{cell}	Le Courant fournie par la cellule photovoltaïque	A
i_{ph}	Courant photonique, du modèle d'une cellule photovoltaïque	A
i_{pv}	Courant du système photovoltaïque	A
I_{sat}	Le courant de saturation	A
I_{rr}	Le courant de saturation de la diode	A
I_{sc}	Le courant de court-circuit	A
V_{oc}	La tension de circuit-ouvert	V
V_{cell}	La tension aux bornes de la cellule	V
G	Ensoleillement	W/m^2
q	Charge de l'électron	C
α	Coefficient de température de courant photonique	-
K	Constant de Boltzmann	J/K
E_g	L'énergie du band gap	-
n	Facteur d'idéalité de la jonction	-
N_s	Nombre de cellules connectées en série	-
N_p	Nombre de cellules connectées en parallèle	-
L_{Gpv}	Inductance du convertisseur du système photovoltaïque	H
P_{pv}	Puissance débitée par la source solaire photovoltaïque	W

Introduction générale

Introduction générale

Ces dernières années La production et la demande énergétique mondiale de source fossile est un défi de grande importance pour répondre à l'accroissement de la population et à la hausse du niveau de confort de nos sociétés modernes et la demande les niveaux d'énergie dans les sociétés industrialisées continuent d'augmenter. Les sources d'énergie fossiles (Pétrole, gaz, charbon et l'uranium...). D'autre part, La consommation élevés de ces sources non renouvelables donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution et effrayants réduit les réserves de ce type d'énergie pour les générations future [1] [2].

Aujourd'hui, la science s'est intéressée nouvelles sources énergies appels énergies renouvelables, Le secteur de ces dernier est le seul qui se distingue par sa capacité à réduire les émissions de gaz à effet de serre et la pollution et à exploiter des sources de plus en plus facilement, décentralisées l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, la géothermie, la biomasse l'énergie, l'énergie solaire. Qui sera étudiée dans ce mémoire l'énergie solaire photovoltaïque [3].

La production d'énergie sur la base de l'énergie solaire photovoltaïque nécessite de grandes capacités ainsi qu'à toutes les sources d'énergie renouvelables disponibles. Elle est propre et silencieuse, Gratuit et disponible dans la plupart des régions du monde. Il a été développé à une échelle plantaire de plus de centaines de gigawatts et pourrait devenir la principale source d'électricité à l'avenir [4].

L'énergie PV est obtenue directement à partir du rayonnement du soleil. Elle peut même se transformer en énergie électrique grâce à l'effet PV. Les panneaux PV composés des cellules PV ont la capacité de transformer les photons en électrons. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable.

Dans ce contexte général, notre étude s'intéresse à la filière photovoltaïque (PV) qui semble une des plus prometteuses avec un taux de croissance mondial très élevé [5].

En raison des fortes caractéristique électrique non linéaires des cellules photovoltaïque, leur combinaison peut améliorer l'efficacité du système photovoltaïque en utilisant les solutions suivant technologie de recherche de point de la puissance maximal (appelée technologie MPPT), ou via un convertisseur DC-DC.

Comprendre que l'objectif fondamental de toute recherche est l'amélioration globale des performances du système de conversion photovoltaïque (PV). Lorsque le générateur photovoltaïque fournit une charge, quelle que soit sa nature, cela ne signifie pas nécessairement que la rentabilité de l'ensemble du système est faible, mais l'équivalence est acceptable Le rendement et le coût moyen d'exploitation déterminent l'efficacité de l'utilisation de l'énergie

solaire. Afin d'avoir une bonne adaptabilité et un rendement élevé, plusieurs normes et techniques d'optimisation du rendement des systèmes photovoltaïques ont été appliquées. Parmi ces technologies, on retrouve la technologie "Poursuite de Point de Puissance Maximale" MPPT ("Maximum Power Point Tracker" en anglais).

Concernant ce travail, nous sommes intéressés dans ce travail essentiellement, à l'étude et développement de la étage d'adaptation pour obtenir point de puissance maximale parfait d'un générateur photovoltaïque (GPV), pour une bonne exploitation, quelques soient les conditions météorologiques (température et éclairement). Ceci nécessite amélioration de convertisseur DC-DC.

Ce travail comporte trois chapitres ainsi qu'une introduction et une conclusion est organisée.

Dans le premier chapitre, après avoir présenté les différentes sources d'énergies renouvelables présentes, nous nous intéressons à l'énergie photovoltaïque. Et étudier ce dernier leur et ses composants, ainsi que le principe de conversion photoélectrique. Ensuite, nous donnerons les principales caractéristiques d'un générateur photovoltaïque.

Dans le premier chapitre, Après avoir présentons différentes sources d'énergie Énergie renouvelable actuelle, nous nous concentrons sur la production Photovoltaïque. Et étudie système photovoltaïques et leurs composants, ainsi le principe de la conversion photovoltaïque puis nous donnerons les principales caractéristiques d'un générateur photovoltaïque.

Dans la deuxième chapitre, nous présentons étude modélisation de GPV dans la condition standard ($G=1000W/m^2$ $T=25^{\circ}C$), ainsi la modélisation de convertisseur DC-DC, le hacheur boost et son commande MPPT (Technique P&O) pour rechercher le point où puissance du générateur photovoltaïque est maximal parfait.

Dans la troisième chapitre, nous présentons deux topologies des convertisseurs boost entrelacé (deux bras et trois bras) pour optimiser le rendement de système PV, et ainsi de choisir la meilleur topologie vis-à-vis au nombre de panneau solaire.

Finalement, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale qui résume notre étude dans sa partie théorique et interprétation des résultats.

Chapitre I. Énergies renouvelables et système photovoltaïque

Chapitre I. Énergies renouvelables et système photovoltaïque

I.1 Introduction

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici 20-30 ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables. Naturellement décentralisées. Ces énergies satisfont quant à elles 13 % de la demande, dont 10% pour hydraulique. Comparé aux énergies classiques (fossiles et nucléaires), les énergies renouvelables présentent le double avantage de ne pas être source d'émissions de gaz à effet de serre lors de leur utilisation et de présenter des gisements renouvelables donc inépuisables.

Ce sont des énergies de flux, par opposition aux énergies dites de stock (gaz, fioul, charbon, uranium, ...) [6], il est intéressant de les exploiter sur le lieu de consommation, en les transformant directement soit en chaleur, soit en électricité selon les besoins. La production d'électricité décentralisée par sources d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement. Cependant le caractère aléatoire de ces sources nous impose d'établir des règles de dimensionnement et d'utilisation de ces systèmes pour les exploiter au mieux [7].

Ce chapitre présente les différents types d'énergie renouvelable, le système photovoltaïque et les différents blocs qui le constituent, ainsi les caractéristiques de ce système, avec ses avantages et ses inconvénients.

I.2 Énergies renouvelables

On considère qu'une énergie est renouvelable, toute source d'énergie que se renouvelable assez rapidement pour être considérée comme inépuisable (d'où son nom) c'est-à-dire, sa vitesse de formation doit être plus grande que sa vitesse d'utilisation, disponibles sans limite de temps [8].

Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués principalement par le Soleil (l'énergie solaire mais aussi hydraulique, éolienne et biomasse...), la Lune (énergie marémotrice, certains courants : énergie hydrolienne...) et la Terre (géothermique profonde...), à l'échelle de la durée de vie de humanité .Ce n'est pas le cas pour les combustibles fossiles et nucléaires [6] [9].

Les énergies renouvelables regroupent un grand nombre de systèmes différents, selon la source d'énergie valorisée et la forme d'énergie obtenue. Les principales filières d'énergies renouvelables sont [10] :

- Énergie éolienne
- Énergie géothermique
- Énergie de la biomasse
- Énergie hydraulique
- Énergie solaire

I.2.1 Énergie éolienne

Les grandes éoliennes commencent à devenir habituelles dans les paysages des régions où le vent souffle. Et elles le deviendront sans doute de plus en plus, car l'électricité éolienne est particulièrement propre : pas de gaz à effet de serre, entièrement renouvelable. Leurs seuls inconvénients sont la transformation des paysages et un bruit léger qui empêche de pouvoir les construire trop près des habitations. Les éoliennes sont des machines très hautes (le mât mesure de 80 à 100 m pour les plus puissantes), parce que le vent est plus régulier et plus fort à quelques dizaines de mètres d'altitude qu'en surface. L'hélice, en général munie de trois pales, est généralement de grandes dimensions. Les éoliennes ont besoin d'une vitesse minimale du vent de 10 à 15 km/h pour pouvoir fonctionner. Au-delà de 90 km/h, elles sont arrêtées pour ne pas subir trop d'efforts qui les useraient prématurément [11].

I.2.2 Énergie Géothermique

L'énergie géothermique fait référence à l'extraction de l'énergie contenue dans le sol sous forme de chaleur. La température du sol souterrain augmente avec la profondeur, ce que l'on appelle le «gradient géothermique». En moyenne, nous obtenons 3 ° C de plus par 100 m. Par conséquent, la température de l'eau dans les roches réservoirs à une profondeur de 1500 m peut atteindre 60 à 70 ° C. Le principe de la géothermie consiste à pomper cette eau chaude afin de l'utiliser pour le chauffage, ou si elle est suffisamment chaude pour produire de l'électricité [11] [12].

I.2.3 Énergie de la Biomasse

La biomasse fait référence à tous les organismes d'origine végétale ou animale à la surface de la terre. En général, les sous-produits ou déchets sont également classés comme biomasse. Le terme biomasse recouvre toute matière organique susceptible de devenir de l'énergie. Considérez différents types : bois-énergie, biocarburant, et biogaz [11].

I.2.4 Énergie hydraulique

L'énergie hydraulique est l'énergie mise en jeu lors du déplacement ou de l'accumulation d'un fluide telle que l'eau douce ou l'eau de mer. Ce déplacement va produire un travail mécanique qui est utilisé directement ou converti sous forme d'électricité [12] [13].

I.2.5 Énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire est la fraction de l'énergie de rayonnement solaire qui apporte l'énergie thermique et la lumière prévenante sur la surface de la terre après filtrage par l'atmosphère terrestre. Cette énergie produite par l'homme en captant le rayonnement émis par le soleil principalement sous forme électrique ou thermique, c'est l'une des principales formes d'énergie renouvelables.

Dans une maison solaire, l'apport solaire permet de faire de l'économie importante. Ce type de montage est adapté aux installations ne pouvant être raccordées au réseau. L'énergie produite doit être directement consommée et/ou stockée dans des accumulateurs pour permettre de répondre à la totalité des besoins. L'énergie solaire permet donc de chauffer tout ou partie d'un bâtiment pour un cout proportionnel quasi nul [14].

L'énergie photovoltaïque (PV) est la transformation directe de la lumière en électricité, On utilise pour cela une cellule photovoltaïque (photopile). Le soleil est à l'origine de toutes les formes d'énergie présentes sur terre (à l'exception de l'énergie nucléaire). Le rayonnement solaire apporte à la terre de la chaleur et de la lumière. Cette énergie peut être captée de trois façons : en utilisant directement la chaleur (chauffage solaire direct, capteurs thermiques), en transformant la lumière en électricité (capteurs photovoltaïques) ou en transformant la chaleur en électricité (centrales électriques solaires) [15].

I.2.5.1 Énergie solaire en l'Algérie

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara) [16]. L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m² est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 KWh/m²/an au Nord et 2263 kwh/m²/an au Sud du pays. Ce gisement N solaire dépasse les 5 milliards de GWh. Climatologie au niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau.1 selon l'ensoleillement reçu annuellement, La Figure I.1 montre la carte de l'irradiation solaire en Algérie et La Figure I.2 montre la carte durée moyenne d'ensoleillement en Algérie.

Le Tableau I.1 indique le taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie [17] [18].

Tableau L1 – Taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie.

Régions	Région côtière	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4%	10%	86%
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m ² /an)	1700	1900	2650

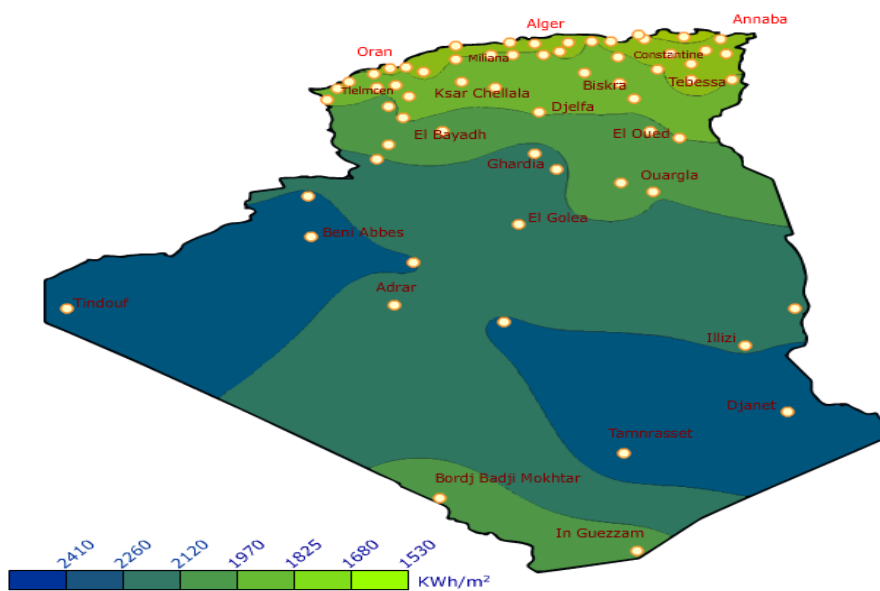


Figure L1– Carte l'irradiation globale reçue dans une surface horizontale en Algérie.

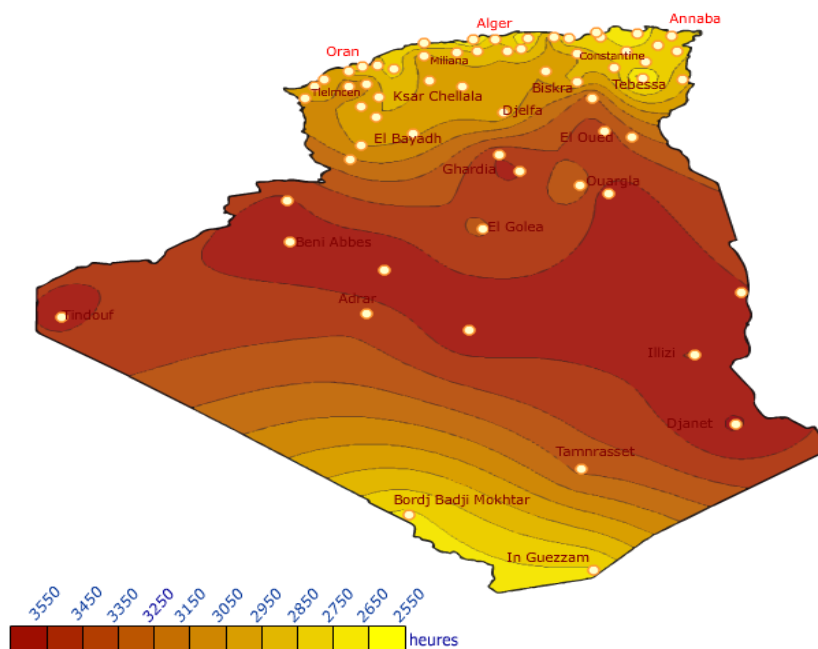


Figure L2– Carte Durée moyenne d'ensoleillement en Algérie.

I.2.5.2 Rayonnement solaire

La principale énergie dont nous disposons est le soleil, qui se trouve il est à 150 millions de Km de la terre et possède une capacité de rayonnement isotrope. En première approximation, absorbé par le corps noir (entièrement émis absorption parfait à 5800 K). Le rayonnement se propage dans l'espace sous la forme de une onde électromagnétique qui atteint la terre environ 8 minutes après son lancement 98% de l'énergie émise est 0.25 et $3\mu\text{m}$.

La terre reçoit une partie du rayonnement. Le flux d'énergie reçu par la terre est-il est appelé irradiance et abrégé en éclaircissement. Moyenne annuelle de cette illumination reçue sur un plan perpendiculaire aux rayons du soleil au sommet de l'atmosphère constante solaire [19].

La Figure I.3 illustre la distribution spectrale du rayonnement solaire au sommet de l'atmosphère [20].

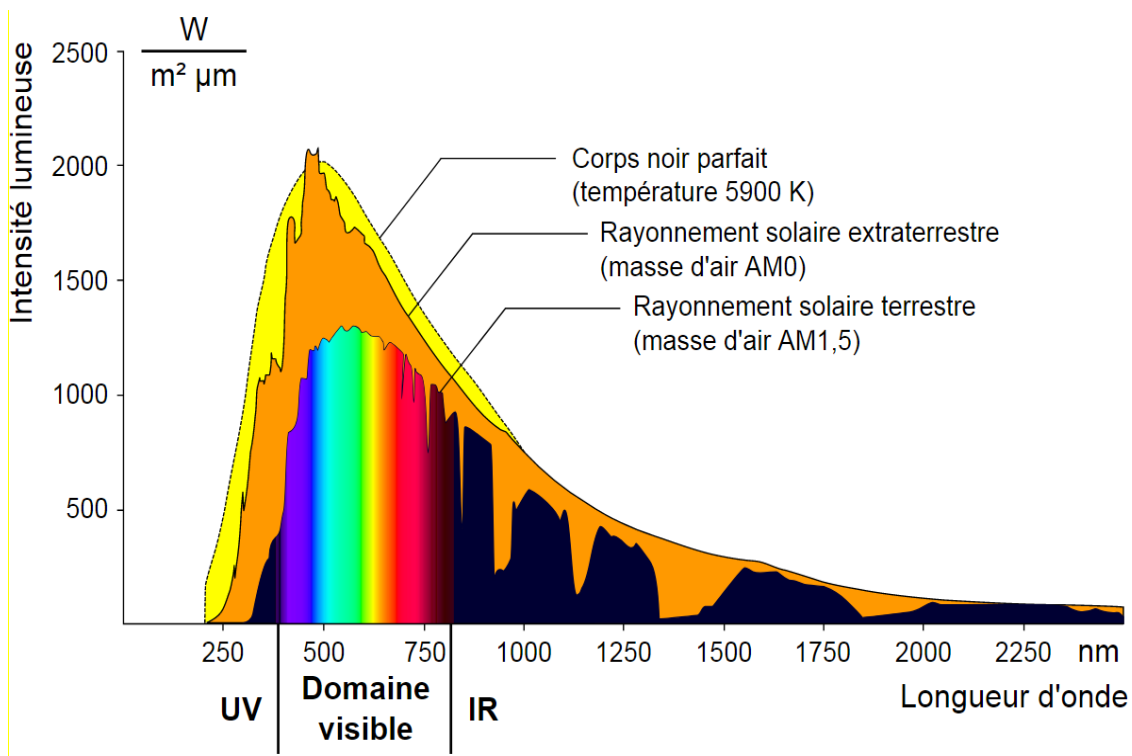


Figure I.3– Spectre du rayonnement solaire reçu hors atmosphère.

Le rayonnement solaire se divise en deux parties [21] [22] :

- Rayonnement global Le rayonnement global est la somme de tous les rayonnements reçus (rayonnement direct, diffus et albédo).
- Rayonnement réfléchi C'est la partie inutile des rayonnements solaires qu'il diffuse par les obstacles atmosphériques.

Dans La Figure ci-dessous (Figure I.4) est schématisé l'ensemble des rayonnements solaires reçu sur une surface terrestre [5].

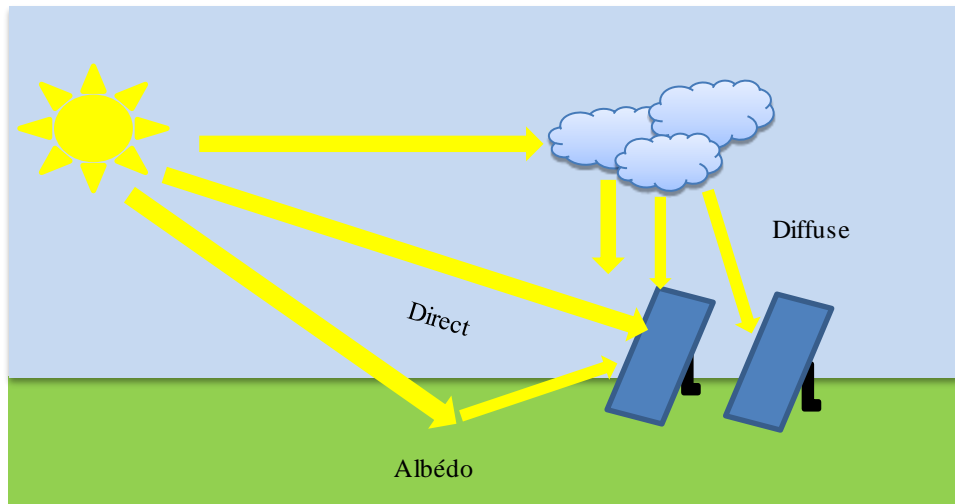


Figure I4– Composante du rayonnement global sur un plan horizontal.

I.3 Chaîne de conversion électrique

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

Dans le cas d'une installation autonome (Figure I.5), l'énergie générée par le panneau solaire photovoltaïque sera utilisée immédiatement (pompage, ventilation, etc...) ou stockée dans la batterie pour une utilisation ultérieure. Le courant continu produit alimente directement des appareils prévus à cet effet ou est converti en courant alternatif 230 Volts [10] [23].

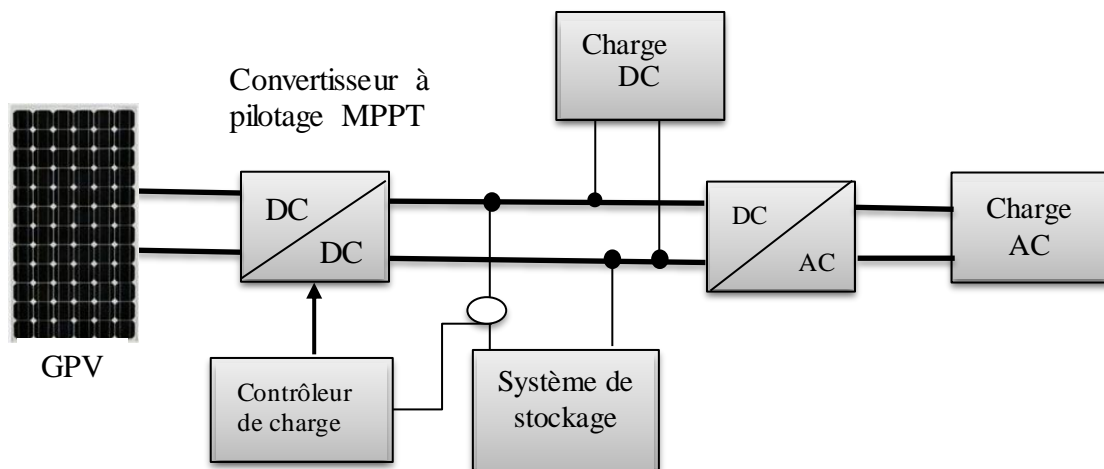


Figure I5– Installation photovoltaïque autonome.

Le système peut également être connecté au réseau (Figure I.6). L'avantage de la connexion est éliminé le stockage d'énergie coûteux et gênant. Dans la plupart des onduleurs économiques ne peuvent fonctionner que lorsque le réseau électrique existe, sinon ils peuvent tomber en panne cette dernière rend le système de production de source renouvelable inopérant. Une sorte de si une personne a une charge DC. Un onduleur réversible est nécessaire. Si la consommation locale est supérieure à la production de la centrale, et la sauvegarde est assurée par le réseau. Dans le cas contraire, l'énergie est fournie au réseau public et utilisée pour alimenter les consommateurs voisins [10].

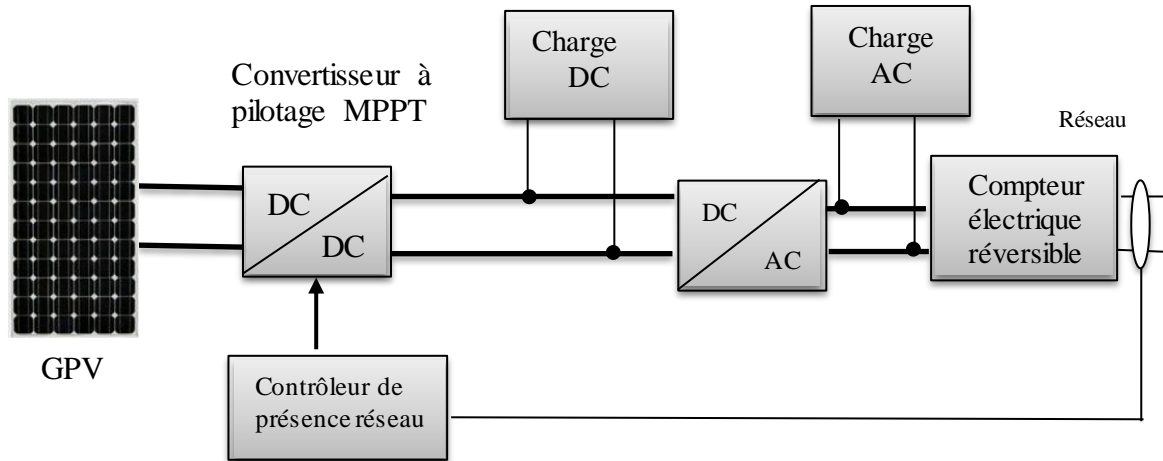


Figure I.6– Installation au réseau.

I.3.1 Notions de rendement dans la chaîne photovoltaïque

Dans la recherche sur la chaîne de conversion photovoltaïque, il est essentiel de définir différents concepts de sortie la communauté scientifique et les activités sur lesquelles nous nous appuyons pour la comparaison entre différents générateurs et chaînes. Pour expliquer ce concept d'efficacité, en prenant comme exemple une simple chaîne de conversion PV (Figure I.7) nous avons un GPV, un adaptateur ou un convertisseur statique et une charge, à ce niveau, on peut parler de plusieurs rendements [3].

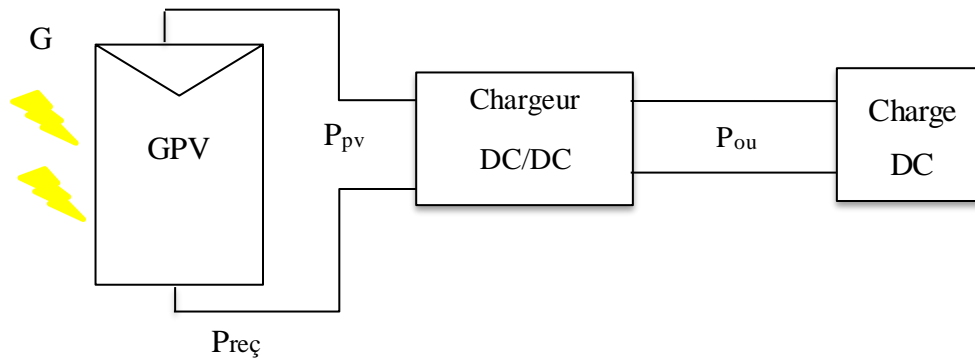


Figure I.7– Chaîne élémentaire de conversion d'énergie photovoltaïque.

I.3.2 Rendement d'un GPV

En ce qui concerne l'énergie photovoltaïque, la première définition de l'efficacité est l'efficacité de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique grâce à GPV. En effet, le rendement de conversion η_{pv} est un critère important évaluer l'efficacité énergétique du GPV, le rendement correspond au rapport entre l'énergie électrique réelle délivrée par les cellules photovoltaïque éclairé par un éclairage connu et normalisé à énergie égale électrique reçue [3] [24].

Le rendement caractérisant le taux de conversion photons-électrons d'un panneau solaire photovoltaïque, est alors défini selon l'équation(I.1).

$$\eta = \frac{P_{Pv}}{G \times A_{eff}} \quad (I.1)$$

Avec :

- P_{pv} : correspond à la puissance délivrée par GPV.
- A_{eff} : la surface effective du panneau PV représentant uniquement la partie active du capteur PV effectuant la conversion des photons en électrons.

I.3.3 Rendement d'un convertisseur

On définit le rendement du convertisseur qui est généralement fourni par η_{conv} par les documents du fabricant, par la relation (I.2) par l'attention P_{out} la pouvoir fourni à la sortie du convertisseur [3] [24].

$$\eta_{CONV} = \frac{P_{ou}}{P_{Pv}} \quad (I.2)$$

I.3.4 Rendement de la MPPT

Le rendement que nous définissons à la sortie du générateur GPV est lié au point fonctionnement réel du générateur photovoltaïque et son éloignement du point mieux, il mesure l'efficacité de la commande de point obligatoire le GPV fonctionne aussi près que possible du point optimal, ou il peut c'est ce qu'on appelle l'efficacité de la commande MPPT, il est défini par la relation (I.3) [3] [24].

$$\eta_{MPPT} = \frac{P_{pv}}{P_{max}} \quad (I.3)$$

I.4 Historique de la cellule photovoltaïque

Le mot photovoltaïque vient de mot grec "photos" qui signifie la lumière et voltaïque du physicien italien "Alessandro volta" [25].

Les faire très importantes dans la vie d'énergie photovoltaïque, en 1839 Le physicien français Edmond Becquerel décrit le premier l'effet photovoltaïque [26], en 1954 réalisation des premières cellules au silicium dans les laboratoires de la compagnie Bell Téléphone Laboratoires, et en 1958 les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace [26] [27] [28].

Au cours des années 1980, la technologie photovoltaïque terrestre se développe régulièrement, installer plusieurs centrales électrique de quelques Méga Watts [27].

I.4.1 Cellule photovoltaïque

La cellule solaire ou cellule photovoltaïque est fabriquée à l'aide des matériaux semi-conducteurs. Elle réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. On peut la représenter comme une diode plate qui est sensible à la lumière. La Figure I.8-illustre la structure d'une cellule photovoltaïque [29].

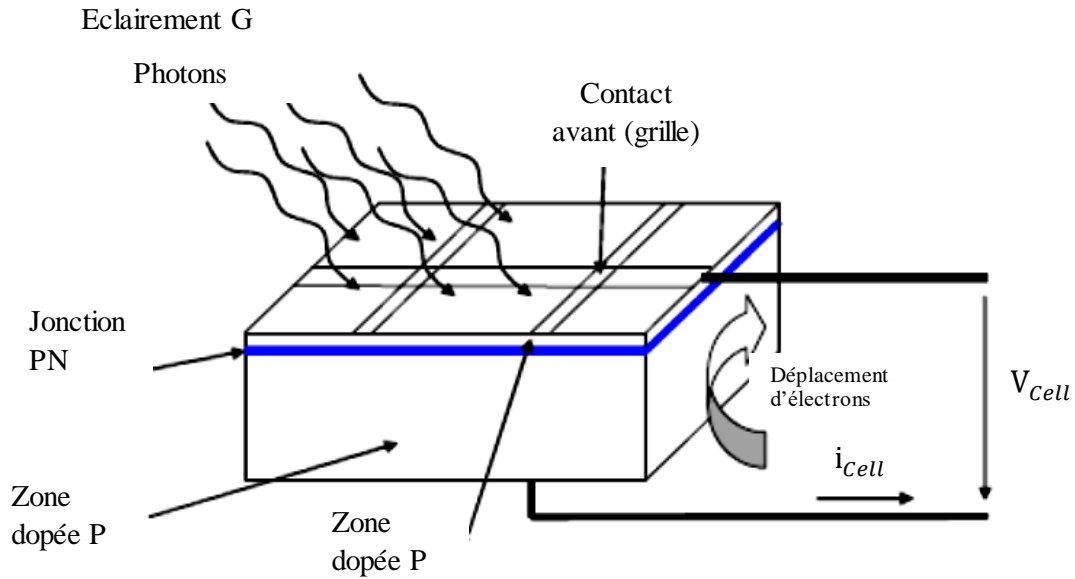


Figure I.8– Description d'une cellule photovoltaïque.

I.4.2 Conversion photovoltaïque

En 1954, avec la découverte de l'effet photovoltaïque, la possibilité de convertir directement l'énergie lumineuse (notamment le rayonnement solaire) en énergie électrique est apparue. Cet effet utilise les propriétés quantiques de la lumière et permet à l'énergie incidente d'être convertie en courant électrique, où les cellules solaires sont l'élément de base de cette conversion photovoltaïque [30] [31].

I.4.2.1 Le Principe de la conversion photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est la plus petite partie de l'installation et se compose d'un matériau semi-conducteur qui convertit les photons du rayonnement solaire en énergie électrique par effet photoélectrique. Cette conversion se fait selon le principe suivant :

Sous la lumière, les paires électron-trou photo-générées dans la zone de charge d'espace (ZCE) y sont immédiatement séparées par le champ électrique (Figure I.9). Les trous chargés positivement accélèrent vers la zone P, et les électrons chargés négativement accélèrent vers la zone N, et les trous et les électrons deviennent majoritaires : c'est la génération du photocourant. Dans le même temps, les porteurs minoritaires, les trous générés côté N et les électrons générés côté P génèrent un gradient de concentration et diffusent dans le matériau. S'ils atteignent la ZCE sans recombinaison, le champ électrique les entraîne à travers la zone de déplétion jusqu'à la zone où ils deviennent majoritaires : c'est le photocourant diffusé. L'existence du contact ohmique assure la collecte des porteurs, générant ainsi un courant photo-généré [32].

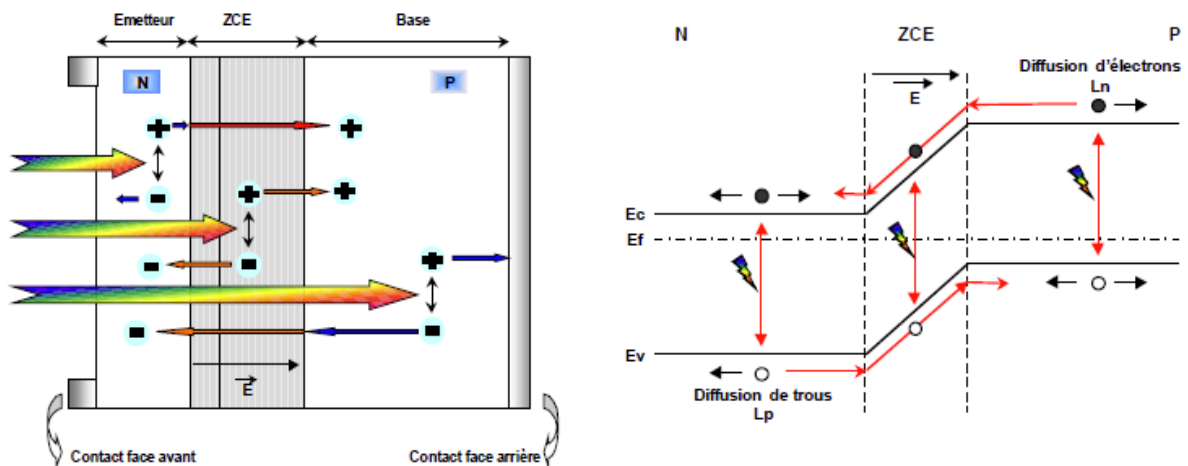


Figure I.9– Structure et diagramme des bandes d'une cellule photovoltaïque sous éclairage.

I.4.3 L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est un phénomène physique propre à certains matériaux semi-conducteurs qui, exposés à la lumière, produisent de l'électricité. Le plus connu d'entre eux est le silicium cristallin qui est utilisé aujourd'hui dans fabrication des panneaux solaires [23].

I.4.4 Les types des cellules photovoltaïques

Il existe trois types principaux de cellules [5] [33] [34] :

- Cellules monocristallines (Figure I.10-a) : Ce sont celles qui ont le meilleur rendement (14 à 20 %) mais aussi celle qui ont le coût le plus élevé, du fait d'une fabrication compliquée (30 ans).
- Cellules poly-cristallines (multi-cristallin) (Figure I.10-b) : leur conception étant plus simple et faible coût de fabrication moins important, cependant leur efficacité (rendement 11 à 15%) est plus faible, et longue durée de vie (30 ans).
- Cellules amorphes (Figure I.10-c) sont constituées par des couches très minces de silicium, et ont un coût peu élevé. Elles ont un faible rendement (5 à 9%) et durée de vie (20 ans).

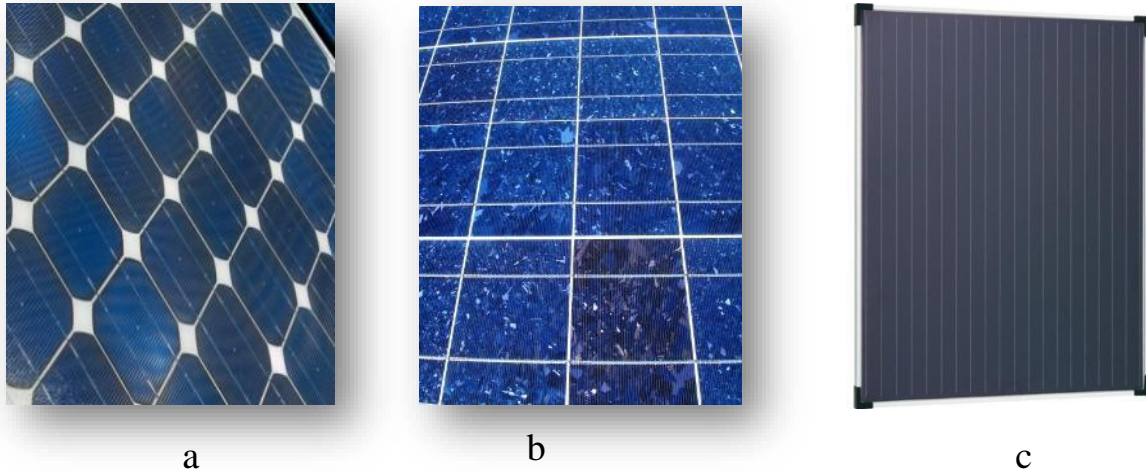


Figure I.10– Cellule photovoltaïque amorphe à couche mince.

I.4.5 Association en série et en parallèle d'une cellule PV

Les cellules (modules) peuvent également être Groupement en série et en parallèle pour établir le champ photovoltaïque afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation [35] [36].

I.4.5.1 Groupement des cellules en série

Une association des cellules ou des modules connectés en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque comme montre La Figure I.11, et le courant de la branche reste le même. La tension augmente proportionnellement au nombre de cellules ou module en série.

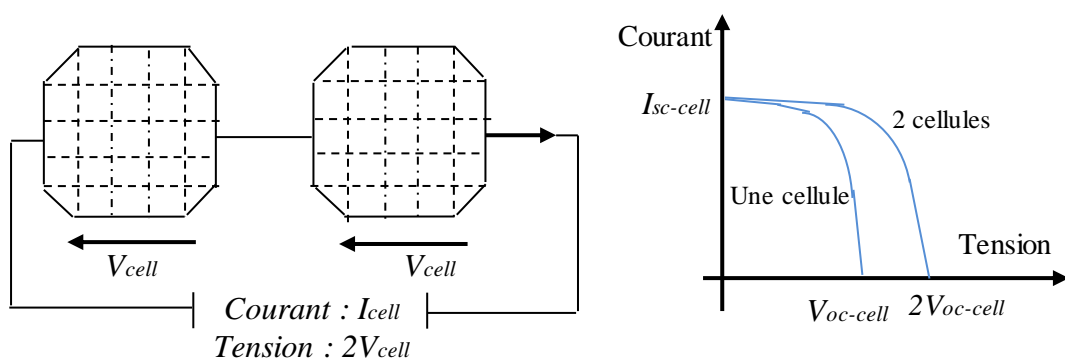


Figure I.11– Cellules connectées en série avec leur caractéristique courant-tension.

I.4.5.2 Groupement des cellules en parallèle

En additionnant des cellules identiques en parallèle comme montre La Figure I.12, la tension de la branche est égale à la tension de chaque cellule et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de cellules en parallèle dans la branche.

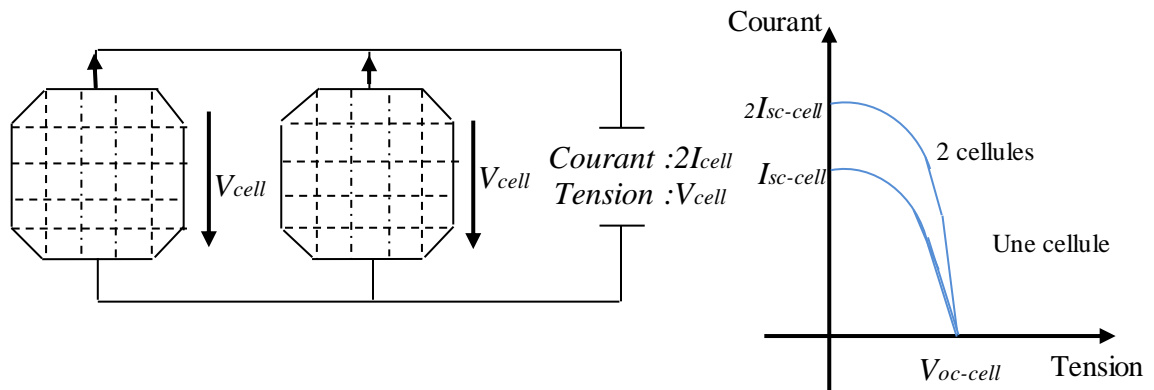


Figure I.12– Cellules connectées en parallèle avec leur caractéristique courant-tension.

Plusieurs cellule donnée un panneau solaire(ou module) photovoltaïque. Plusieurs modules qui sont regroupés dans une centrale solaire photovoltaïque.

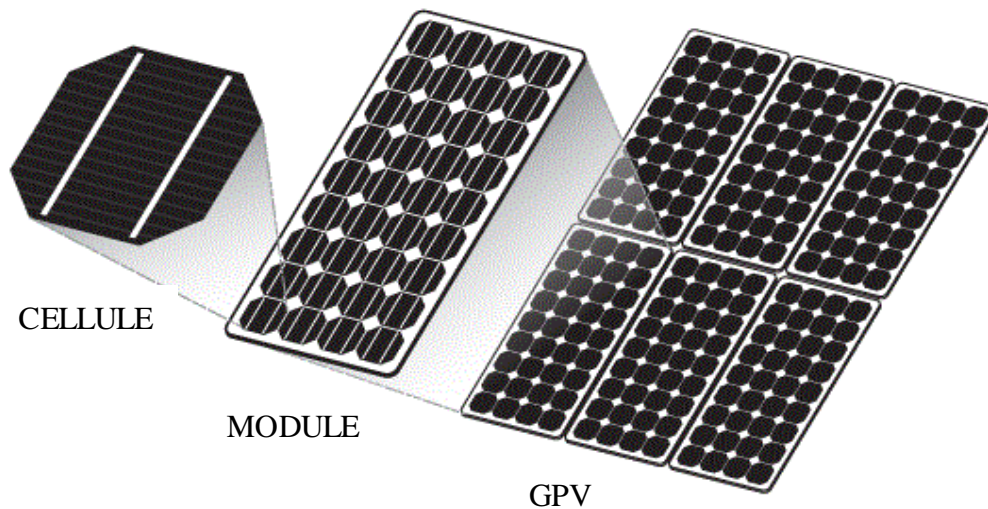


Figure I.13– Composants d'un GPV.

I.4.6 Caractéristiques d'un module

Les caractéristiques d'un module sont [36] :

- La caractéristique $I(V)$: est la caractéristique de base d'une cellule solaire. Elle répondra à toutes les charges possibles dans un ensemble spécifique d'ensoleillement et température ;
- tension à vide V_{oc_cell} : C'est la tension de la borne de cellule à vide qui produit le courant $I=0$. Ignorez le courant traversant la résistance parallèle R_{sh} , les V_{oc} s'obtient en branchant directement un voltmètre aux bornes de la cellule ;
- Courant de court-circuit I_{sc_cell} : C'est le courant maximum généré lorsque la cellule est en court-circuit $V = 0$ sous un éclairage "plein soleil" ;
- La puissance de sortie maximale par cellule P_{max_Cell} est le point de corde (V_{mp} , I_{mp}) donné par le produit entre la tension et le courant à la lumière du soleil et des conditions de température bien définies comme indiqué par la formule suivante;

$$P_{max_Cell} = V_{mp} \times I_{mp}. \quad (I.4)$$

- Rendement maximal : Le rendement est le rapport entre la puissance maximale et la puissance du flux lumineux incident (la surface S de la cellule multiplier par l'éclairement G) ;

$$\eta_{pv} = \frac{P_{max_Cell}}{S \times G} \quad (I.5)$$

- Facteur de forme : On identifié le facteur de forme, par le rapport de la puissance maximale au produit du courant de court-circuit et de la tension du circuit ouvert.

$$FF = \frac{P_{max_Cell}}{V_{oc_cell} \times I_{sc_cell}} \quad (I.6)$$

I.4.6.1 Caractéristiques des panneaux solaires utilisés

Le panneau MSX-60W a les caractéristiques électriques et mécaniques présenté dans les tableaux suivant (Tableau I.2).

Tableau L2 – Caractéristiques des panneaux solaires utilisés.

Maximum power P_{\max}	60W
Maximum power voltage V_{mp}	17.1 V
Maximum power current I_{mp}	3.5 A
Short circuit current I_{sc}	3.8 A
Open circuit voltage V_{oc}	21.1 V

I.5 Module photovoltaïque

Un module représenté par La Figure I.14 est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou en parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électriques désirées tels que la puissance, le courant de court-circuit ou la tension en circuit ouvert [32].



Figure I.14– Module (panneau) photovoltaïque.

I.5.1 Constitution d'un module de photovoltaïque

Un module solaire photovoltaïque est composé généralement de six éléments (Figure I.15) [37] :

- Cadre en aluminium ;
- Joint pour fixer le module ;
- Verre : pour la protection du module ;
- Couche de l'EVA (EVA : éthylène-acétate de vinyle) : pour résister aux intempéries et à l'humidité ;
- Cellules photovoltaïque ;
- Feuille de Tedlar blanc : pour plus de résistance mécanique des grands modules.

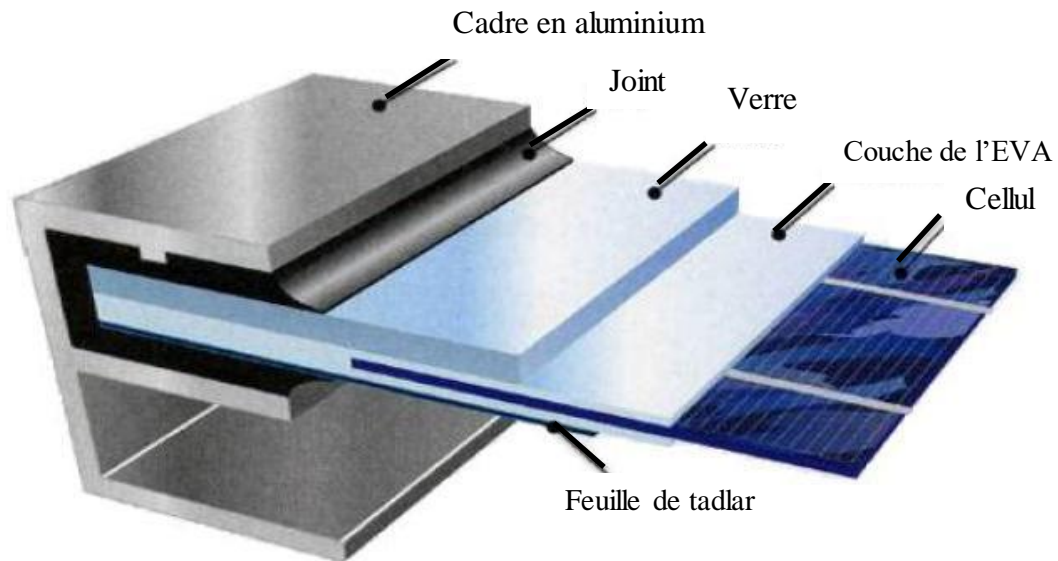


Figure I.15– Composition d'un module solaire photovoltaïque.

I.6 Générateur photovoltaïque

Pour obtenir des puissances supérieures il est nécessaire d'associer en série et /ou en parallèle plusieurs modules comme le montre la Figure I.16. La courbe de fonctionnement d'une association série-parallèle des modules est une courbe semblable à la courbe de la cellule de base, avec bien entendu des paramètres électriques différents. Notons ici que, de même pour les cellules, il ne faudra associer en série et en parallèle que des modules identiques [20] [38] [39].

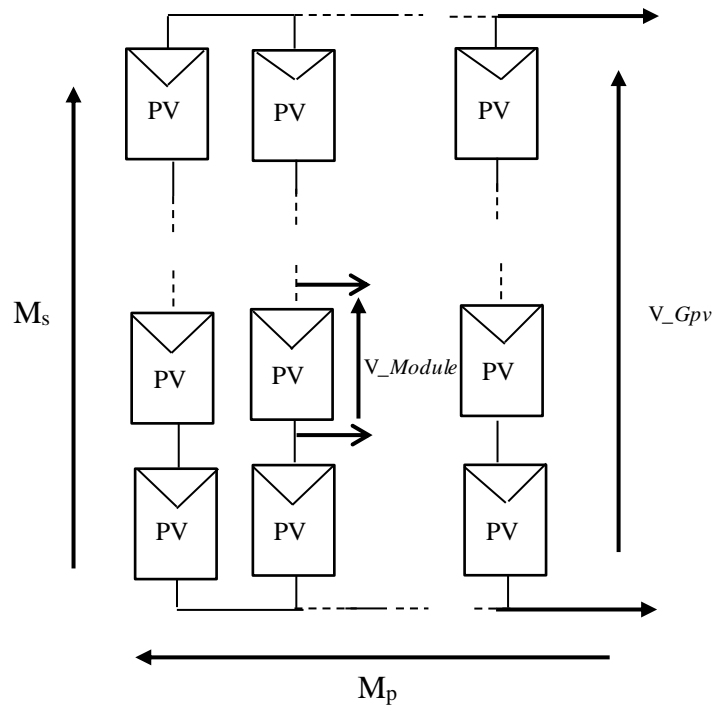


Figure I.16– Modules photovoltaïques connectés en série et en parallèle.

I.6.1 Protections classiques d'un générateur photovoltaïque

Lorsque nous concevons une installation photovoltaïque, nous devons assurer la protection électrique de cette installation afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leur fonctionnement en cas d'ombrage.

Pour cela, deux types de protections sont classiquement utilisés dans les installations actuelles :

- la protection en cas de connexion en parallèle de modules photovoltaïques pour éviter les courants négatifs dans le générateur photovoltaïque (diode anti-retour) ;
- la protection lors de la mise en série de modules photovoltaïques permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (diode bypass) et éviter les points chauds.

La Figure I.17 montre la schématique classiquement adoptée pour la protection du GPV élémentaire [3].

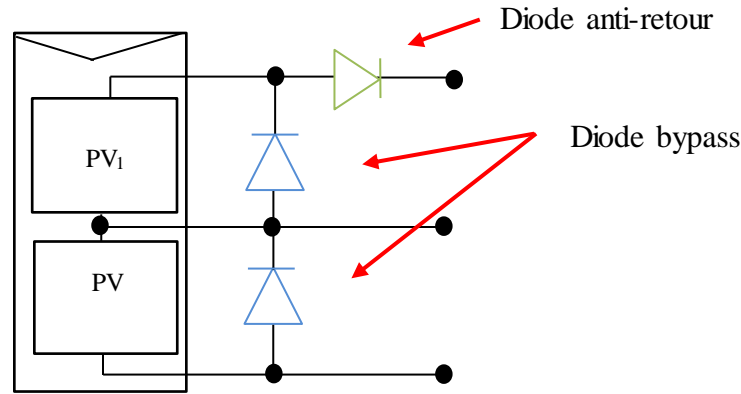


Figure I.17– Schématisation d'un générateur photovoltaïque élémentaire avec diodes bypass et diode anti-retour.

I.6.2 Comportement d'un module photovoltaïque

I.6.2.1 Influence de la température sur le rendement des cellules

La Figure I.18 présente la courbe $I(V)$ pour différents températures de fonctionnement du module photovoltaïque à une irradiation constant, l'influence de la température se traduit principalement par une diminution de la tension de circuit ouvert (et une très légère augmentation du courant de court-circuit). Par conséquent la puissance maximale du générateur subit une diminution. De plus une forte température peut également endommager les cellules.

I.6.2.2 Influence du rayonnement sur le rendement des cellules

La Figure I.19 représente la caractéristique $I=f(V)$ d'un module photovoltaïque pour une température constante et un éclairage variable. On constate que le courant de court-circuites directement proportionnel à l'éclairage, mais par contre la tension varie légèrement.

Plus l'irradiation est importante, plus le rendement de la cellule est élevé.

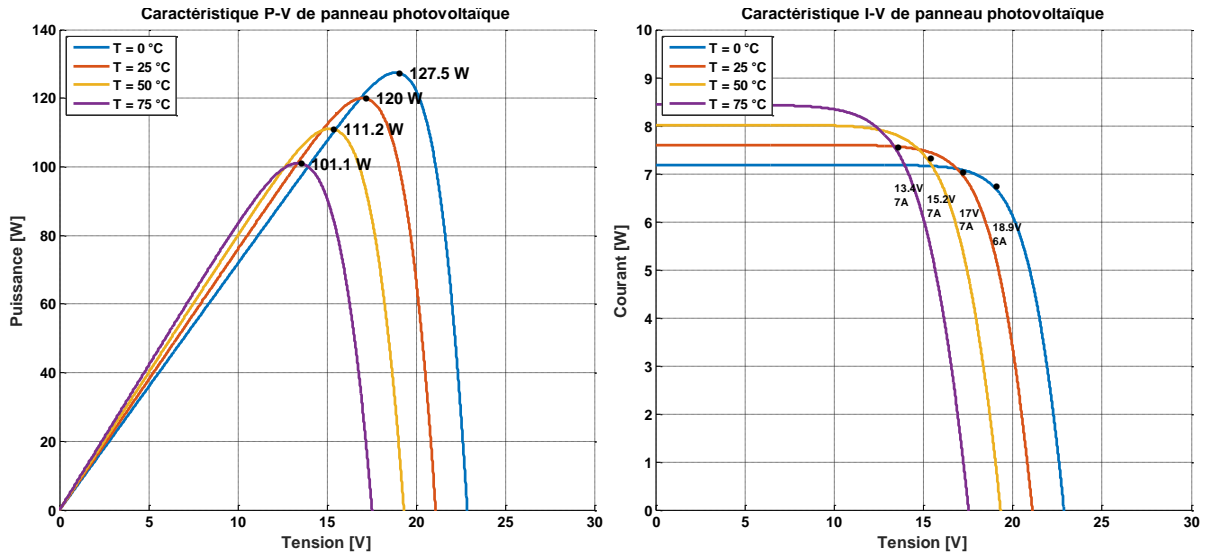


Figure L18– Influence de la température T sur le rendement des cellules.

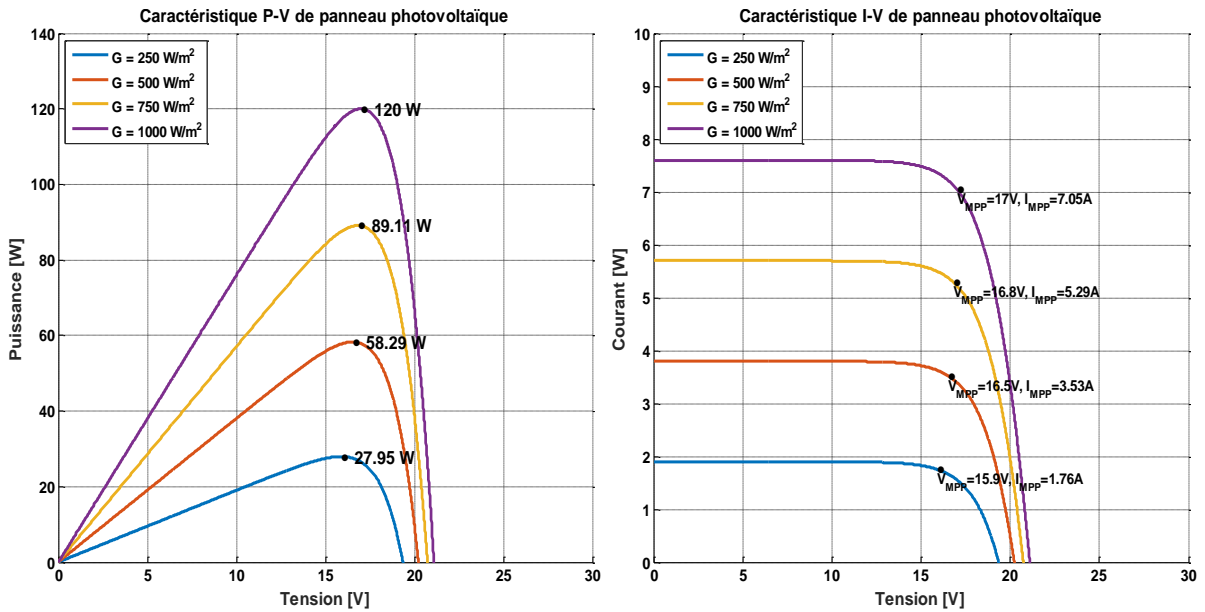


Figure L19– Influence de l'éclairement G sur le rendement des cellules, $T = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$.

I.7 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

Les systèmes photovoltaïques présentent un grand nombre d'avantages et d'inconvénients qui sont :

I.7.1 Avantage

Les systèmes photovoltaïques ont plusieurs avantages :

- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé ;
- une haute fiabilité car l'installation ne comporte pas de pièces mobiles ;
- le système modulaire de panneaux photovoltaïques permet un montage adaptable à des besoins énergétiques variés ; les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications allant du milliwatt au Méga Watt ;
- la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologiques car le produit est non polluant, silencieux, et n'entraîne aucune perturbation du milieu [5] [21] [23] [40] ;
- ils ont une longue durée de vie [21] [23] ;
- les frais et les risques de transport des énergies fossiles sont éliminés [21].

I.7.2 Inconvénients

- la fabrication des modules photovoltaïques relève de la haute technologie, ce qui rend le coût très élevé [5] [21] [23] [40] ;
- le rendement réel d'un module photovoltaïque est de l'ordre de 10 à 15 % [42] ;
- ils sont tributaires des conditions météorologiques [21] [41] ;
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes [5] [23] [43] ;
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru [41].

I.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté rappelé quelques notions de énergie renouvelable (éolienne, géothermique, biomasse, hydraulique solaire) en considérant que l'énergie solaire est l'énergie de future.

Et nous avons étudié, principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par cellule photovoltaïque, ainsi Les types des cellules photovoltaïques, caractéristiques cellule PV, association de module PV, chaine conversions de cellule PV et présenter le Constitution et caractéristiques d'un module de photovoltaïque.

Chapitre II. Modélisation et commande d'un système photovoltaïque

Chapitre II. Modélisation et commande d'un système photovoltaïque

II.1 Introduction

Afin de surmonter le problème d'efficacité des panneaux solaires et d'obtenir une efficacité maximale, il est nécessaire d'optimiser la conception de toutes les parties du système photovoltaïque. De plus, il est nécessaire d'optimiser le convertisseur DC-DC utilisé comme interface entre le générateur PV et la charge afin d'extraire en permanence la puissance maximale, afin que le GPV puisse fonctionner à son point de puissance maximale (PPM) et l'énergie les pertes transmises par le contrôleur MPPT sont plus faibles, importantes, de sorte que la puissance maximale peut être obtenue dans des conditions de charge et atmosphériques variables (luminosité et température).

Un nombre important de technique de commande MPPT ont été élaboré depuis les années 70, commençant par des techniques simples comme les contrôleurs MPPT basés sur le retour d'état de la tension et du courant, aux contrôleurs plus performants utilisant des algorithmes pour calculer le PPM du GPV, parmi les techniques les plus utilisées nous avons la méthode Perturbation et Observation (P&O).

Dans ce chapitre l'étude sera focalisée principalement la modélisation et simulation sur un générateur photovoltaïque et le convertisseur DC-DC de type boost.

II.2 Connexion directe générateur photovoltaïque-charge

Le point de fonctionnement du GPV raccordé à une charge à courant-continu (DC) quelconque résulte de l'intersection de la caractéristique (I-V) du GPV et la caractéristique (V-I) de la charge DC.

Actuellement, il reste encore beaucoup d'applications où une connexion directe entre un GPV et une charge est effectuée. Ce choix est principalement lié à la simplicité de l'opération et au très haut degré de fiabilité [23].

La configuration d'une connexion directe du générateur photovoltaïque (GPV) et la charge par le biais d'une diode anti-retour est illustrée sur la Figure II.1. Dans le cas où, la charge est une batterie, lorsque le module n'est pas éclairé, celui-ci pourrait fonctionner en tant que récepteur. La batterie pourrait donc se décharger sur le GPV et entraîner par conséquent un endommagement irréversible. De ce fait, pour éviter cette situation, la connexion doit être assurée à l'aide d'une diode anti-retour placée entre le GPV et la charge. L'inconvénient de

cette configuration, est qu'elle n'offre aucun type de limitation et/ou réglage de la tension de la batterie. Le transfert de P_{\max} disponible aux bornes du GPV vers la charge n'est pas non plus garanti [5].

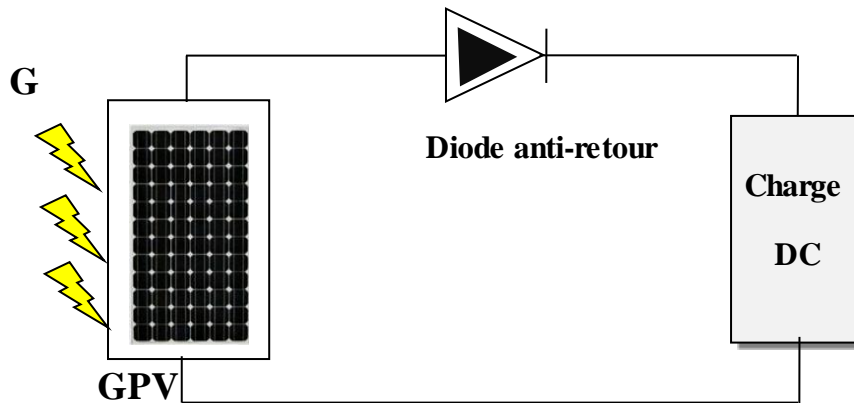


Figure II.1– Connexion directe GPV-Charge par le biais d'une diode anti-retour.

Trois types de charges DC typiques existent : une charge purement résistive, une charge capacitive de type source de tension et une charge inductive de type source de courant. Sur la Figure II.2, nous avons représenté les caractéristiques (I-V) et (P-V) d'un GPV ainsi que les caractéristiques (I-V) de ces trois types de charge. Tout d'abord, nous pouvons identifier le point de fonctionnement où la puissance fournie par le générateur est maximale (P_{\max}) pour un courant optimal (I_{opt}) et une tension optimale (V_{opt}), point nommé PPM. Ensuite, nous pouvons trouver le point d'intersection entre les caractéristiques (I-V) du générateur et celles des trois types de charges :

- point A pour une charge résistive ;
- point B pour une charge de type source de tension ;
- point C pour une charge en source de courant.

Pour ces trois points, la puissance fournie par le générateur est respectivement P_A , P_B et P_C correspondant à des valeurs de puissance inférieures à la puissance maximale disponible P_{\max} . Comme les points A, B, C sont loin du point PPM pour un éclairage et température

Donnés, une perte d'une partie de la puissance dé livrable aux bornes du générateur PV implique des pertes de production énergétiques importantes [42] [43].

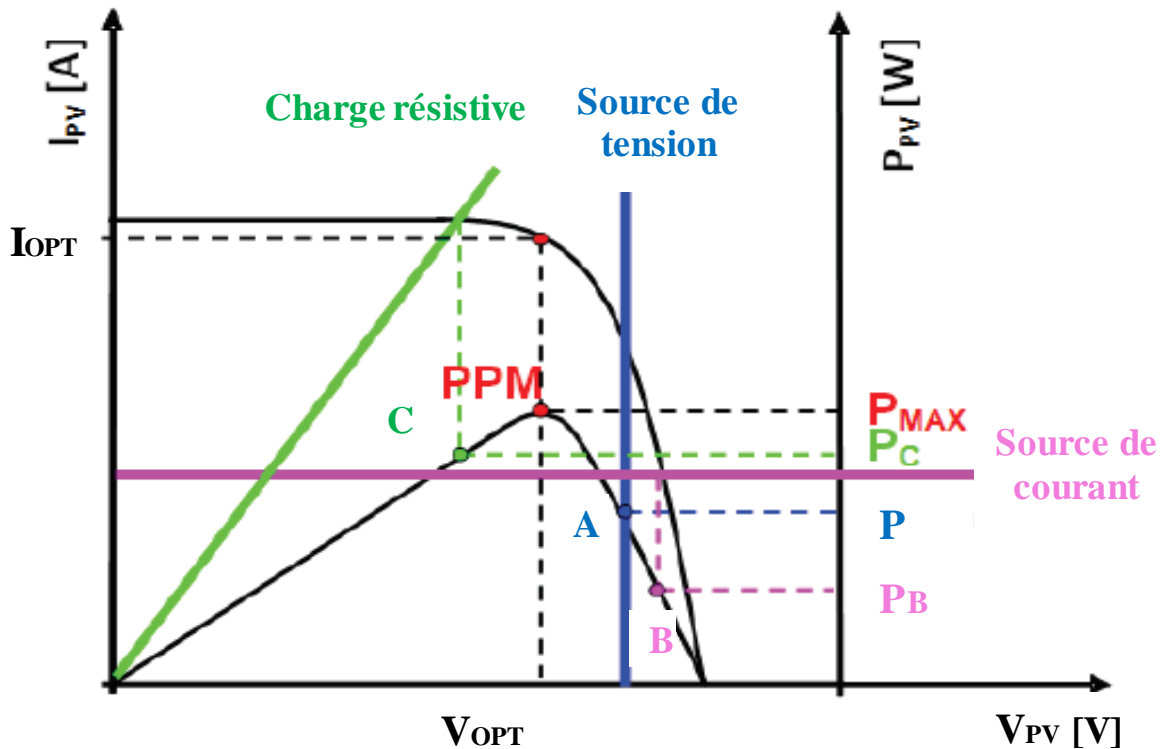


Figure II.2– Points de fonctionnement d'un GPV en fonction de la charge en connexion directe.

II.2.1 Étage d'Adaptation entre un Générateur PV et une Charge

Le GPV présente des caractéristiques (I-V) non linéaires avec des PPM (points de puissance maximale). Ces caractéristiques dépendent entre autre du niveau d'éclairement et de la température de la cellule. De plus, selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le GPV débite, nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode connexion directe. Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le GPV et la charge comme décrit dans la Figure II.3. Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle.

Le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de P_{\max} disponible [7] [44] [45].

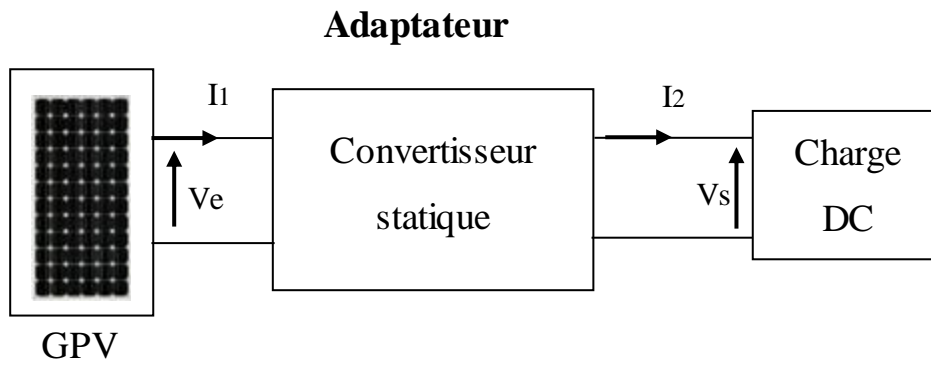


Figure II.3– Connexion d'un GPV à une charge à travers un étage d'adaptation.

II.2.2 Modélisation d'un générateur photovoltaïque

II.2.2.1 Cas d'une cellule réelle

Une cellule solaire est représentée dans la littérature par plusieurs modèles, chacun d'eux est régi par une expression mathématique entre le courant et la tension en fonction des paramètres technologiques de la cellule.

Présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque sous éclairage. Il correspond à un générateur de courant I_{ph} monté en parallèle avec une diode. Deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma (Figure II.4).

Ces résistances ont une certaine influence sur la caractéristique $I=f(V)$ de la cellule.

- La résistance montée en série (R_s) représente la résistance de contacte et de connexion ;
- La résistance shunt (R_p) montée en parallèle représente le courant de fuite ;
- Une diode en parallèle qui modélise la jonction PN.

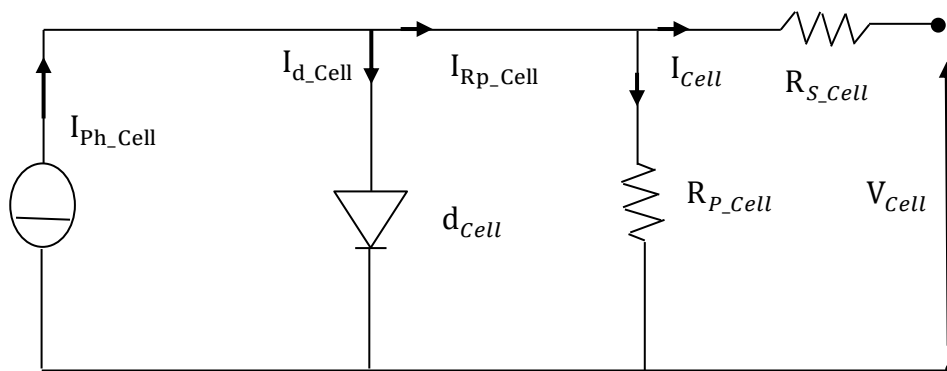


Figure II.4– Circuit électrique du modèle d'une cellule photovoltaïque.

Par l'application de la loi des nœuds on trouve :

$$I_{Cell} = I_{Ph_Cell} - I_{d_Cell} - I_{Rp_Cell} \quad (II.1)$$

Avec:

$$I_{d_Cell} = I_0 \cdot \left[e^{\frac{V_{Cell} + R_{S_Cell} \cdot I_{Cell}}{\frac{nkT}{q}}} - 1 \right] \quad (II.2)$$

Où I_0 est le courant de saturation inverse de la diode d_{Cell} .

Donc le courant de la cellule est donné par l'équation suivante :

$$I_{Cell} = I_{Ph_Cell} - I_0 \cdot \left[e^{\frac{V_{Cell} + R_{S_Cell} \cdot I_{Cell}}{\frac{nkT}{q}}} - 1 \right] - \frac{V_{Cell} + R_{S_Cell} \times I_{Cell}}{R_{P_Cell}} \quad (II.3)$$

Où :

- I_{Cell} : Le courant fourni par la cellule ;
- I_{Ph_Cell} : le photon courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température (ou bien courant de court-circuit) (A);
- q : La charge d'électron ($q = 1.6 \times 10^{-19} C$) ;
- K : la constant de boltzmann ($1.381 \cdot 10^{-23} j/k$) ;
- T : La température effective de la cellule en kelvin ($^{\circ}K$) ;
- n : Les coefficients d'idéalité de la jonction PN.

II.2.2.2 Cas d'un générateur photovoltaïque

Le modèle d'un générateur photovoltaïque (GPV) peut être représenté par le circuit équivalent de la Figure II.5.

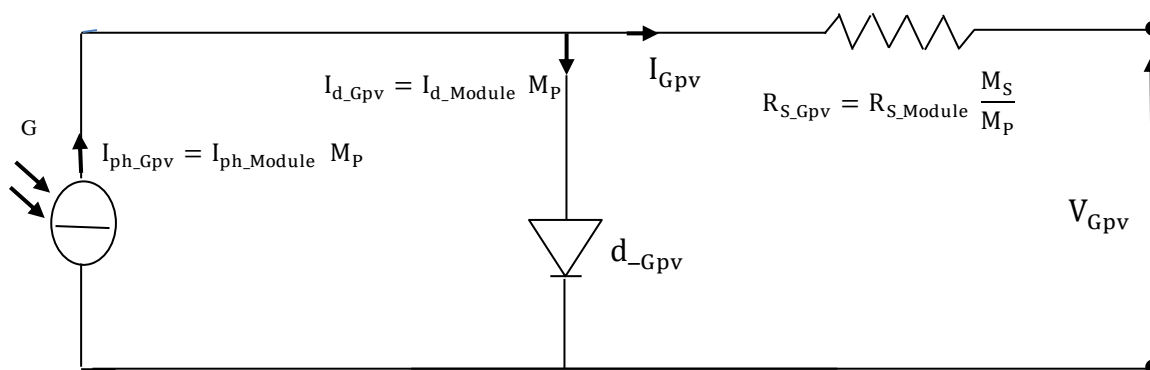


Figure II.5– Circuit équivalent du modèle d'un générateur photovoltaïque.

Si on admet que le générateur photovoltaïque contient M_S modules en série et M_P modules en parallèle, et chaque module contient N_S cellules en série et N_P cellules en parallèle, alors le modèle mathématique peut être développé de la même manière que le module photovoltaïque.

En effet, le courant délivré par le générateur photovoltaïque est donné par :

$$I_{Gpv} = I_{ph_Gpv} - I_{d_Gpv} \quad (II.4)$$

Les relations entre les grandeurs du générateur et celles du module sont :

$$\begin{cases} I_{ph_Gpv} = I_{ph_Module} M_P \\ I_{d_Gpv} = I_{d_Module} M_P \end{cases} \quad (II.5)$$

L'expression du courant débité par l'association de plusieurs cellules photovoltaïques en série/parallèle est définie par l'équation suivante :

$$I_{Gpv} = N_p \cdot \left(I_{Gpv} - I_{sat} \cdot \left[e^{\frac{qF}{nkT}} - 1 \right] - \frac{F}{R_p} \right), \text{ avec : } F = \frac{V_{Gpv}}{N_s} + \frac{R_s I_{Gpv}}{N_p} \quad (II.6)$$

II.3 Convertisseurs DC-DC

Les convertisseurs DC/DC sont des circuits électriques servant à transformer une tension continue en une autre tension continue avec un rapport de transformation bien défini.

$$k = V_e / V_s \quad (II.7)$$

Avec V_s la tension de sortie, V_e la tension d'entrée, K le rapport de transformation.

Il peut être supérieur à l'unité, dans ce cas on dit que le convertisseur est dit élévateur (survolteur). Comme il peut être inférieur à l'unité, et dans ce cas il est dit abaisseur (dévolteur).

En réalité la tension V_e est la tension fournie par les panneaux solaires, et la tension V_s est celle qui doit alimenter la charge [46].

Les convertisseurs continu-continu sont devenus une composante essentielle surtout dans l'électronique embarquée et dans d'autres applications industrielles. Grâce à leurs faibles poids et leurs rendements de plus en plus élevés, leurs faibles encombrements ainsi que et leurs coûts réduits, ils ont remplacé les alimentations classiques linéaires, même pour de faibles niveaux de puissance.

Les hacheurs sont des convertisseurs du type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé [15].

Pour la conversion de puissance, il est essentiel que le rendement soit maintenu élevé pour éviter la dissipation de la puissance et pour éviter les échauffements excessifs dans les composants électroniques. Pour cette raison toute la conversion de puissance échangée doit être réalisée autour des composants de stockage d'énergie (inductance et condensateurs) et les commutateurs. Les commutateurs de puissance utilisés dépendent du niveau de la puissance à convertir ou à commander. Les MOSFETS (transistors à effet de champ d'oxyde de métal) sont habituellement utilisés à la puissance relativement basse (quelques kW) et les IGBTs (transistors bipolaires à gâchette isolée) à des puissances plus élevées. Les thyristors ont été généralement utilisés et acceptés dans les plus hauts niveaux de puissance [47].

La Figure II.6 montre la représentation d'un convertisseur DC-DC, qui peut être utilisé comme interface entre la source et la charge [48].

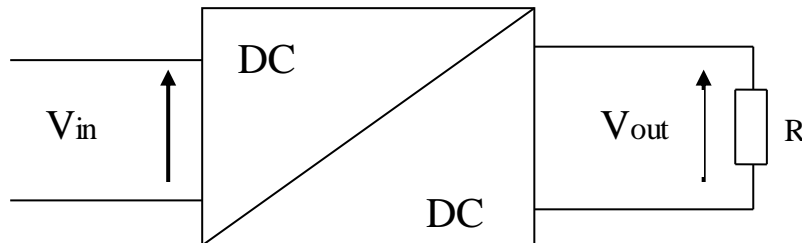


Figure II.6– Convertisseur DC/DC.

II.3.1 Le rôle des convertisseurs DC-DC

Le rôle du convertisseur DC-DC (dans le cadre du PV) est de faire une adaptation entre la source (GPV) et la charge pour avoir un transfert maximal de puissance. Ceci est possible en maintenant le point de fonctionnement sur ou assez proche du MPP pour n'importe quelles conditions de fonctionnement (rayonnement, température, caractéristique de charge, etc.). Contrairement au cas général où le convertisseur DC-DC est utilisé pour réguler la tension de sortie, ici c'est plutôt la tension d'entrée qui est régulée.

II.3.2 Types des convertisseurs DC-DC

Les convertisseurs DC-DC sont de plusieurs topologies. Ils sont classés par catégorie selon la topologie isolée ou non isolée [49].

➤ **Les topologies isolées de la source :**

Elles sont très employées souvent dans les alimentations à découpage, et qui emploient un transformateur d'isolement fonctionnant à haute fréquence. Les topologies les plus connues dans la majorité des applications sont le Flyback, en demi-point et en pont complet. Dans les applications photovoltaïques, les systèmes de couplage avec le réseau électrique emploient souvent ces types de topologies quand l'isolement électrique est préféré pour des raisons de sûreté.

➤ **Les topologies non isolées de la source :**

Ne comportent pas de transformateurs d'isolement. Elles sont généralement utilisées dans l'entraînement des moteurs à courant continu.

On peut classer les convertisseurs de type non isolé selon le niveau de tension de sortie sous trois catégories principales :

- Convertisseur élévateur (Boost) ;
- Convertisseur abaisseur (Buck) ;
- Convertisseur abaisseur-élévateur (Buck-Boost).

La topologie Buck est employée pour les faibles tensions. Dans les applications PV, le Convertisseur buck est habituellement employé dans des systèmes de pompage de l'eau mais aussi comme chargeur de batteries.

La topologie boost est employée pour augmenter la tension. Les systèmes de production de l'énergie emploient un convertisseur boost pour augmenter la tension de sortie au niveau du service avant l'étage de l'onduleur. Puis, il y a des topologies capables d'augmenter et de diminuer la tension telles que le buck-boost. Les convertisseurs DC-DC peuvent être vus comme des transformateurs DC-DC [50] [51].

Le Tableau II.1 résume les principaux rapports de transformation en fonction du rapport cyclique pour les différentes structures de convertisseurs statiques, où D désigne le rapport cyclique du convertisseur [50].

Tableau II.1 – Rapports de transformation des principaux convertisseurs DC-DC.

Convertisseurs	Rapport de transformation en fonction de D
Buck	D
Boost	$\frac{1}{1 - D}$
Buck-Boost	$\frac{-D}{(1 - D)}$

Le Tableau II.2 représenté la complexité de chaque type de convertisseur [17].

Tableau II.2 – Type des convertisseurs DC/DC.

Type	Fonction	Interrupteur	Diode	Transformateur	Complexité
Buck	<i>Abaisseur</i>	1	1	<i>Non</i>	<i>Faible</i>
Boost	<i>Elévateur</i>	1	1	<i>Non</i>	<i>Faible</i>
Buck-Boost	<i>Abaisseur/Elévateur</i>	1	1	<i>Non</i>	<i>Faible</i>
Half Forward	<i>Abaisseur/Elévateur</i>	1	1	<i>Oui</i>	<i>Moyenne</i>
Flyback	<i>Abaisseur/Elévateur</i>	1	1	<i>Oui</i>	<i>Moyenne</i>
Push pull	<i>Abaisseur/Elévateur</i>	2	2	<i>Oui</i>	<i>Forte</i>
Half bridge	<i>Abaisseur/Elévateur</i>	2	4	<i>Oui</i>	<i>Forte</i>
Full bridge	<i>Abaisseur/Elévateur</i>	4	4	<i>Oui</i>	<i>Très forte</i>

Trois topologies de base de circuit de conversion seront décrites dans les paragraphes suivants (DC-DC) : Dans cette partie nous présentons le principe des trois types de convertisseurs DC-DC (Buck, Boost et Buck-Boost), utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités.

Dans ce chapitre, on s'intéresse particulièrement au convertisseur statique continu-continu de type boost, connu par son caractère élévateur de tension.

II.4 Le convertisseur boost (hacheur survolteur)

Un convertisseur boost, ou hacheur parallèle, est une alimentation à découpage permettant d'augmenter la tension fournie et diminuer ainsi, le nombre d'éléments nécessaires pour atteindre le niveau de tension désiré. Donc les systèmes de production de l'énergie emploient un convertisseur boost pour augmenter la tension de sortie au niveau du service avant l'étage de l'onduleur [49].

Dans la littérature, le hacheur boost lui-même est divisé en quatre structures principales, comme le montre la Figure II.7. En fait, lorsque le courant d'entrée est plus important (il peut s'agir d'un boîtier source composé de plusieurs panneaux parallèles ou parallèles, on peut le faire entrer). Source de pile à combustible) divise le courant d'entrée en connectant deux batteries de base ou plus en parallèle (Figure II.7-b). Ceci permet de réduire la limite de courant des interrupteurs (transistors et diodes) constituant la structure du convertisseur. Il est également possible de réduire la contrainte de traction en plaçant deux ou plusieurs unités de base en série (figure II.7-c) [52].

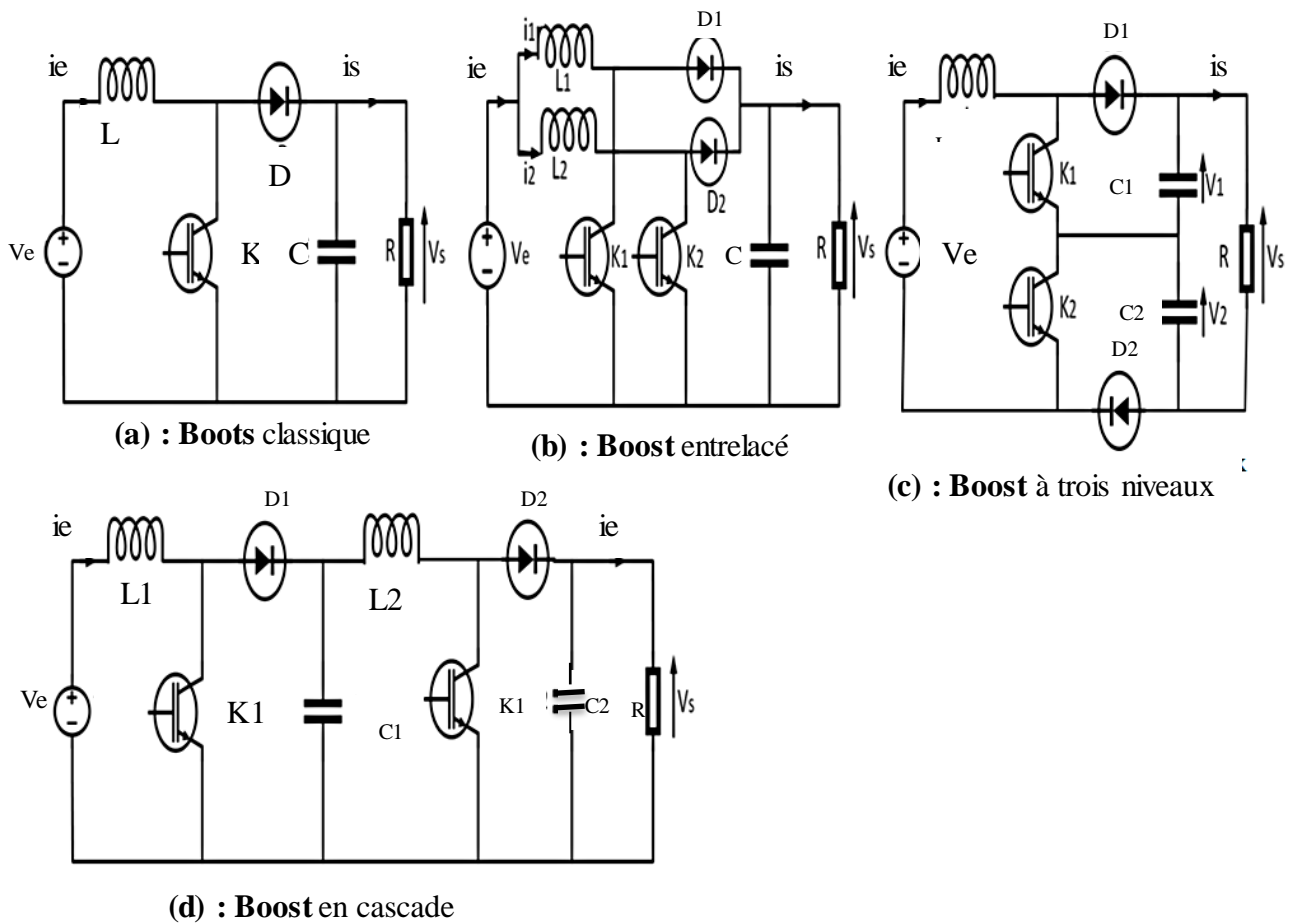


Figure II.7– Différentes topologies du convertisseur Boost.

II.4.1 Boost classique

Le convertisseur boost de base est illustré à la Figure II.7-a. Compte tenu du nombre de composants mis en jeu, l'avantage de ce convertisseur est qu'il est plus facile à contrôler par rapport à d'autres structures. Cependant, si la puissance est augmentée, cet agencement présente des inconvénients majeurs : des limitations de tension et de courant et une forte ondulation du courant d'entrée et de la tension de sortie à la fréquence de commutation. En fait, dans l'état "OFF", l'interrupteur doit empêcher une tension de sortie totale trop élevée, et dans l'état "ON", l'interrupteur doit également supporter la totalité du courant d'entrée. Ces deux conditions affecteront le prix des composants électroniques, et donc le prix des convertisseurs [53].

II.4.2 Boost entrelacé

Le Boost entrelacé est utilisé de nos jours dans plusieurs domaines d'application dits basse tension/fort courant. Par exemple, les applications VRM (Voltage Régulation Module) qui assure l'alimentation des cartes microprocesseurs et leurs périphériques. Les applications de moyenne et forte puissance telles que le système de secours à alimentation sans interruption (ASI) utilisent aussi ce type de convertisseur. Il en est de même pour les applications dédiées aux énergies embarquées (Véhicule électrique et hybride, avionique, tramway, naval etc.) [54].

La structure de ce type de convertisseur est formée par l'association en parallèle de deux ou plusieurs cellules élémentaires. Cette mise en parallèle permet de partager le courant entre les différentes cellules. Dans le cas où deux cellules sont mises en parallèle, le schéma du boost entrelacé est donné à la Figure II.7-b. Dans cette structure, chaque cellule élémentaire est commandée avec le même rapport cyclique α et les commandes sont décalées d'un temps égal à la période de découpage divisé par le nombre de cellules de commutations (q). Dans ce cas, le courant traversant chaque cellule est divisé par q . On réduit ainsi, les contraintes en courant subies par les interrupteurs. Un autre avantage de ce montage est la diminution de l'ondulation du courant d'entrée. Ceci permet de réduire le volume du filtrage et ainsi miniaturiser l'ensemble convertisseur-filtre de sortie. Cela permet également d'une part, d'améliorer la dynamique du convertisseur (d'autant plus qu'on peut même choisir des MOSFETS et profiter de leurs performances en rapidité) et de réduire le coût global de la fabrication du convertisseur boost d'autre part. Cependant, cette structure présente l'inconvénient dû au nombre de composants utilisés pour la fabrication du convertisseur et au problème d'équilibrage des courants traversant les différentes cellules élémentaires [52].

II.4.3 Boost à trois niveaux de tension

Une autre variante de ce montage peut être considérée, elle est issue du convertisseur élévateur dit trois niveaux (en référence aux niveaux de tension imposés aux bornes de l'inductance), permet de diviser par 2 les contraintes en tension subies par les interrupteurs

Le Boost à trois niveaux est indiqué à la Figure II.7-c.

Ce convertisseur utilise une seule inductance mais deux interrupteurs commandés, deux diodes et deux condensateurs. L'intérêt de ce montage est de diviser par deux les contraintes en tension des interrupteurs. Ces interrupteurs sont, comme dans le boost entrelacé, commandés par le même rapport cyclique mais leurs commandes sont décalées d'une demi-période. Ce convertisseur est également capable de doubler la fréquence apparente du courant d'entrée, ce qui se traduit par une réduction de l'ondulation du courant d'entrée pour une même valeur d'inductance. Les contraintes en courant sur les transistors et les diodes sont identiques à celles d'un boost classique alors que les contraintes en tensions sur les composants semi-conducteurs sont réduites de moitié [51] [55].

II.4.4 Boost en cascade

Le schéma de principe de ce convertisseur est présenté à la Figure II.7-d. Ce convertisseur est obtenu par l'association en cascade de deux boost élémentaires identiques. Il a l'avantage d'un rapport de tension très élevé par rapport aux structures précédentes mais présente l'inconvénient de la difficulté de contrôle due à l'augmentation de l'ordre du système [52].

Tableau II.3 – Résumé de l'étude des différents boost.

Structures	Boost classique	Boost entrelacé (2 cellules)	Boost à trois niveaux (à 2 cellules)	Boost en cascade (2 cellules)	Boost de Nomura
But	élévation de la tension de sortie	- élévation de la tension de sortie - réduction de l'ondulation du courant d'entrée, du poids et du volume du convertisseur	- élévation de la tension de sortie - réduction de l'ondulation du courant d'entrée	- élévation de la tension de sortie - gain en tension élevé	- élévation de la tension de sortie - gain en tension élevé
Nombre des composants	4	7	7	8	8

Contraintes en courant	Importantes	Faibles	Importantes	Importantes	Importantes
Gain en tension	$\frac{1}{1-\alpha}$	$\frac{1}{1-\alpha}$	$\frac{1}{1-\alpha}$	$\frac{1}{1-\alpha_1} \cdot \frac{1}{1-\alpha_2}$	$\frac{1+\alpha}{1-\alpha}$

II.4.4.1 Convertisseur Boost classique

Le convertisseur survolteur est le plus populaire des convertisseurs pour les régulateurs de correction du facteur de puissance, il est caractérisé par le fait que de la tension de sortie est supérieure à la tension d'entrée.

Les hacheurs présentent une partie essentielle dans le dispositif de commande d'un champ photovoltaïque. Ils permettent de délivrer une tension continue variable à partir d'une source de tension continue constante. Dans cette partie, nous allons à présent étudier le montage le plus couramment étudié pour élever une tension continue. Il s'agit du montage boost bien connu sous le nom d'élévateur de tension abaisseur de courant. Le schéma de principe d'un hacheur boost est donné par la Figure II.8.

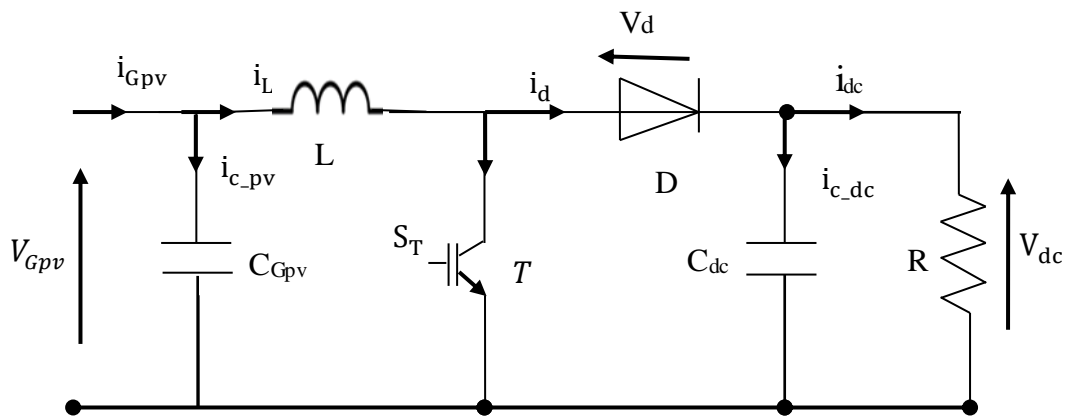


Figure II.8- Schéma de principe d'un hacheur boost.

II.4.4.1.1 Étude du fonctionnement

L'étude qui suit est basée sur les hypothèses suivantes :

- La tension d'alimentation V_{Gpv} est parfaitement continue et constante ;
- La valeur du condensateur C_{dc} est suffisamment grande afin de pouvoir considérer la tension de sortie V_{dc} comme continue et constante ;
- Les composants sont idéaux.

Pendant le fonctionnement du hacheur, le transistor sera commuté à une fréquence constante f_s avec un temps de fermeture $t_{on} = DT_s$ et un temps d'ouvertures $t_{off} = (1-D)T_s$.

Où :

- $T_s = 1/f_s$: est le période de commutation ;
- D : le rapport cyclique du commutateur ($D \in [0, 1]$).

Selon l'état de cet interrupteur, on peut distinguer deux séquences de fonctionnement :

Séquence 1 : lorsque l'interrupteur T est fermé et la diode D est polarisée en inverse ($V_d = -V_{dc}$). Durant cette séquence, le courant traversant l'inductance L_e va augmenter linéairement et une énergie W_L est stockée dans l'inductance L_e . La charge est totalement isolée du champ PV.

Séquence 2 : lorsque l'interrupteur T est ouvert et la diode D est fermée. Durant cette séquence, la charge est reliée directement au champ PV à travers de l'inductance L .

Selon sa capacité de stockage de l'énergie et la durée relative de la période de commutation, on peut distinguer trois régimes de conduction pour le hacheur :

- La conduction continue qui correspond au cas où la courante i_{L_e} traversant l'inductance ne s'annule jamais ;
- La conduction discontinue qui correspond au cas où la courante i_{L_e} traversant l'inductance s'annule avant la prochaine phase active ;
- La conduction critique qui définit la limite entre les deux modes de fonctionnement précédents.

Dans la suite de cette étude seul le régime de conduction continue est envisagé.

II.4.4.1.2 Conduction continue

L'objectif principal de cette partie est de déterminer les relations reliant les grandeurs électriques d'entrée et de sortie du convertisseur ainsi que les formules permettant de dimensionner les différents composants.

Séquence 1 : À l'instant $t = 0$, on ferme l'interrupteur T pendant une durée DT_s . Le courant qui circule dans l'inductance augmente linéairement à partir de sa valeur minimale $i_{L_{min}}$. La tension aux bornes de la diode D est égale à $V_d = -V_{dc}$. La diode est donc bloquée puisque $V_{dc} > 0$. Dans ces conditions, on obtient alors le schéma équivalent de la Figure II.9 La tension aux bornes de l'inductance est alors :

$$V_L = V_{Gpv} = L \frac{di_L}{dt} > 0 \quad (\text{II.8})$$

En résolvant cette équation différentielle, on obtient la formule suivante qui exprime l'évolution du courant traversant l'inductance :

$$i_L = \frac{V_{Gpv}}{L}t + i_{L_{min}} \quad (II.9)$$

Séquence 2 : À l'instant $t = DT_s$, on ouvre l'interrupteur T pendant une durée $T_s (1 - D)$. Pour assurer la continuité du courant, la diode D entre en conduction et le courant de l'inductance diminue linéairement à partir de sa valeur maximale $i_{L_{max}}$. On obtient alors le schéma équivalent de la figure (II.10). La tension aux bornes de l'inductance est alors :

$$V_L = V_{Gpv} - V_s = L \frac{di_L}{dt} < 0 \quad (II.10)$$

En résolvant cette équation différentielle, on obtient la formule suivante qui exprime l'évolution du courant traversant l'inductance :

$$i_L = \frac{V_{Gpv} - V_{dc}}{L} (t - DT_s) + i_{L_{max}} \quad (II.11)$$

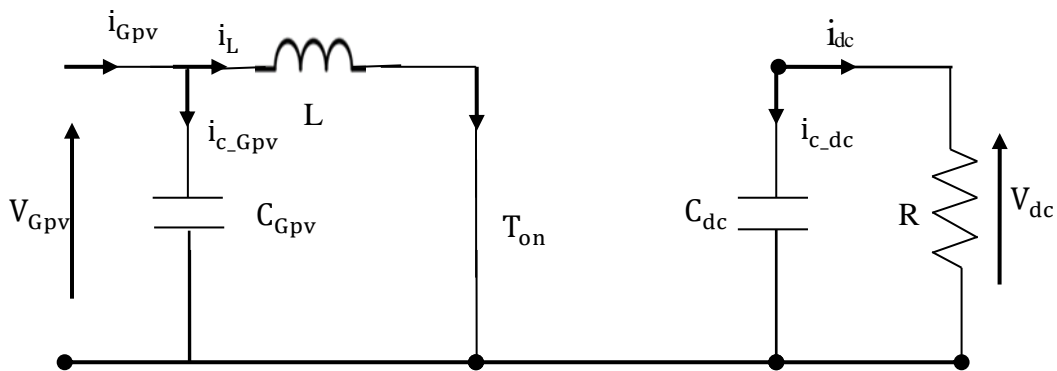


Figure II.9– Circuit équivalents du hacheur boost quand l'interrupteur T est fermé.

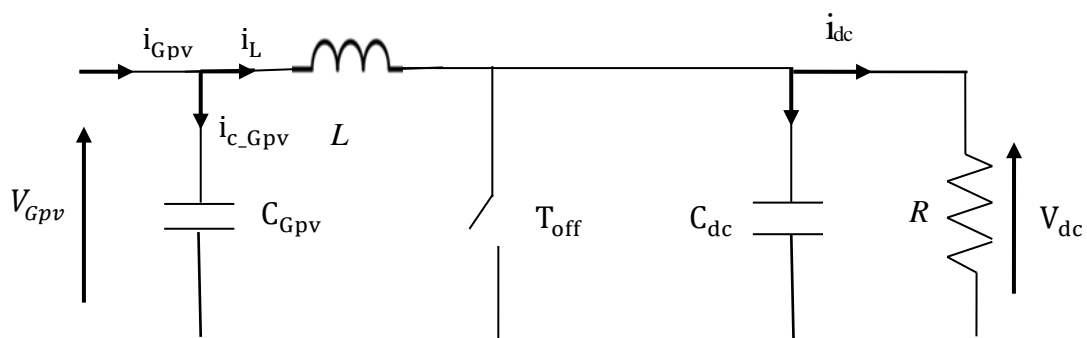


Figure II.10– Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur T est ouvert.

II.4.4.1.3 Formes d'ondes des principaux signaux

Les formes d'ondes des principaux signaux sont données à la Figure II.11. A partir de ces formes d'ondes, on peut exprimer les valeurs moyennes des courants qui traversent la diode D et l'interrupteur T. Nous pouvons également en déduire les ondulations en tension et courant. Ces relations seront utilisées lors du dimensionnement des différents composants de la structure.

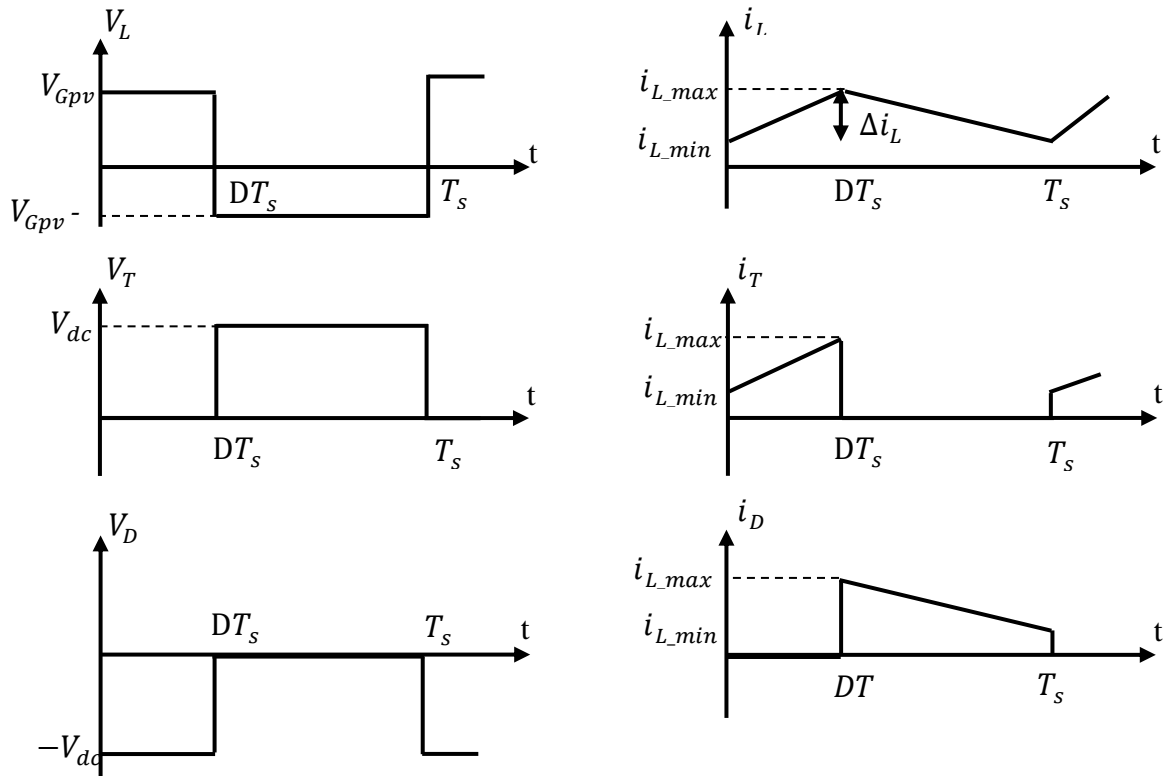


Figure II.11– Formes d'ondes courants/tensions d'un convertisseur boost en mode continu.

II.4.4.1.4 Nature du hacheur boost

Par définition de la valeur moyenne :

$$V_L = \int_0^{T_s} V_L(t) dt = \frac{1}{T_s} \left(\int_0^{DT_s} V_{Gpv} dt + \int_{DT_s}^{T_s} (V_{Gpv} - V_{dc}) dt \right) \quad (\text{II.12})$$

Comme la tension moyenne aux bornes d'une inductance est nulle, on peut écrire :

$$V_L = DV_{Gpv} + (1 - D)(V_{Gpv} - V_{dc}) = 0 \quad (\text{II.13})$$

Finalement, on obtient la relation suivante :

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

Le rapport cyclique α est compris entre 0 et 1 donc la tension de sortie V_{dc} est nécessairement supérieure à la tension d'entrée V_{Gpv} .

Si on néglige les pertes de commutation des interrupteurs, on peut écrire :

$$P_{Gpv} = P_{dc} = i_{Gpv}P_{Gpv} = i_{dc}P_{dc} \quad (\text{II.15})$$

$$i_{dc} = (1 - D)i_{Gpv} \quad (\text{II.16})$$

Cette expression montre que le hacheur boost est abaisseur en courant.

II.4.4.1.5 Condition de conduction continue

A la limite de conduction continue le courant de bobine s'annule à l'instant αT_s , donc sa valeur minimale est nulle ($i_{Lmin} = 0$) et sa valeur moyenne est la moitié de sa valeur maximale ($i_{Lmoy} = \frac{i_{Lmax}}{2}$).

De l'équation (II.17), on trouve :

$$i_{Lmax} = \frac{DV_{Gpv}}{2Lf_s} = \frac{D(1 - D)V_{Gpv}}{2Lf_s} \quad (\text{II.17})$$

En résolvant $\frac{\partial i_{Lmoy}}{\partial \alpha} = 0$, on trouve que le courant moyen dans la bobine i_{Lmoy} est maximal pour $D=0,5$.

La valeur minimale de l'inductance L , qui assure la conduction continue, obéit à l'équation suivante :

$$i_{Lmin} = \frac{V_{Gpv}}{8i_{Lmoy}f_s} \quad (\text{II.18})$$

L'ondulation de courant ΔI_L vérifie la loi d'ohm aux bornes de L pendant le temps T_{ON} ce qui revient à écrire :

$$V_L T_{ON} = L \times \Delta I_L \quad (\text{II.19})$$

Soit donc :

$$\Delta I_L = \frac{V_{Gpv} D}{L f_s} \quad (\text{II.20})$$

A partir de la Figure II.11 on peut calculer l'ondulation de la tension comme suit :

$$\Delta V_{dc} = \frac{I_{Gpv} D(1 - D)}{C_{dc} f_s} \quad (\text{II.21})$$

II.4.4.1.6 Rapport de conversion

A partir de l'équation (II.14), on peut déduire le rapport de conversion du hacheur idéal comme suit :

$$\gamma_c = \frac{V_{dc}}{V_{Gpv}} = \frac{1}{1 - D} \quad (\text{II.22})$$

II.4.4.2 Dimensionnement des composants de le hacheur boost

D'un la Figure II.8 le convertisseur boost est alimenté par la tension du générateur photovoltaïque. Cette tension est égale la tension d'un module au point de puissance maximale multipliée par le nombre des modules en série Ms.

II.4.4.2.1 L'inductance d'entrée

On peut calculer la valeur de l'inductance pour une ondulation donnée pour le courant dans la bobine :

$$L_{Gpv} = \frac{D V_{Gpv}}{\Delta I_{L_{Gpv}} f_s} \quad (\text{II.23})$$

Avec :

- L_{Gpv} : L'inductance du générateur photovoltaïque ;
- V_{Gpv} : La tension du GPV ;
- $\Delta I_{L_{Gpv}}$: La fréquence du système PV ;
- f_s : La fréquence du système PV ;
- D : Rapport cyclique.

II.4.4.2.2 Calcul de la capacité du condensateur de sortie

On peut calcul la valeur de la capacité C_{dc} pour une ondulation imposée à la tension aux bornes du condensateur de sortie, tel que :

$$C_{dc} = \frac{i_{Gpv_moy} D(1 - D)}{\Delta V_S f_S} \quad (II.24)$$

Avec :

- I_{Gpv_moy} : Le courant moyen du GPV ;
- ΔV_{dc} : L'ondulation de tension de la sortie ;
- C_{dc} : Condensateur de sortie du hacheur DC-DC.

II.4.4.2.3 Calcul de la capacité du condensateur d'entrée

La valeur de la capacité du condensateur d'entrée est donnée par :

$$C_{Gpv} = \frac{D i_{Gpv_moy}}{\Delta V_{Gpv} f_S} \quad (II.25)$$

Avec :

ΔV_{Gpv} : L'ondulation de tension du GPV ;

C_{Gpv} : Condensateur de entrée du hacheur DC-DC.

L'ondulation du courant est maximale pour $D = 0.5$. Avec $V_{Gpv} = 17.1$ V, $i_{LGpv} = 3.5$ A et en imposant une ondulation $\Delta i_{LGpv} = 1\% i_{LGpv}$. En choisissant ΔV_{dc} et $\Delta V_{Gpv} = 5\% V_{Gpv}$. $V_{dc} = (1 - D)V_{Gpv}$ La fréquence $f_S = 20$ kHz. Pour $M_S = 1$, et par l'application numérique on trouve :

La valeur de l'inductance de GPV, $L_{Gpv} = 4 \times 10^{-3}$ H.

La valeur de la capacité du condensateur de sortie $C_{GPV} = 20 \times 10^{-6}$ F.

La valeur de la capacité du condensateur d'entrée est $C_{dc} = 47 \times 10^{-6}$ F.

II.4.4.3 Commande MLI du hacheur

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

Une méthode pour réguler la tension de sortie afin d'obtenir une tension moyenne fixe consiste à ajuster en permanence le rapport cyclique de commande de α sans modifier T_s .

Cette méthode qui consiste à faire varier la largeur des impulsions de commande de l'interrupteur est appelée méthode de Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) ou encore PWM (Pulse Width Modulation) [50].

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

- Lorsque $D > V_{ds}$: $S = 1$, l'interrupteur T est fermé (séquence 1) ;
- Lorsque $D < V_{ds}$: $S = 0$, l'interrupteur T_B est ouvert (séquence 2).

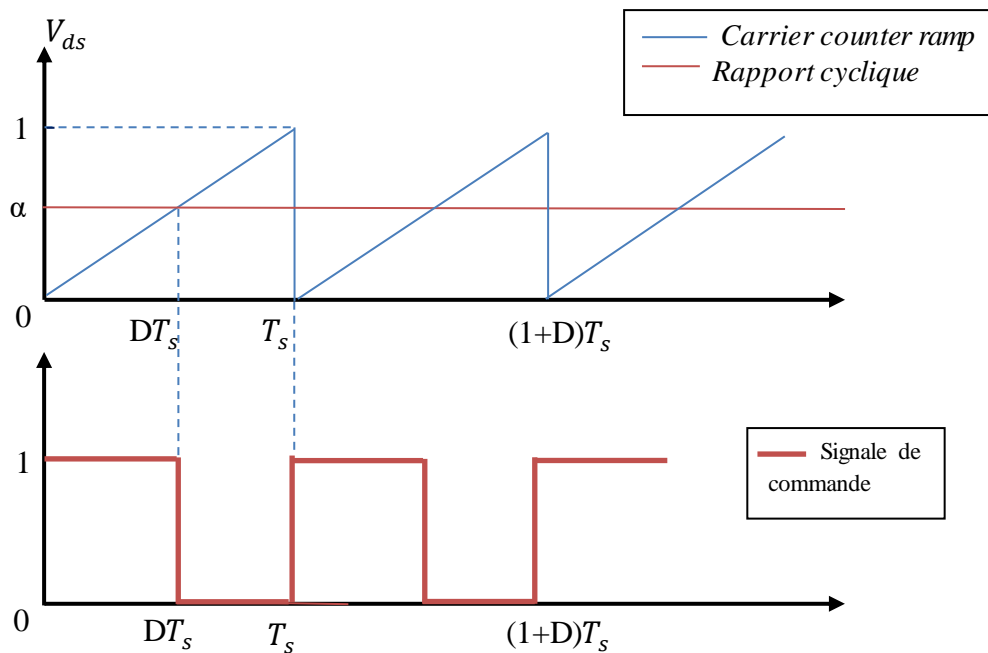


Figure II.12– Principe de la commande MLI.

II.5 Fonctionnement d'un générateur PV à sa Puissance Maximale

II.5.1 Principe

La chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque est donnée le plus souvent par la Figure II.13 ci-après. En plus du GPV et la charge, elle intègre un étage d'adaptation qu'est le convertisseur statique (CS) et un étage de commande MPPT pour la génération du rapport cyclique au composant commandable du (CS) pour l'extraction du maximum de puissance du GPV vers la charge [5] [29].

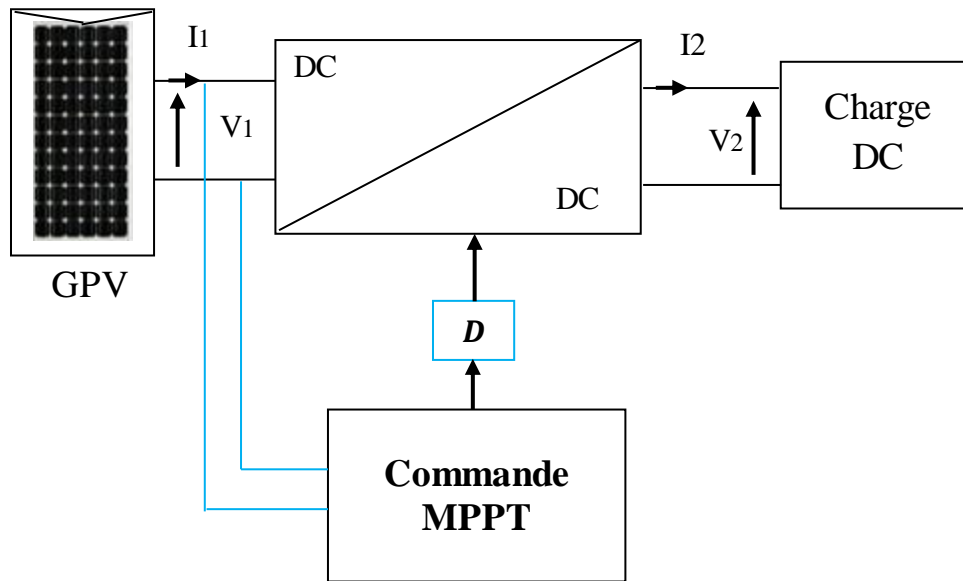


Figure II.13– Chaîne typique de conversion d'énergie photovoltaïque.

II.5.2 Constitution d'une MPPT

La MPPT comprend 2 éléments fondamentaux :

- Convertisseur DC-DC.
- Unité de contrôle.

Pour le convertisseur DC-DC on a utilisé le convertisseur boost qui a été présenté dans le paragraphe (II.4.4.1).

II.5.2.1 Unité de contrôle

L'unité de commande est conçue pour vérifier si l'entrée est effectivement sur le point de puissance maximum par la lecture courant/tension du convertisseur ou du module photovoltaïque, et ajuster le rapport cyclique du convertisseur [56].

II.6 Les commandes MPPT

Diverses publications sur les commandes assurant un fonctionnement de type commande MPPT apparaissent régulièrement dans la littérature depuis 1968, date de publication de la première loi de commande de ce genre, adaptée à une source d'énergie renouvelable de type photovoltaïque [50].

Il existe de nombreuses méthodes et techniques de commande MPPT disponibles dans la littérature dont on cite : Constant Voltage Méthode, Short-Curent Pulse Méthode, Open

Voltage Méthode, Température Méthodes et leurs combinaisons mais les techniques les plus couramment utilisées sont Hill Climbing méthode, Perturb and Observe (P&O) méthode et l'incrément de conductance (IncCon).

II.7 Classification Des Commandes MPPT

Au cours des dernières décennies, de nombreuses méthodes pour trouver le MPP ont été développées. Ces techniques diffèrent dans de nombreux aspects tels que les capteurs nécessaires, la complexité, le coût, la portée de l'efficacité, la vitesse de convergence, le suivi correct lors de l'irradiation et / ou le changement de température, le matériel nécessaire pour la mise en œuvre, entre autres.

La classification des algorithmes du suiveur peut être basée sur la fonction des techniques ou des stratégies de commande utilisées.

Nous pouvons classer d'une manière générale les commandes MPPT selon le type d'implémentation électronique : analogique, numérique ou mixte. Il est cependant plus intéressant de les classer selon le type de recherche qu'elles effectuent et selon les paramètres d'entrée de la commande MPPT [7] [39].

II.7.1 Classification Des Commandes MPPT Selon Les Paramètres D'entrée

A) Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée du CS

Il y a un certain nombre de commandes MPPT qui effectue une recherche du PPM selon l'évolution de la puissance fournie par le GPV. Comme la méthode de Perturbation & Observation, les algorithmes d'incrément de conductance qui utilisent la valeur de la puissance fournie par le GPV pour l'application d'une action de contrôle adéquate pour le suivi du PPM ou bien Les commandes qui sont basé sur des relations de proportionnalité entre les paramètres optimaux caractérisant le point de puissance maximal (V_{OPT} et I_{OPT}) et les paramètres caractéristiques du module PV (V_{OC} et I_{CC}). Notamment, les MPPT inspirées des réseaux de neurones. Dans ces commandes, soit on fait appel à des systèmes à mémoires informatiques importantes ayant stocké tous les cas possibles, soit les commandes sont encore une fois de plus approximatives. Toutes ces commandes ont comme avantages leurs précisions et leur rapidité de réaction.

B) Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie du convertisseur

Dans la littérature, il existe également des algorithmes basés sur les paramètres de sortie des CS. Par exemple Les commandes MPPT basées sur la maximisation du courant de sortie qui sont principalement utilisées quand la charge est une batterie.

Dans tous les systèmes utilisant les paramètres de sortie, une approximation de P_{\max} est faite à travers le rendement du convertisseur. En somme, plus l'étage de conversion est bon, plus cette approximation est valable. Par contre, en général, tous les systèmes avec un seul capteur sont par essence, non précis. La plupart de ces systèmes ont été conçus à l'origine pour le spatial.

II.7.2 Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche

II.7.2.1 MPPT Indirect

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées (I_{SC} ou V_{oc}), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP. Il compte aussi les commandes 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.

II.7.2.2 MPPT Direct

Ce type de commande MPPT détermine le point de fonctionnement optimal (MPP) à partir des courants, tensions ou puissances mesurés dans le système. Il peut donc réagir à des changements imprévisibles du fonctionnement du GPV.

Généralement, ces procédures sont basées sur un algorithme de recherche, avec lequel le maximum de la courbe de puissance est déterminé sans interruption du fonctionnement. Pour cela, la tension du point de fonctionnement est incrémentée dans des intervalles réguliers. Si la puissance de sortie est plus grande, alors la direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée. Le point de fonctionnement réel oscille alors autour du MPP.

Ce principe de base peut être préservé par d'autres algorithmes contre des erreurs d'interprétation. Ces erreurs peuvent survenir, par exemple, à cause d'une mauvaise direction

de recherche, résultant d'une hausse de puissance qui est due à une augmentation rapide du niveau de rayonnement.

La détermination de la valeur de la puissance du générateur PV, 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. 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 [50].

Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de différenciation, la méthode Perturbe & Observe (P&O), la méthode d'optimisation de l'essaim de particules (PSO).

II.8 Les Algorithmes MPPT

Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPT plus ou moins performantes basées sur les propriétés du GPV. Une synthèse des principaux modes de recherche du PPM existants dans ce chapitre nous a permis de bien identifier l'existant et les points qu'il restait à améliorer. Ceci a constitué la base théorique pour nos travaux concernant les simulations dans le chapitre suivant [39]

II.8.1 Perturbation Et Observation

La méthode P&O (P&O, Perturb And Observe) est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Comme son nom l'indique, cette méthode repose sur la perturbation (une augmentation ou une diminution) de la tension V_{ref} , ou du courant I_{ref} , et l'observation de la conséquence de cette perturbation sur la puissance mesurée ($P=VI$). Cependant, la variable idéale qui caractérise le MPP est celle qui varie peu lors d'un changement climatique. La variation du rayonnement affecte davantage le courant que la tension photovoltaïque. Par contre, la variation de la température modifie plus la tension du GPV. Néanmoins, la dynamique de la température est lente et varie sur une plage réduite. Par conséquent, il est préférable de contrôler la tension du GPV [57].

Le principe de commande P&O consiste à provoquer une perturbation de faible valeur sur la tension V_{PV} , ce qui engendre une variation de la puissance. La Figure II.14 montre qu'on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{pv} engendre un accroissement de la puissance P_{pv} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P(V)$, il est alors

facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié[58].

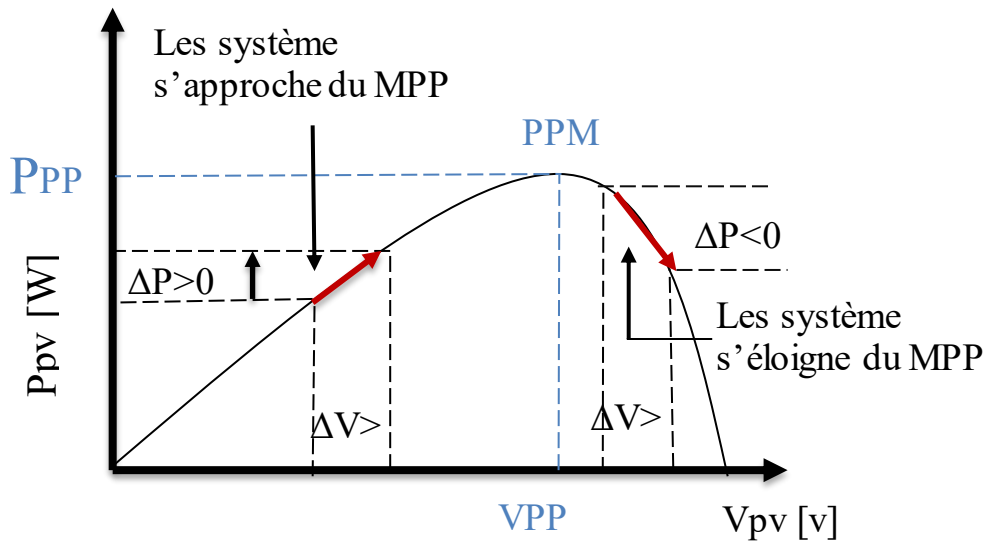


Figure II.14– Recherche du PPM par la méthode (P&O).

A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $p(v)$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié[16].

Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du GPV à chaque instant. L'utilisation d'un microprocesseur est plus appropriée pour la réalisation de la méthode P&O, même si des circuits analogiques peuvent être utilisés [48].

La Figure II.15 représente l'algorithme classique d'une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension.

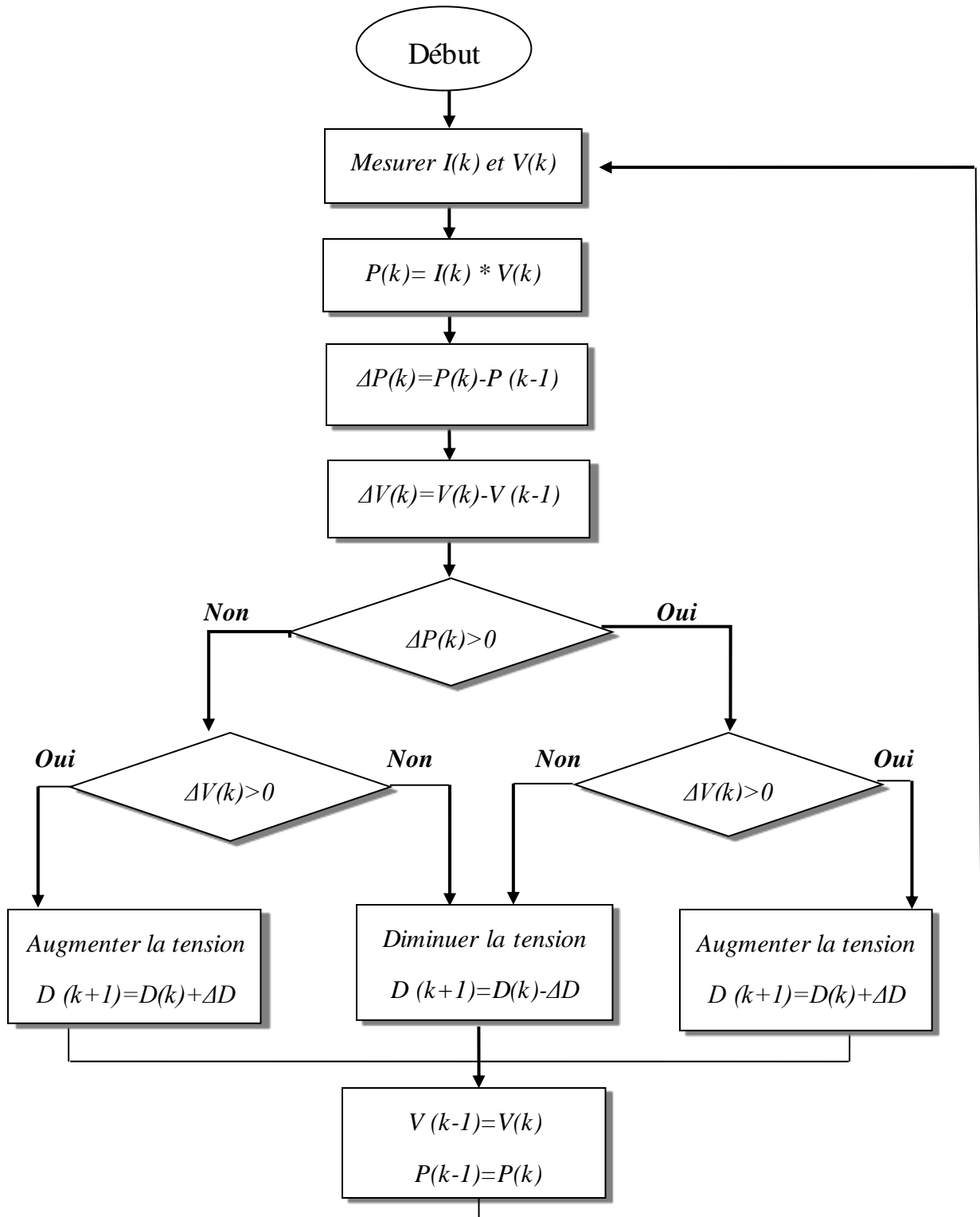


Figure II.15– l’algorithme de P&O classique.

La méthode P&O est largement utilisée de par sa facilité d’implémentation, cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu’elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant

le système à osciller en permanence autour du PPM, une fois ce dernier atteint. Ces oscillations dépendent de la largeur du pas de la perturbation [39] :

- Si la largeur du pas est grande, l'algorithme du MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues dans les conditions stables ou lentement changeantes.
- Si la largeur du pas est très petite, les pertes dans les conditions stables ou lentement changeantes seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température ou de l'insolation.

Il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser. Un autre inconvénient de la méthode P&O lors d'un changement rapide des conditions atmosphériques. La Figure II.16. Commencant par un point de fonctionnement A, si les conditions climatiques restent constantes, une perturbation ΔV dans la tension V amènera le point de fonctionnement au point B, et le sens de la perturbation sera inversé à cause de la diminution de la puissance. Par contre, si par exemple l'éclairement augmente et déplace la courbe de puissance de P1 à P2, sur un cycle du MPPT, le point de fonctionnement sera déplacé de A vers C. Cela représente une augmentation de la puissance, l'algorithme précédent réagit comme si cette augmentation est produite par l'effet de perturbation précédente, alors il continue dans la même direction qui est une mauvaise direction, ce qu'il éloigne du vrai point de puissance maximale. Ce processus continu jusqu'à la stabilité de l'ensoleillement où il revient au vrai point de puissance maximale. Ceci cause un retard de réponse lors des changements soudains des conditions de fonctionnement et des pertes de puissance [59].

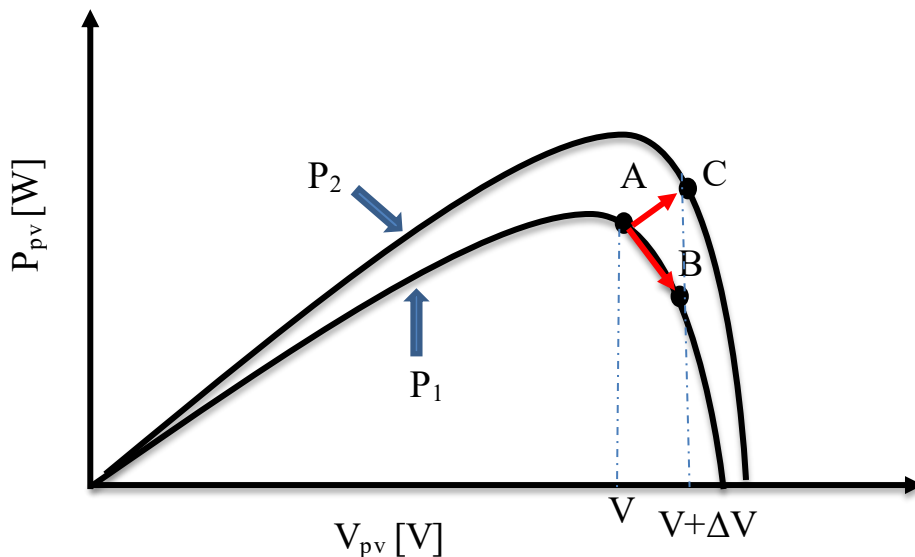


Figure II.16– Divergence de la méthode P&O.

II.8.1.1 Les avantages et les inconvénients de P&O

II.8.1.1.1 Avantage

- Parlant de la méthode P&O, parmi les avantages que l'on peut citer c'est la structure de régulation simple ainsi que le nombre des paramètres mesures réduit.
- Les rendements de MPPT de la conductance par incrémentation et de l'algorithme P&O sont essentiellement identiques [60].
- Structure de régulation simple [61].
- Nombre des paramètres mesures réduit

II.8.1.1.2 Inconvénients

- Dépassement du point maximum optimal en cas de changement rapide des conditions atmosphériques [62].

II.9 Résultat de simulation

Les paramètres électriques du système étudié sont consignés dans le Tableau II.4.

Tableau II.4 – Paramètres du système photovoltaïque étudié.

<i>Paramètre</i>	<i>Valeur</i>
<i>Paramètres du GPV</i>	$M_s = 1$, $M_p = 2$, $V_{Gpv} = 21.1 \text{ V}$
<i>Paramètres du convertisseur boost</i>	$f_s = 20 \text{ kHz}$, $C_{Gpv} = 2.119 \times 10^{-6} \text{ F}$ $C_{dc} = 2.119 \times 10^{-6} \text{ F}$, $L_{Gpv} = 9.43 \times 10^{-3} \text{ H}$
<i>La charge</i>	$R = 20 \text{ } \Omega$

La figure II.17 représente le schéma bloc du système photovoltaïque étudié.

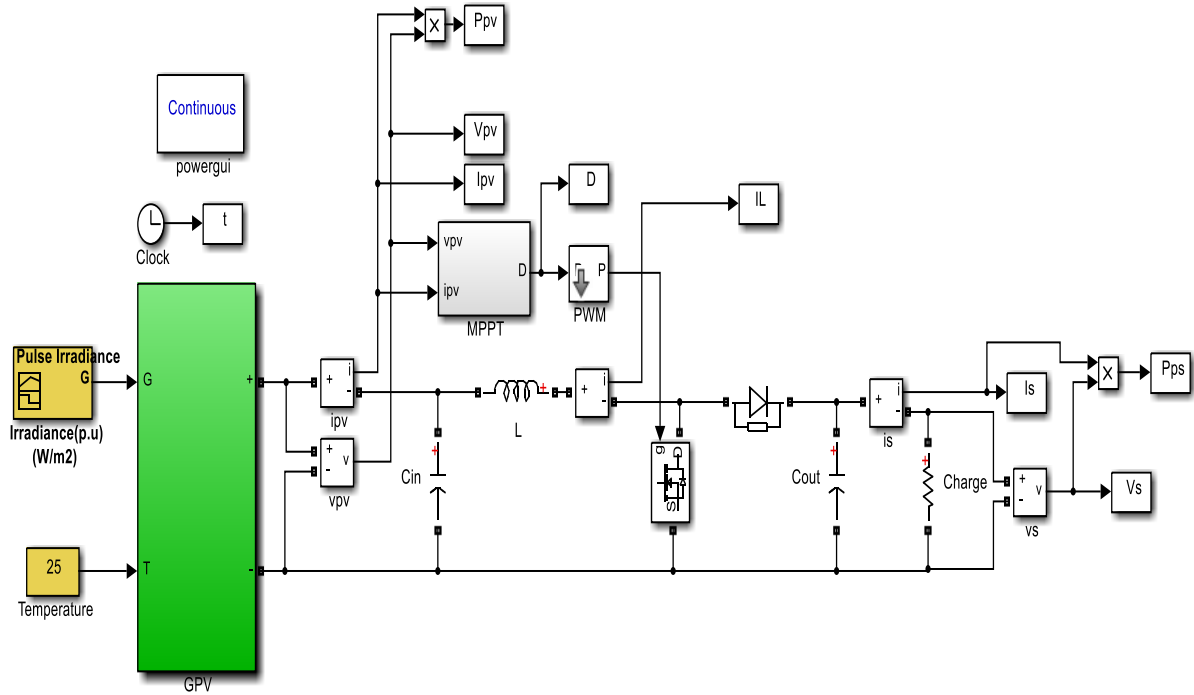


Figure II.17– Schéma bloc du système photovoltaïque dans SIMULINK/MATLAB.

La Figure II.18 représente le schéma bloc du système photovoltaïque étudié sous Matlab/Simulink.

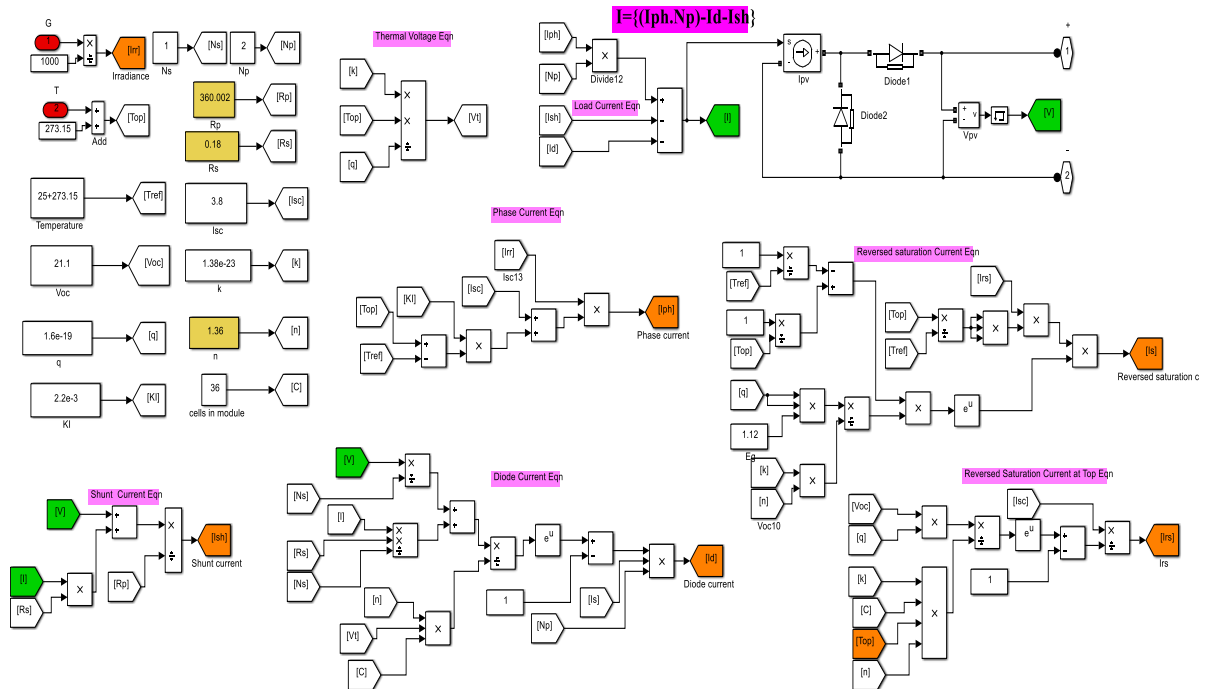


Figure II.18– Schéma bloc du GPV dans SIMULINK/MATLAB.

II.9.1 Résultats de simulation de la commande MPPT-P&O

La Figure II.19 représente le modèle de simulation de la commande MPPT-P&O, en utilisant l'organigramme illustré sur la Figure II.15 [63].

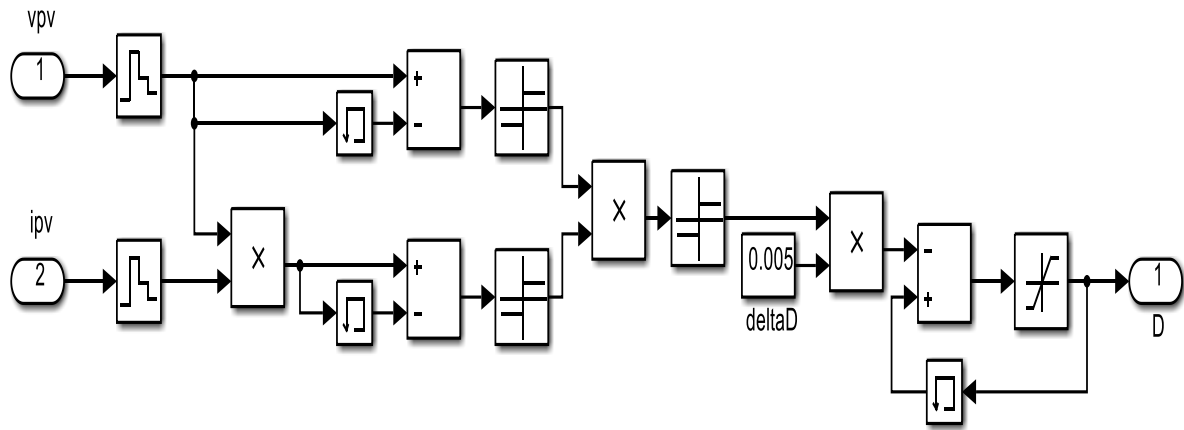


Figure II.19– Modèle SIMULINK de l'algorithme MPPT-P&O.

Pour évaluer les performances de la commande MPPT-P&O sous différentes conditions environnementales, on effectue le test suivant :

- Ensoleillement variable et température constante.

Afin de montrer du soleil G sur la puissance, nous maintenons la température à une valeur constante ($T=25^{\circ}\text{C}$) et la quantité de lumière solaire change rapidement. Cette la Figure II.20 montre lasection transversal de la lumière solaire pris en compt. Il faut noter que d'une durée de 5 secondes, la courbe comprend des changements rapidement entre 500 W/m^2 et 1000 W/m^2 afin de tester l'algorithme MPPT de type P&O.

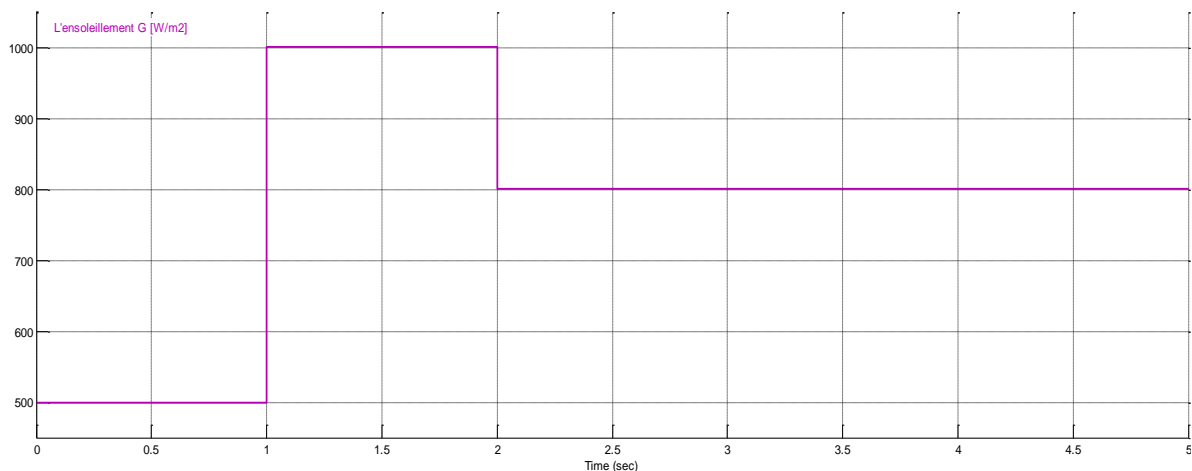


Figure II.20– Variation de l'irradiation solaire en fonction du temps.

Les Figures II.21, II.22, II.23, II.24, II.25 représentent respectivement les résultats de simulation obtenus pour la commande MPPT de type P&O appliquée au hacheur boost classique raccordé au GPV. Pour un ensoleillement de 1000 W/m^2 durant l'intervalle de temps $t = [1.25\text{s} ; 2\text{s}]$, le point de fonctionnement optimale du champ photovoltaïque correspond à le courant 7A , la tension varie autour de sa valeur optimale de $V_{\text{mpp}} 16.5\text{V}$ et la puissance varie autour de sa valeur optimale P_{mpp} de 115W , et le rapport cyclique.

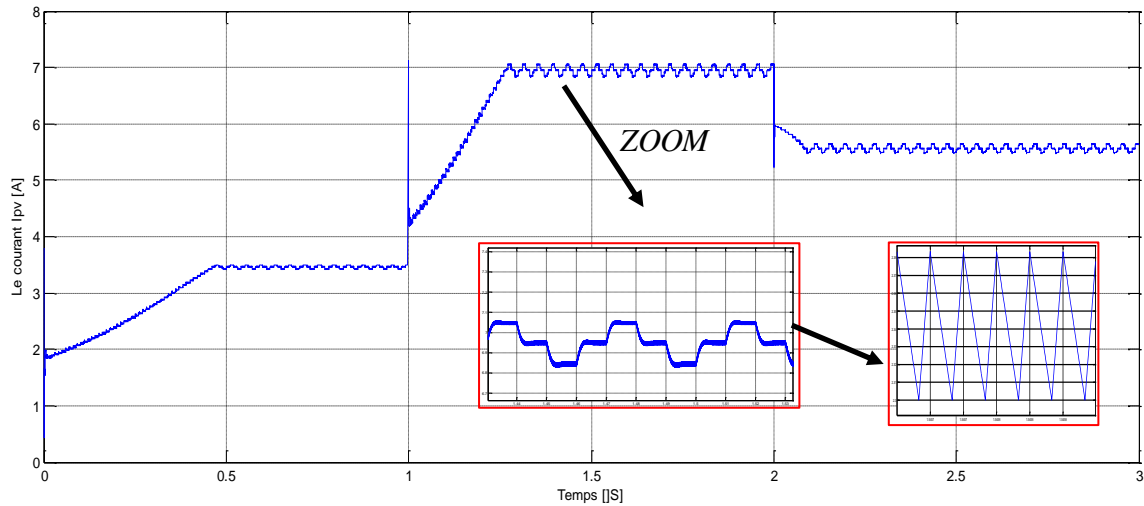


Figure II.21– Evolution du courant du GPV.

Nous trouvons que la valeur d'ondulation est $\Delta I = 0.13 \text{ A}$.

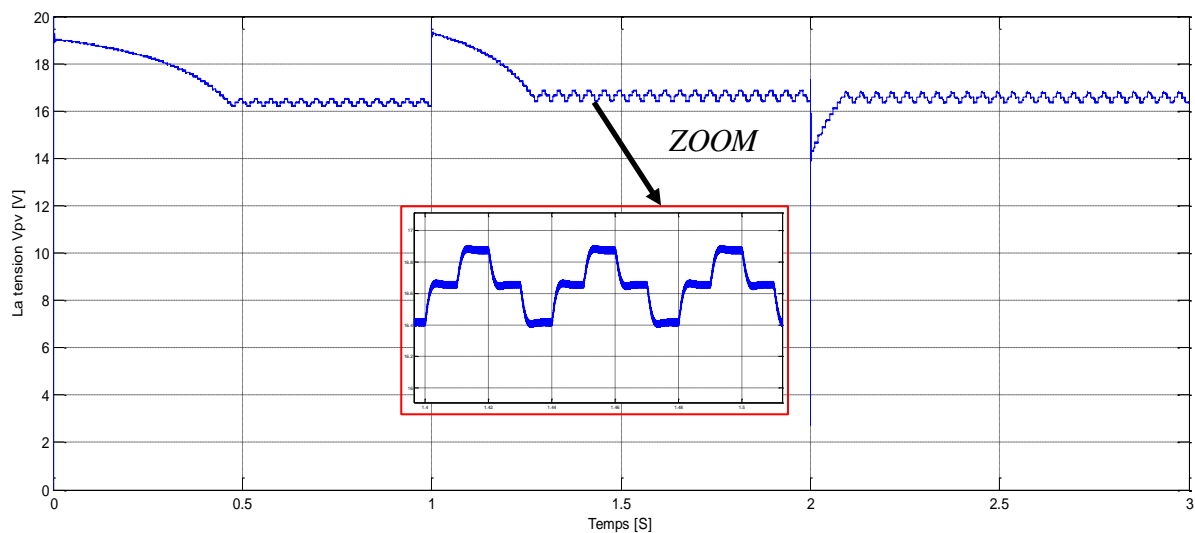


Figure II.22– Evolution de la tension du GPV.

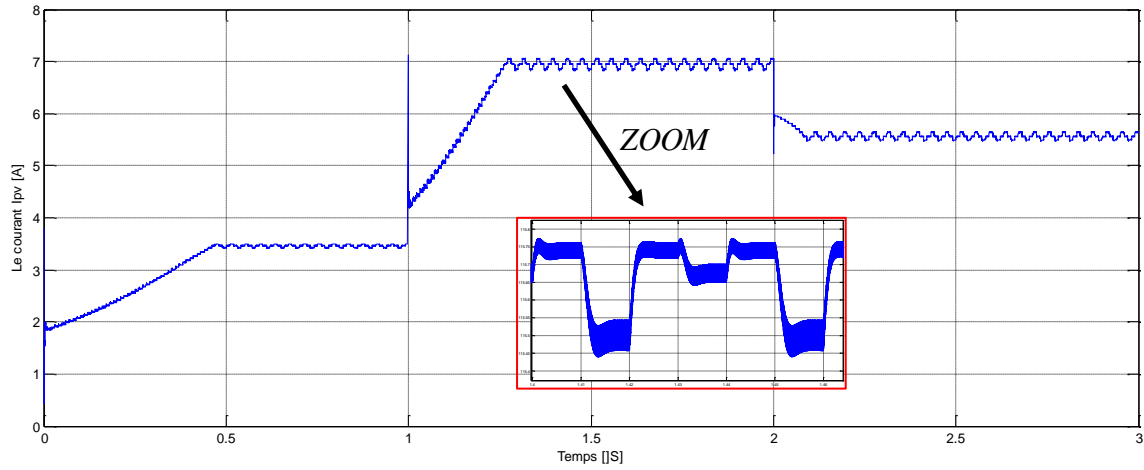


Figure II.23– Evolution de la puissance du GPV.

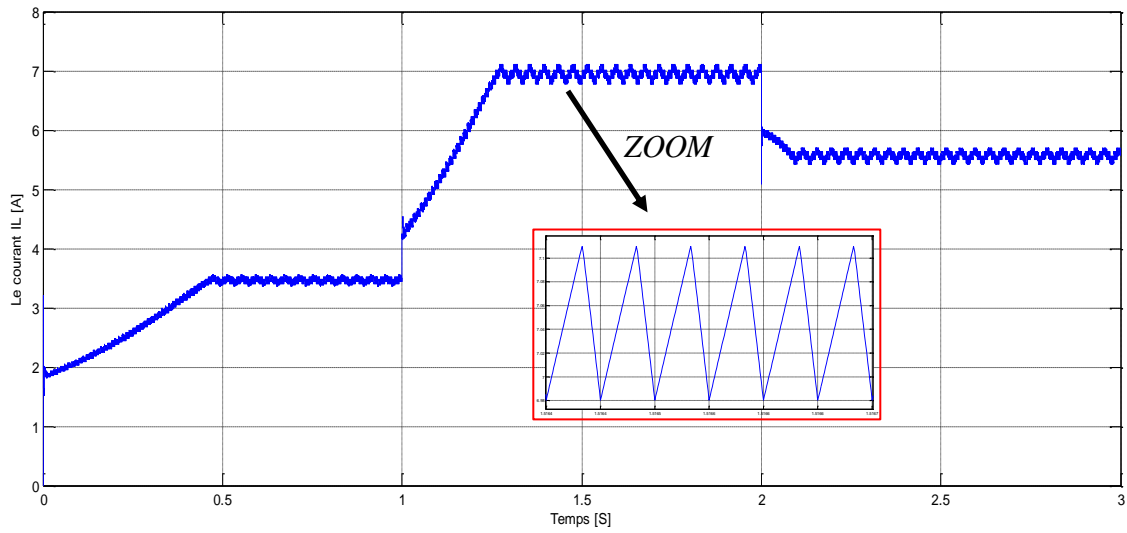


Figure II.24– Evolution du courant aux bornes l'inductance.

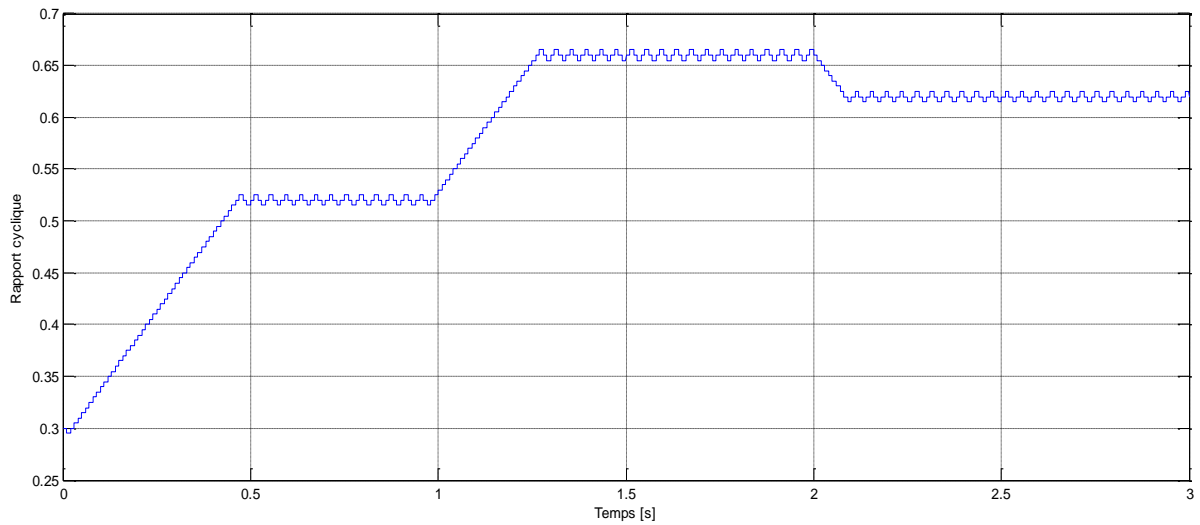


Figure II.25– Rapport cyclique du convertisseur boost.

Les Figures II.26, II.27, II.28, représentent respectivement l'évolution du courant, de la tension et de la puissance de la charge pour un ensoleillement variable.

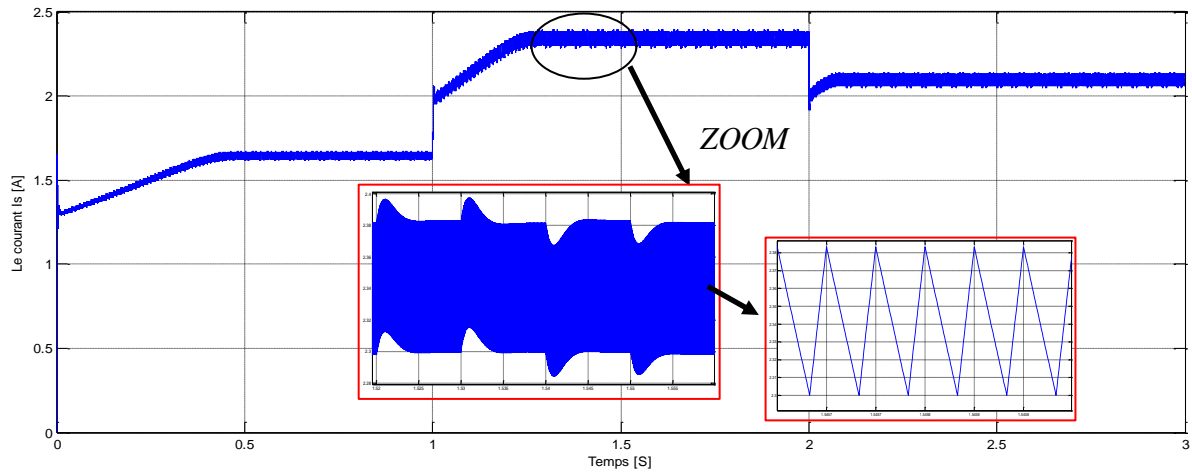


Figure II.26– Evolution du courant de la charge.

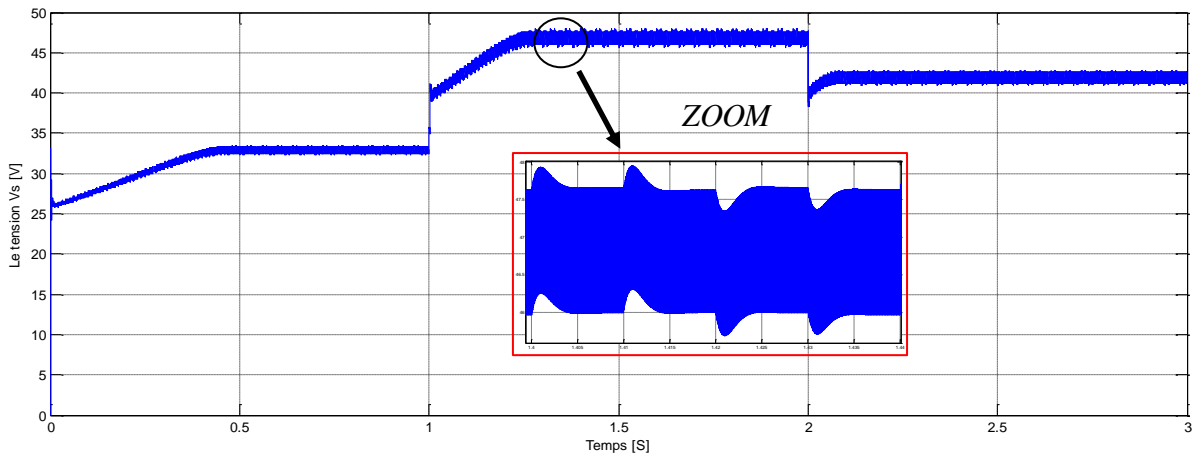


Figure II.27– Evolution de la tension de la charge.

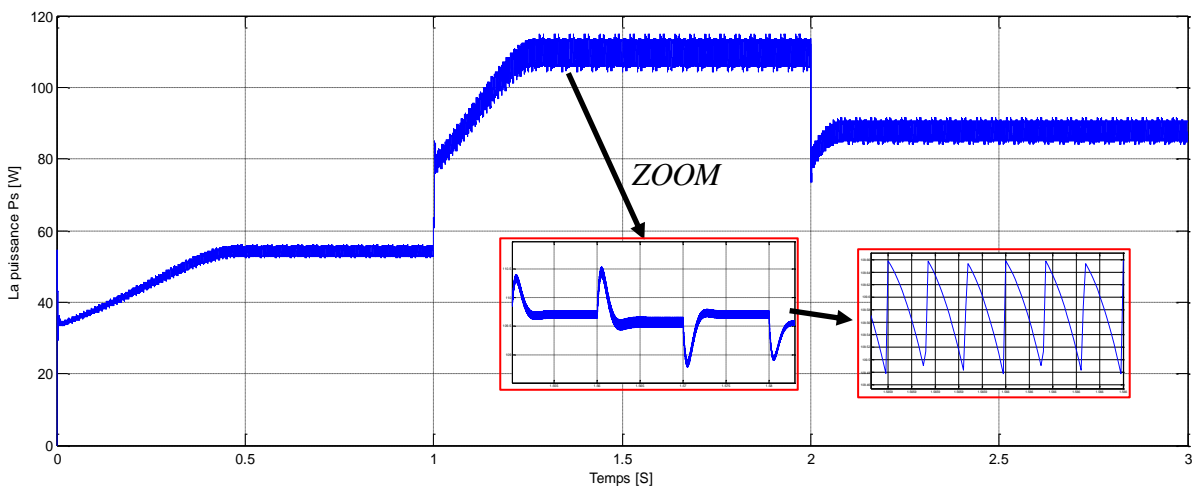


Figure II.28– Evolution de la puissance de la charge.

II.10 Conclusion

Le fonctionnement du générateur photovoltaïque à un rendement optimal nécessite l'insertion de convertisseurs statiques (généralement un convertisseur DC-DC) entre le générateur et la charge. Pour assurer le fonctionnement d'un générateur photovoltaïque à son point de puissance maximale (MPP), des contrôleurs MPPT sont souvent utilisés. Ces contrôleurs minimisent l'erreur entre la puissance de fonctionnement et la puissance maximale de référence variable en fonction des conditions climatiques.

Dans ce chapitre, nous présentons certains types de convertisseurs DC-DC, une impulsion largement utilisée dans les systèmes PV est introduite pour faire correspondre la source avec la charge, puis nous introduisons l'algorithme classique pour trouver le point à la puissance maximale PPM "Perturbation & Observation".

Enfin, nous avons simulé le système PV pour évaluer les performances de la commande MPPT-P&O sous différentes conditions environnementales.

Chapitre III. Optimisation énergétique de système photovoltaïque

Chapitre III. Optimisation énergétique de système photovoltaïque

III.1 Introduction

Les générateurs photovoltaïques sont utilisés pour fournir de l'énergie dans de nombreuses applications électriques. Cependant, les caractéristiques I-V et P-V du générateur dépendent du changement climatique, comme l'irradiance solaire et la température. Ces changements font fluctuer la puissance maximale.

Il existe différentes méthodes pour améliorer l'efficacité d'un système PV, ce qui est le but de notre étude dans laquelle nous essaierons de nous concentrer sur l'amélioration du hacheur boost.

Dans ce chapitre, nous présenterons d'abord deux type de hacheur boost entrelacé permet de déterminer la puissance maximale en fonction des changements de conditions Météorologie (rayonnement solaire et température ambiante) nous nous proposons de la simulation ses système à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK.

III.2 Convertisseur boost entrelacé à deux bras

Le convertisseur boost entrelacé à deux bras est composé de deux hacheurs élévateurs classiques connectés en parallèle entre l'entrée (PV) et la sortie. Il comporte deux inductances de puissance, deux transistors MOSFET, deux diodes rapides et un condensateur de filtrage à la sortie.

Les commandes de chaque branche sont décalées de $T/2$ de façon régulière avec un même rapport cyclique pour chaque branche.

Le schéma de principe d'un hacheur boost entrelacé à deux bras est donné par la Figure III.1.

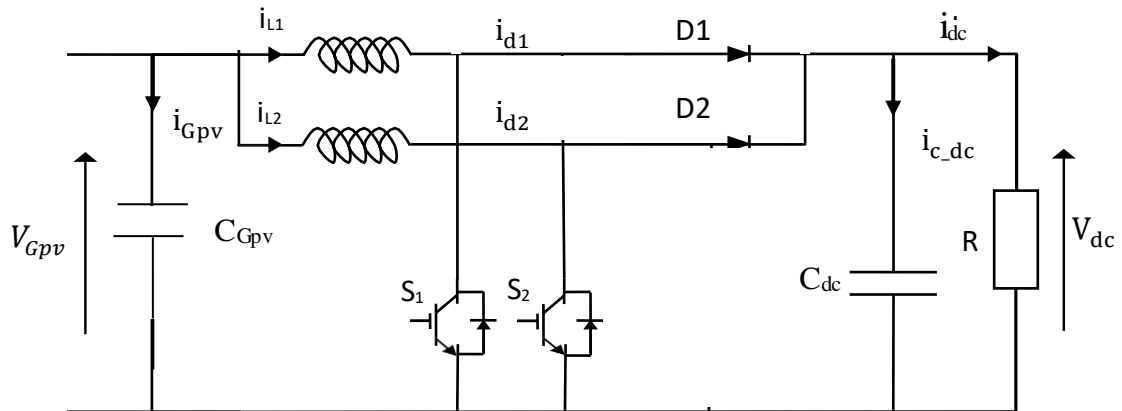


Figure III.1– Schéma de principe d'un hacheur boost entrelacé à deux bras.

III.2.1 Simulation du hacheur boost entrelacé à deux bras alimenté par GPV

La Figure III.2 représente le modèle de simulation de système PV autonome utilisé hacheur boost deux bras. Nous avons utilisé les mêmes paramètres du système utilisé dans le chapitre précédent (Tableau II.4). Le même profil de l'ensoleillement utilisé dans le chapitre précédent est appliqué aussi (Figure II.20).

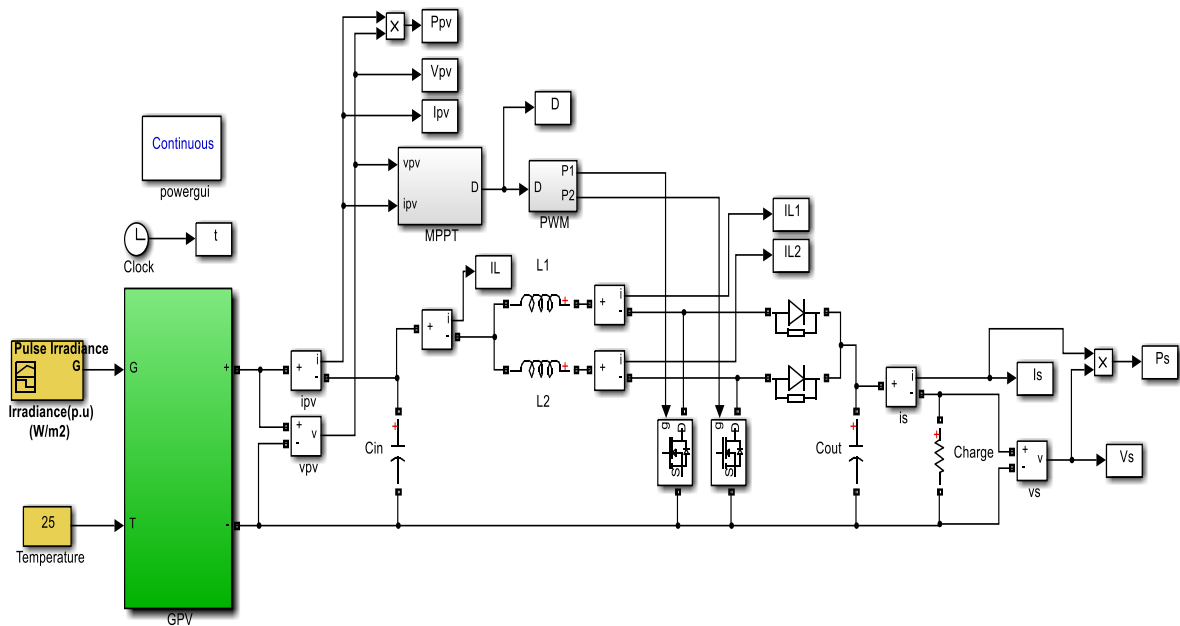


Figure III.2– Schéma Matlab/Simulink de boost entrelacé à deux bras.

III.2.2 Résultats de simulation

Les Figures III.3, III.4, III.5, représentent respectivement les résultats de simulation obtenus pour la commande MPPT de type P&O appliquée au hacheur boost entrelacé à deux bras raccordé au GPV. Pour un ensoleillement de 1000 W/m^2 durant l'intervalle de temps $t = [1.25\text{s} ; 2\text{s}]$, le point de fonctionnement optimale du champ photovoltaïque correspond à le courant 7A , la tension varie autour de sa valeur optimale de $V_{\text{mpp}} 16.5\text{V}$, la puissance varie autour de sa valeur optimale P_{mpp} de 115W .

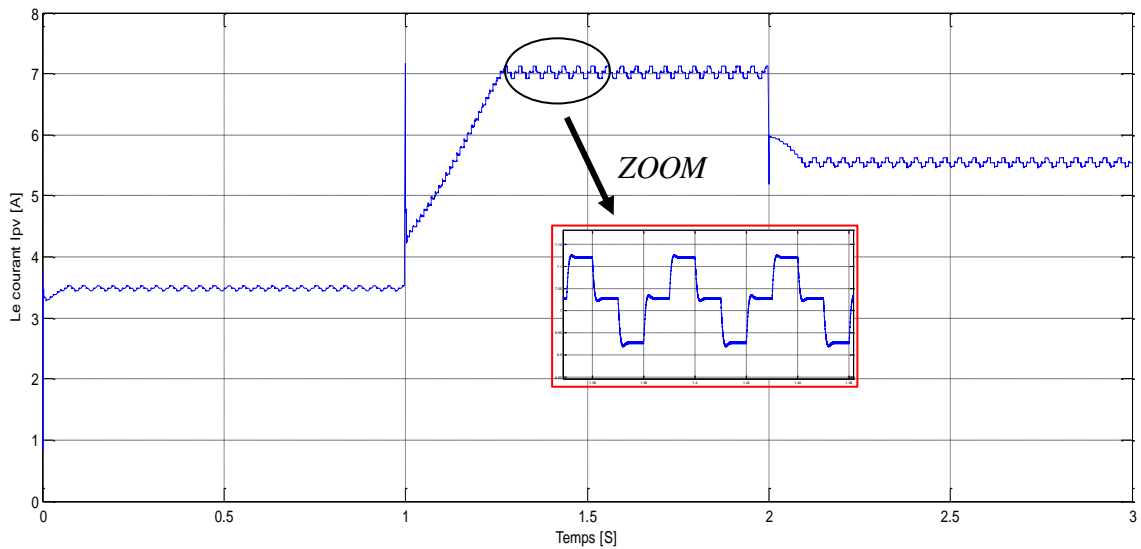


Figure III.3– Evolution du courant du GPV.

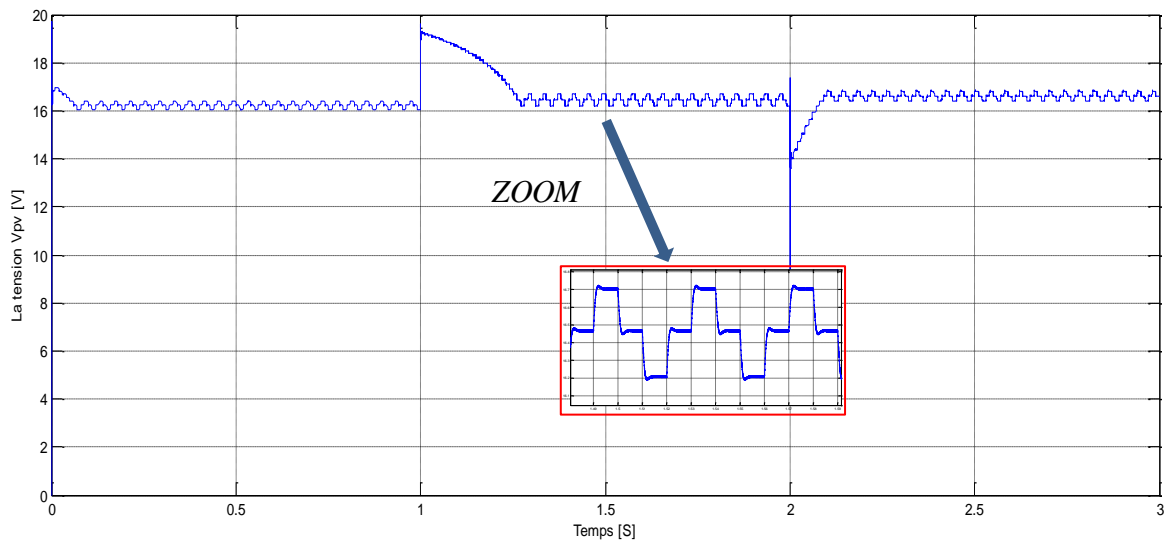


Figure III.4– Evolution de la tension du GPV.

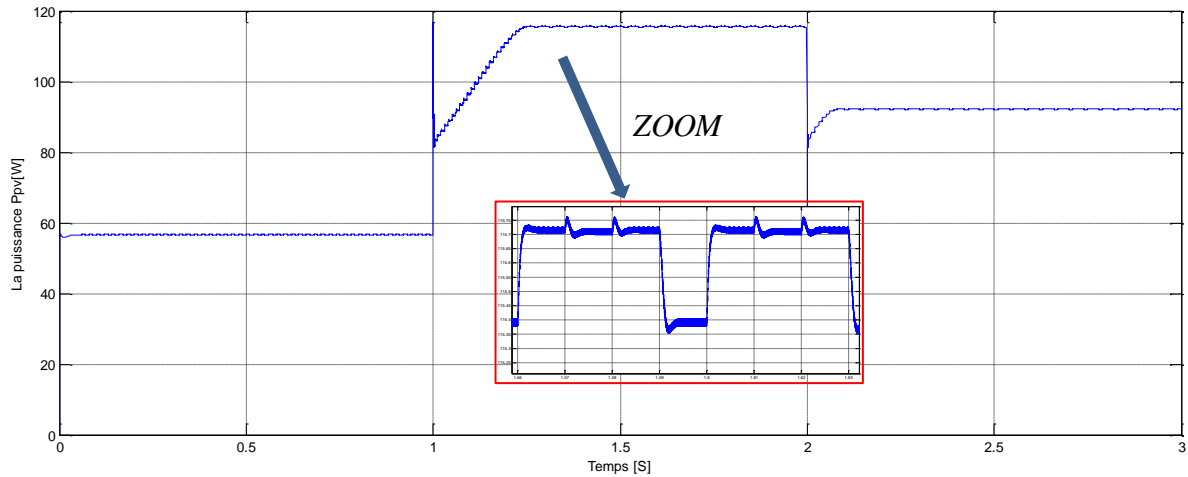


Figure III.5– Evolution de la puissance du GPV.

La Figure III.6 présente le rapport cyclique du convertisseur boost entrelacé à deux bras D en fonction du temps.

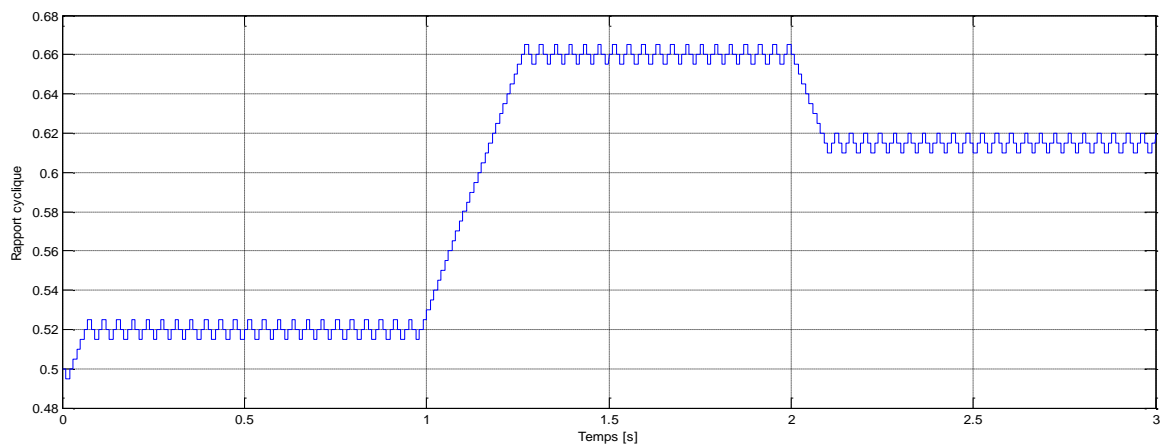


Figure III.6– Rapport cyclique D du convertisseur boost entrelacé à deux bras.

La Figure III.7 présente La somme du courant I_{L1} , courant I_{L2} . Ce que donne la valeur de ondulation $\Delta I=0.065$ A, on note ce cas que la valeur des ondulations dans le cas de hacheur boost deux bras est moindre que dans le cas de hacheur boost classique.

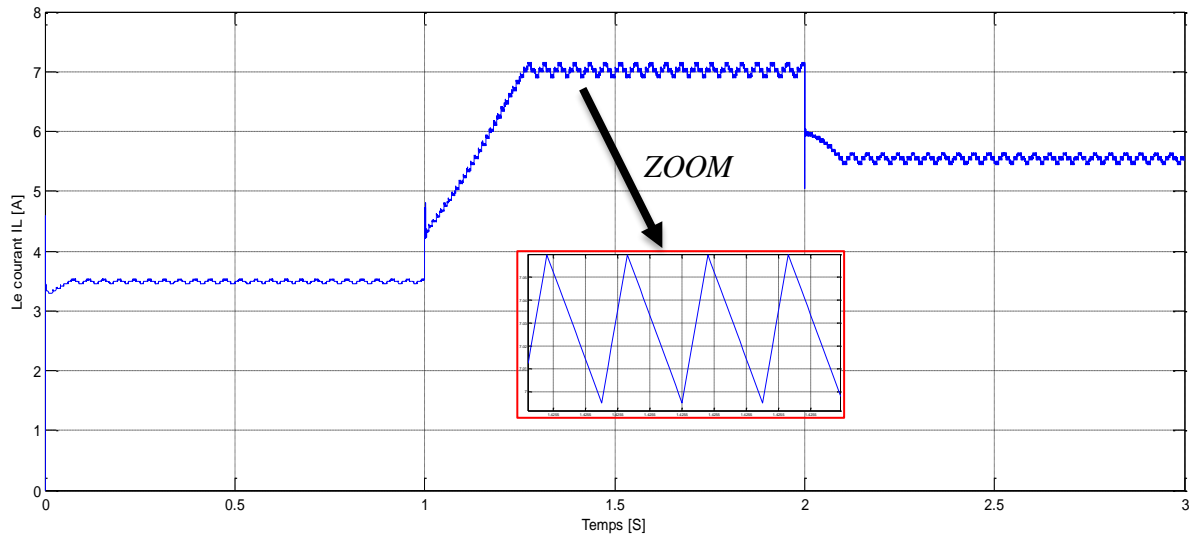


Figure III.7 Evolution du courant I_L .

Les Figures III.8, III.9 représentent respectivement du courant aux borne l'inductance L_1 , et l'inductance L_2 pour que chaque courbe donne la valeur des ondulations $\Delta I=0.13$.

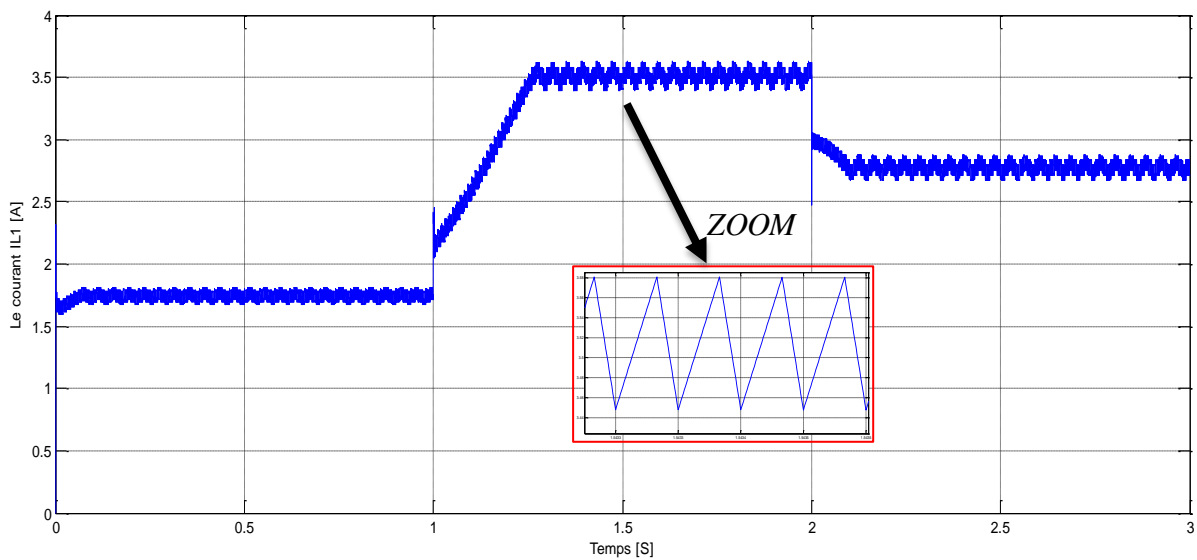


Figure III.8– Evolution du courant aux bornes l'inductance L_1 .

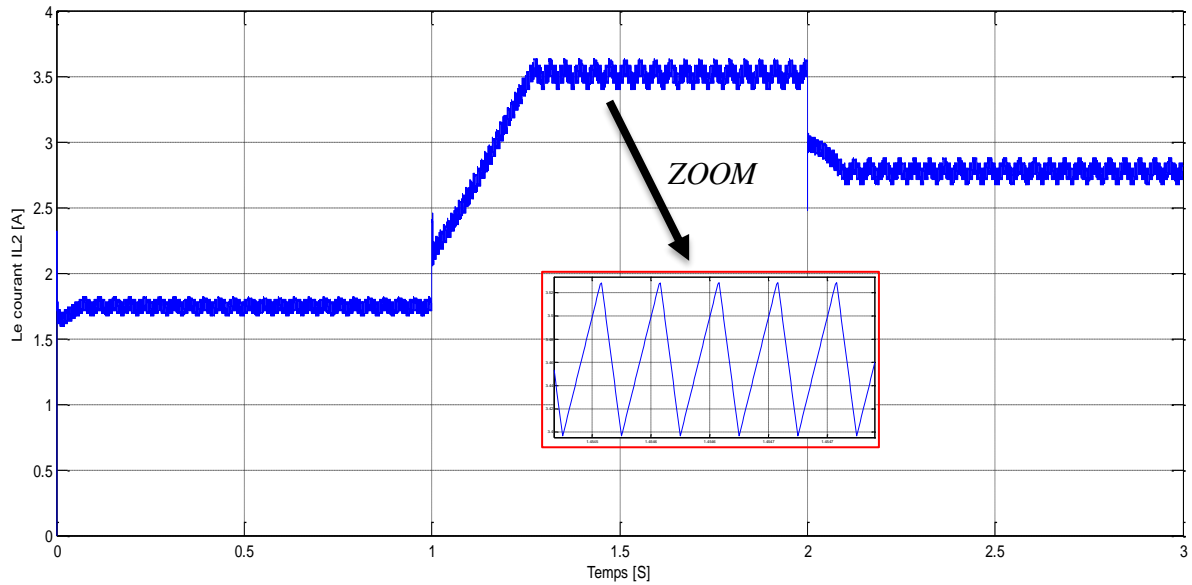


Figure III.9– Evolution du courant aux bornes l'inductance L_2 .

La Figure III.10 présente décalage entre courant I_{L1} et I_{L2} où la valeur de décalage 180° .

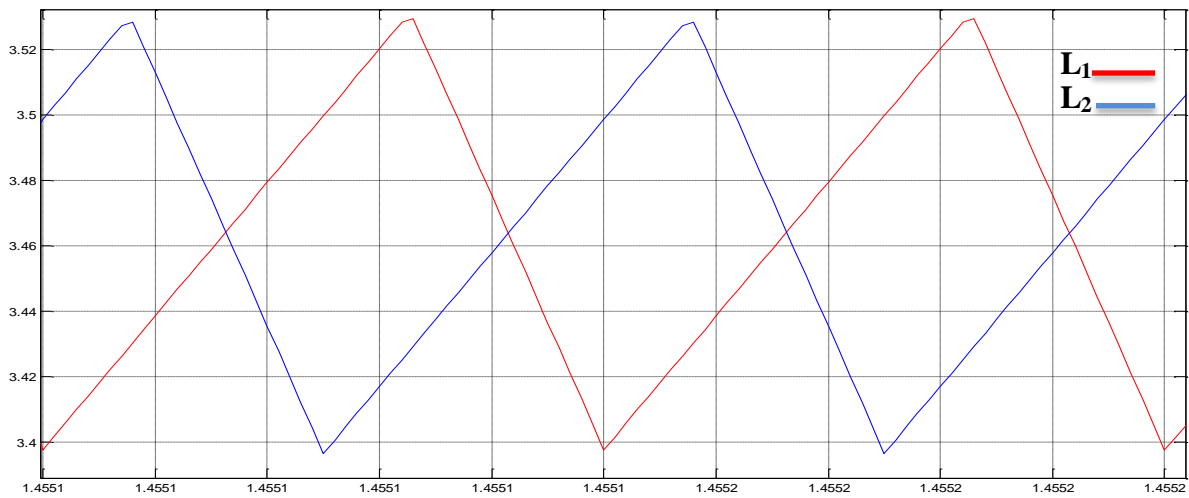


Figure III.10 Zoom sur l'évolution du courant aux borne l'inductance L_1 et L_2 .

Les réponses du courant, la tension et la puissance de sortie du convertisseur boost entrelacé à deux bras est illustrée respectivement sur les Figures III.11, III.12, III.13.

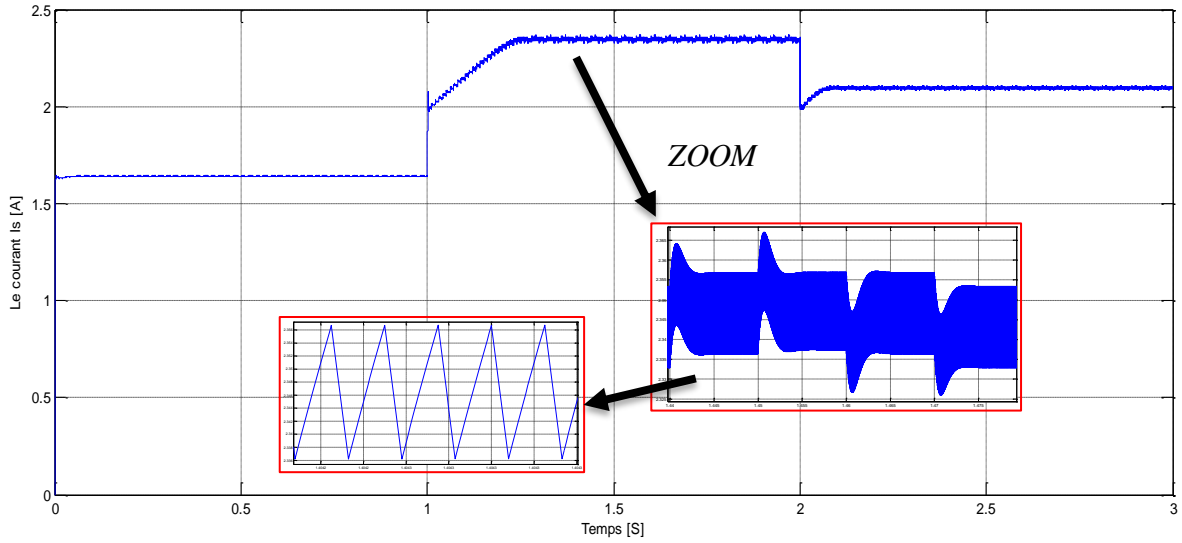


Figure III.11– Evolution du courant de la charge.

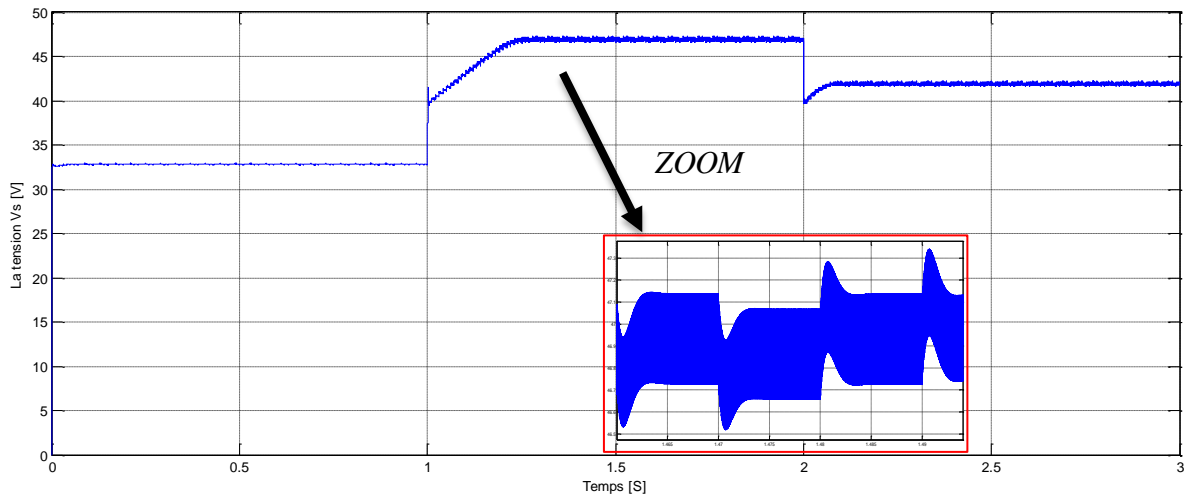


Figure III.12– Evolution de la tension de la charge.

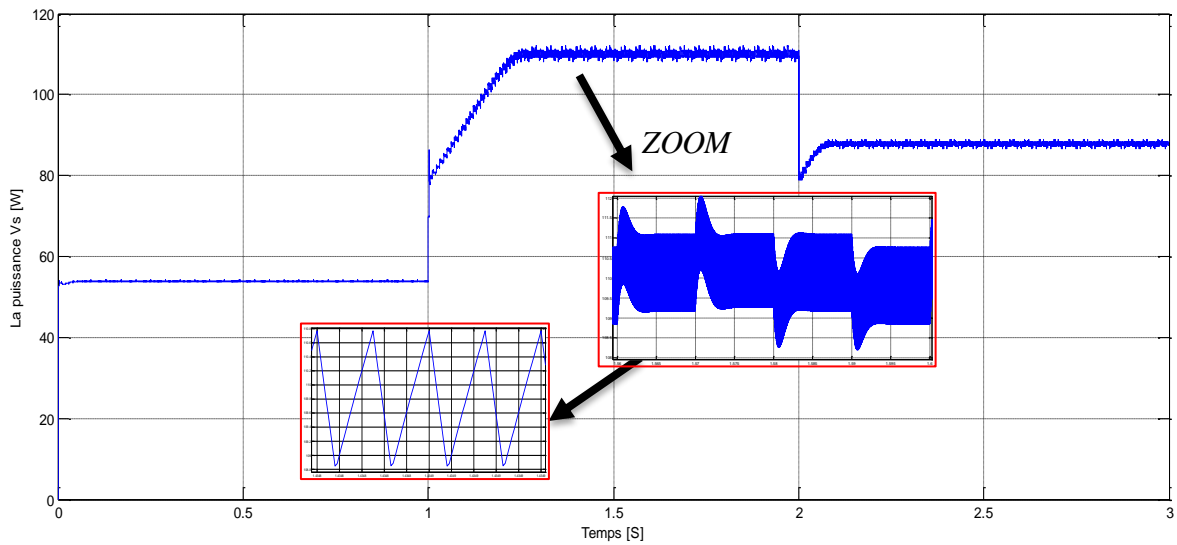


Figure III.13– Evolution de la puissance de la charge.

III.3 Convertisseur boost entrelacé à trois bras

La technologie de l'entrelacement est réalisée par trois inductances, trois transistors MOSFET et trois diodes rapides. Les commandes des MOSFET de chaque branche sont décalées de $T/3$ de façon régulière avec un même rapport cyclique pour chaque branche.

Le schéma de principe d'un hacheur boost entrelacé à tris bras est donné par la Figure III.14.

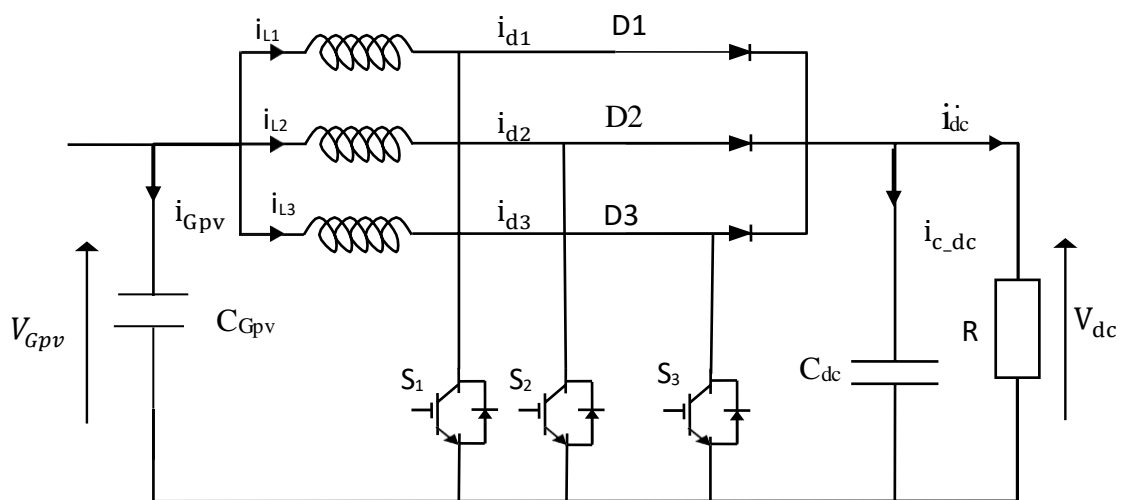


Figure III.14– Schéma de principe d'un hacheur boost entrelacé à trois bras.

III.3.1 Simulation du hacheur boost entrelacé à trois bras alimenté par GPV

La Figure III.15 représente le modèle de simulation de de système PV autonome utilisé hacheur boost trois bras. Nous avons utilisé les mêmes paramètres et le même profil de l'ensoleillement utilisé dans la simulation du hacheur boost entrelacé à deux bras.

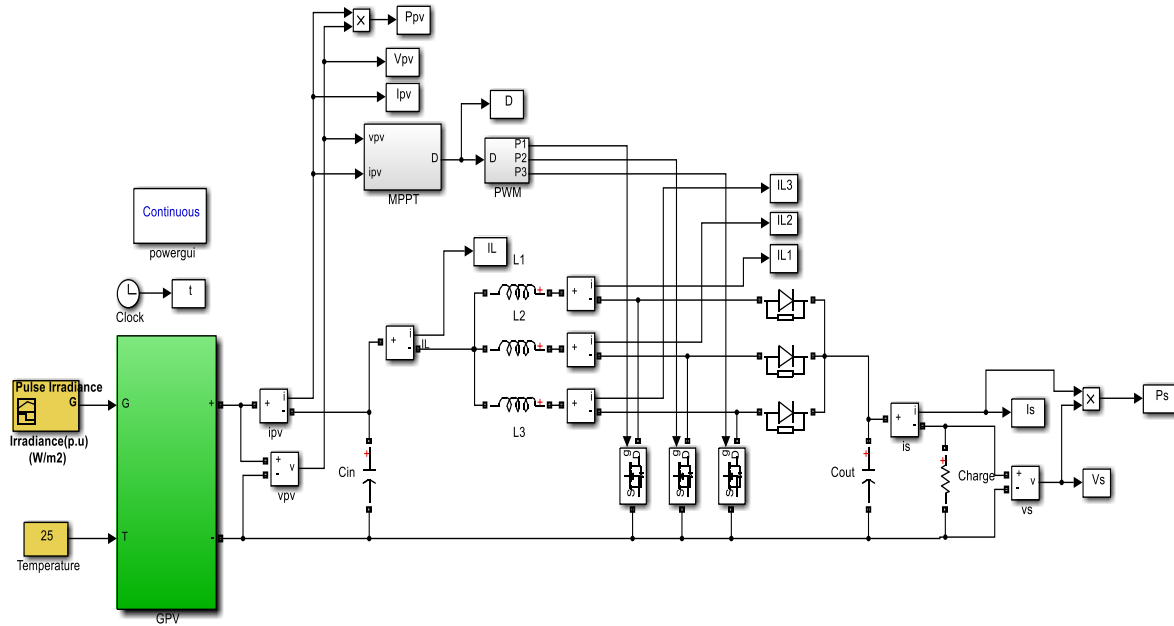


Figure III.15– schéma Matlab/Simulink de boost entrelacé à trois bras.

III.3.2 Résultats de simulation

Les Figures III.16, III.17, III.18, III.19 représentent respectivement les résultats de simulation obtenus pour la commande MPPT de type P&O appliquée au hacheur boost entrelacé à trois bras raccordé au GPV. Pour un ensoleillement de 1000 W/m^2 durant l'intervalle de temps $t = [1.25\text{s} ; 2\text{s}]$, le point de fonctionnement optimale du champ photovoltaïque correspond à le courant 7A , la tension varie autour de sa valeur optimale de $V_{mpp} 16.5\text{V}$, la puissance varie autour de sa valeur optimale P_{mpp} de 115W , et le rapport cyclique.

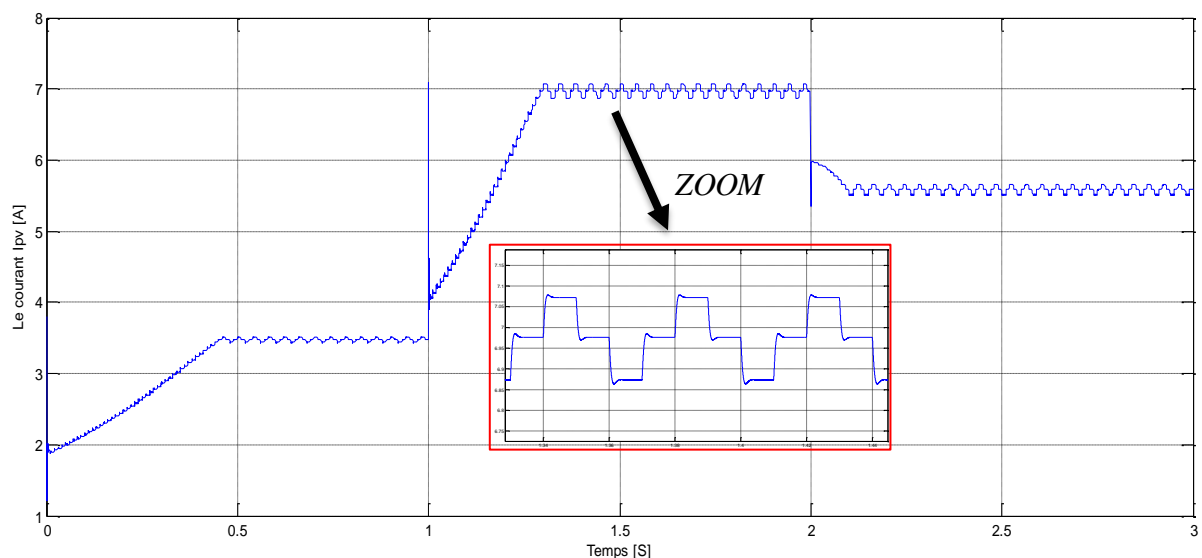


Figure III.16– Evolution du courant du GPV.

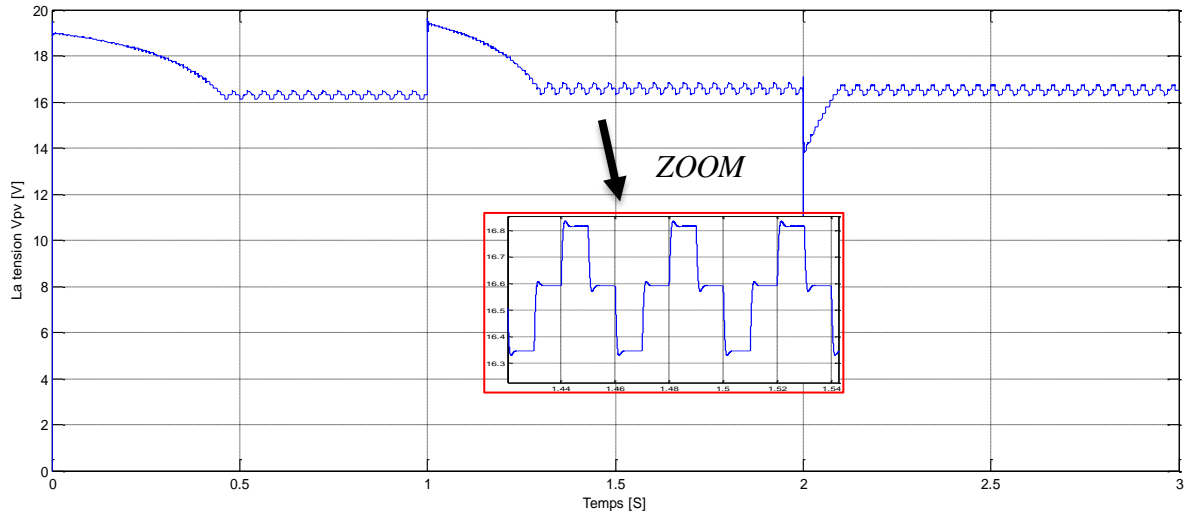


Figure III.17– Evolution de la tension du GPV.

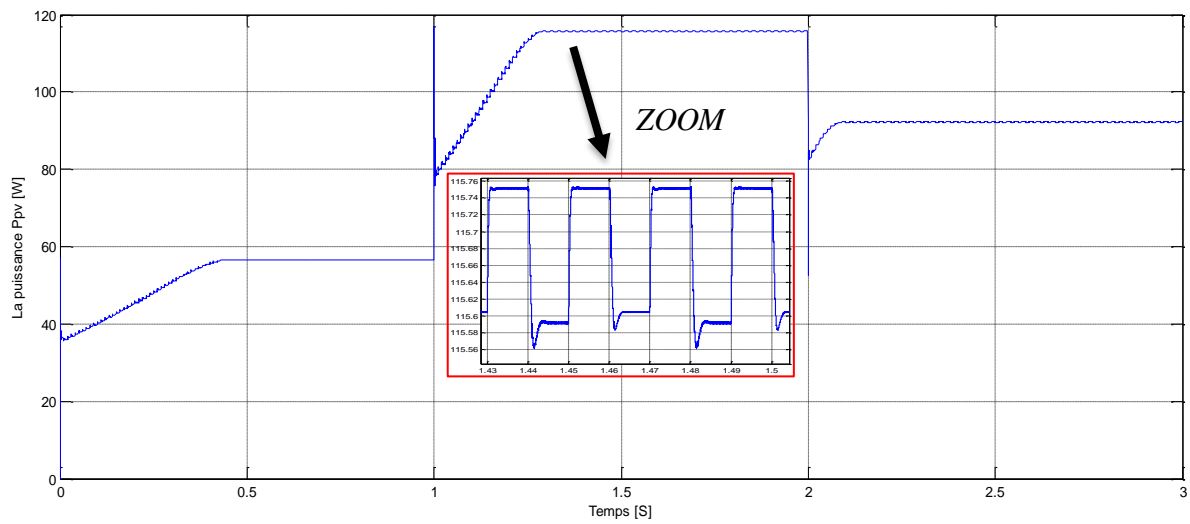


Figure III.18– Evolution de la puissance du GPV.

La Figure III.19 présente le rapport cyclique D en fonction du temps.

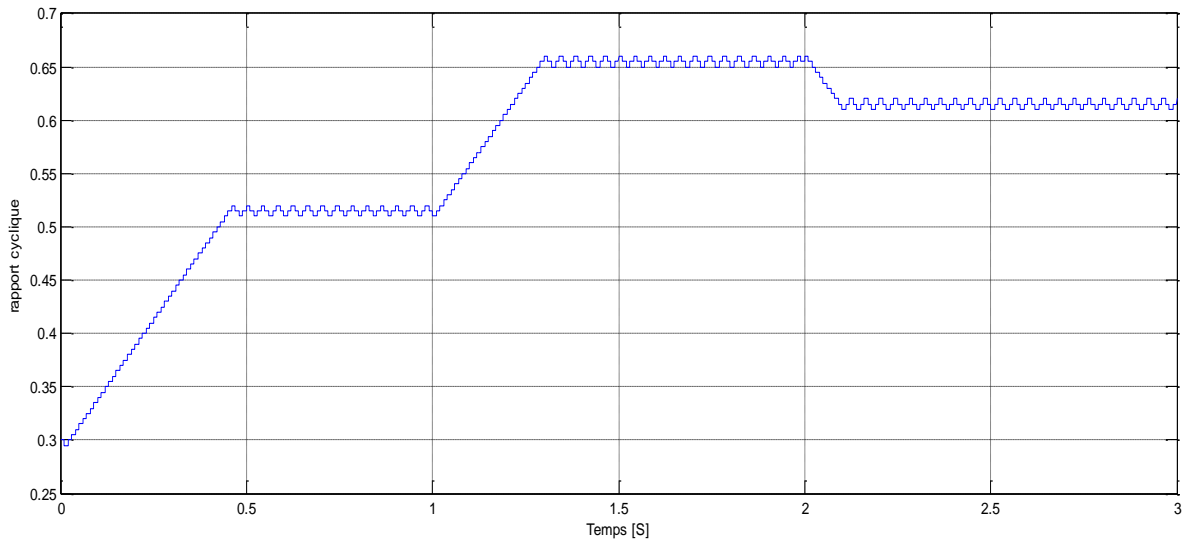


Figure III.19– Rapport cyclique du convertisseur boost entrelacé à Trois bras en fonction le temps.

La Figure III.20 présente La somme du courant I_{L1} , courant I_{L2} et Courant I_{L3} . Ce que donne la valeur de ondulation $\Delta I=0.0065 A$, on note ce cas que la valeur des ondulations dans le cas de hacheur boost trois bras est moindre que dans le cas de hacheur boost deux bras où ça valait $0.065 A$.

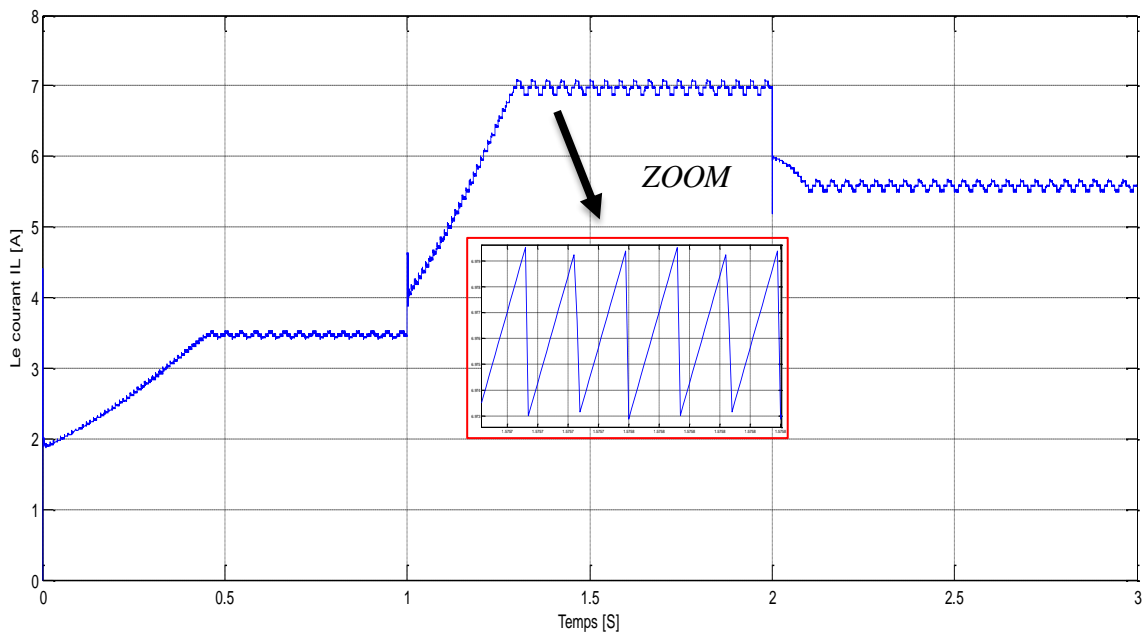


Figure III.20– Evolution du courant I_L .

Les Figures III.21, III.22, III.23 ; représentent respectivement du courant aux bornes l'inductance L_1 , l'inductance L_2 , l'inductance L_3 . Pour que chaque courbe donne la valeur des ondulations $\Delta I=0.125 A$.

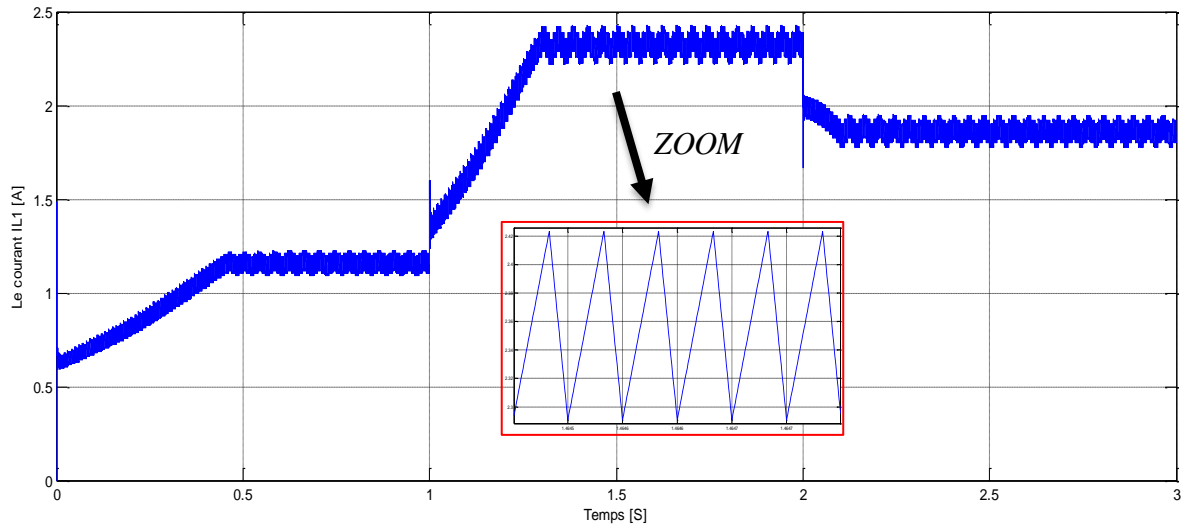


Figure III.21– Evolution du courant aux bornes l'inductance L_1 .

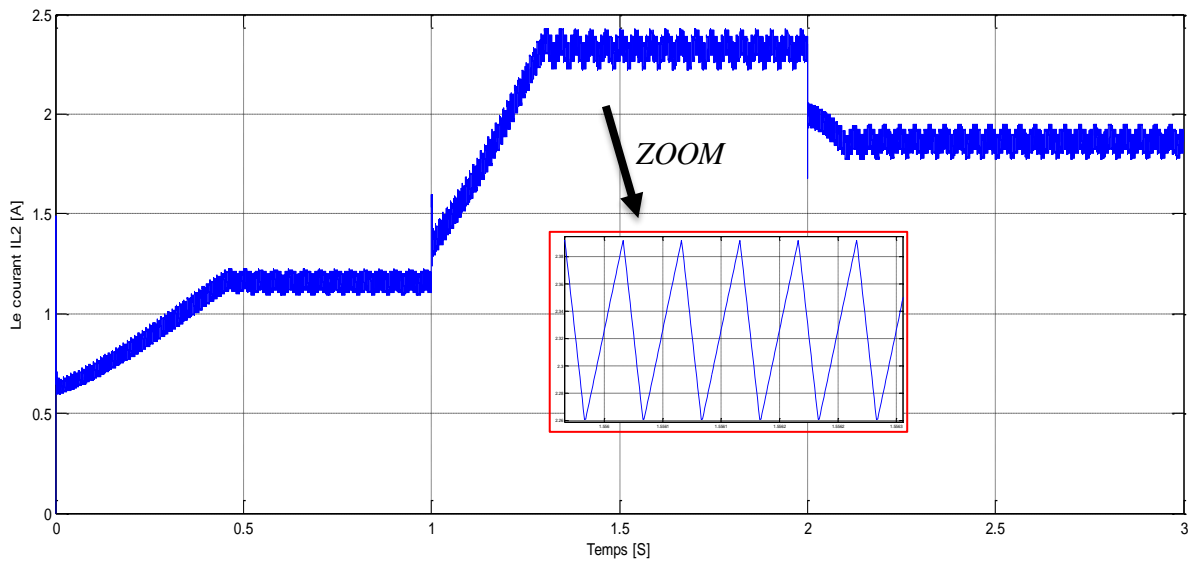


Figure III.22– Evolution du courant aux bornes l'inductance L_2 .

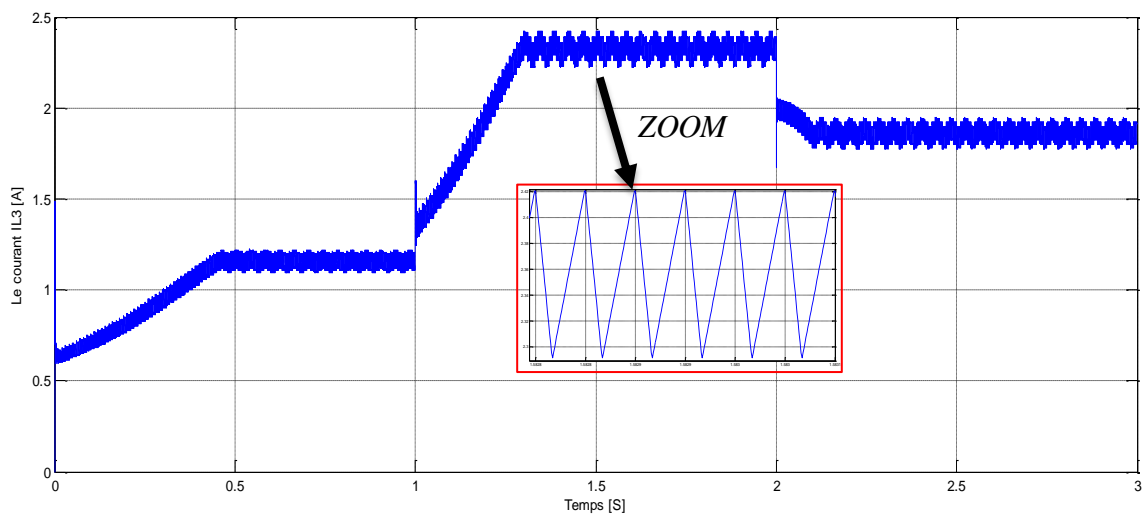


Figure III.23– Evolution du courant aux bornes l'inductance L_3 .

La Figure III.24 présente décalage entre courant I_{L1} , I_{L2} et I_{L3} où la valeur de décalage 120° .

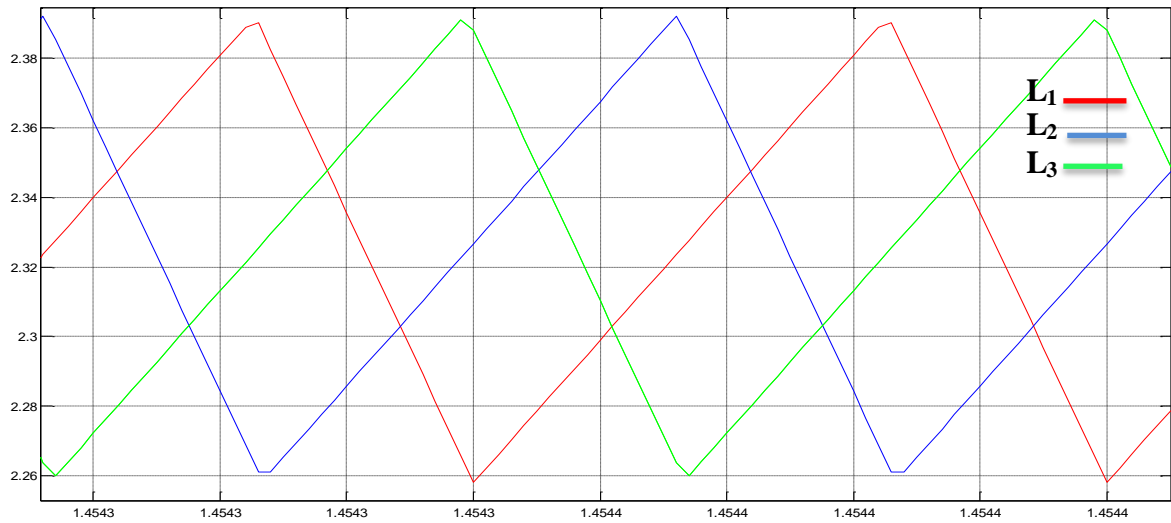


Figure III.24– Zoom sur l'évolution du courant aux borne l'inductances L_1 , L_2 et L_3 .

Les réponses du courant, la tension et la puissance de sortie du convertisseur boost entrelacé à trois bras est illustrée respectivement sur les Figures III.25, III.26, III.27.

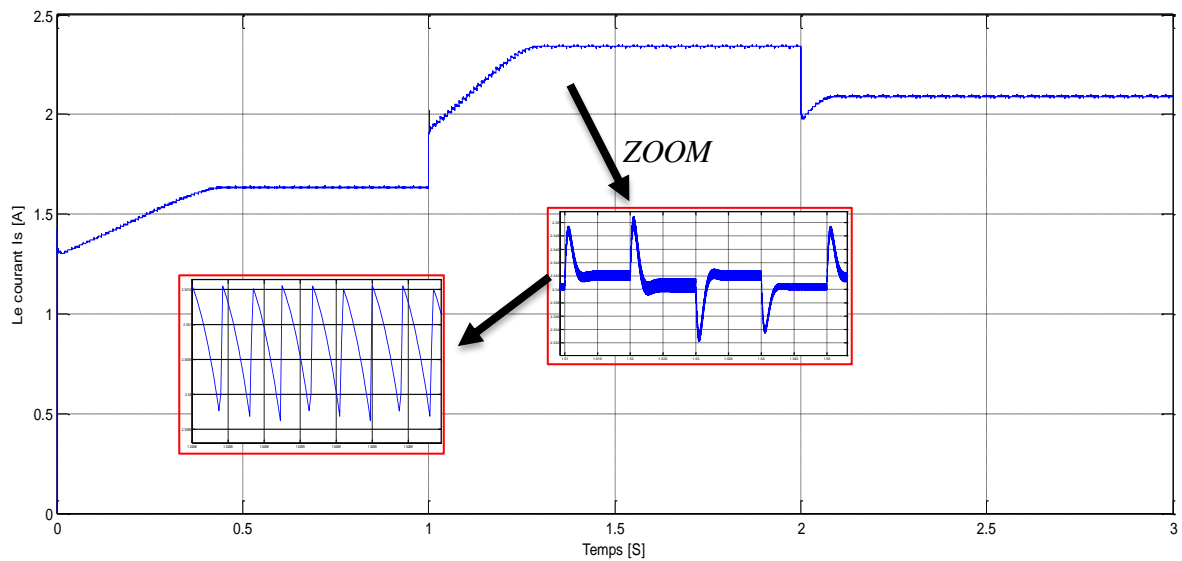


Figure III.25– Evolution du courant de la charge.

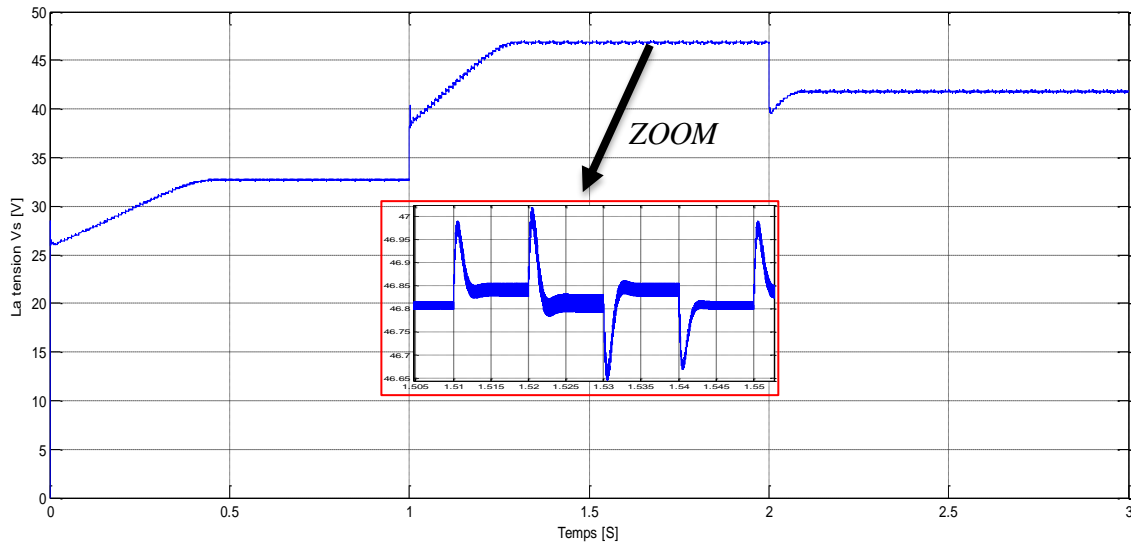


Figure III.26– Evolution de la tension de la charge.

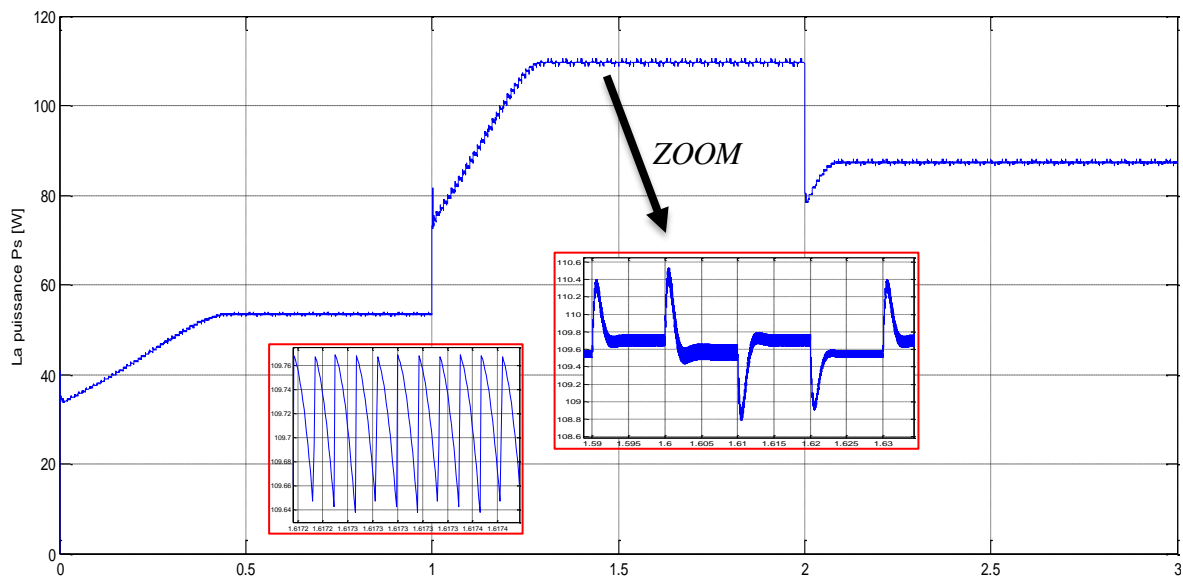


Figure III.27– Evolution de la puissance de la charge.

III.4 Interprétation des résultats

Dans les Figures III.20, III.21, III.22, III.23, on remarque que les ondulations au niveau du et le courant dans chaque bras avec l'amplitude de phase est minimisée par rapport aux Figures III.7, III.8, III.9, dans ce cas on a défini un bon résultat.

Donc le hacheur boost entrelacé à trois bras beaucoup mieux que le hacheur boost entrelacé à deux bras.

La valeur du contenu d'ondulation est résumée sur le tableau suivant :

Tableau III.1 – Comparaisons entre les trois types du convertisseur boost.

L'ondulation	ΔI_L	ΔI_{L1}	ΔI_{L2}	ΔI_{L3}	ΔI_S
Boost classique	0.13	-	-	-	0.085
Entrelacé à deux bras	0.065	0.13	0.13	-	0.02
Entrelacé à trois bras	0.0065	0.125	0.125	0.125	0.002

III.5 Conclusion

L'entrelacement peut résoudre les problèmes liés aux courants élevés. Convertisseur basse tension. Il se compose de batteries boostées connectées en parallèle, Les commandes sont régulièrement transférées entre eux. Par conséquent, le principe peut réduire l'ondulation de courant dans chaque branche pour augmenter la fréquence apparente de l'entrée sortie. L'analyse sera effectuée sur l'amélioration de la branche du balayage entrelacé, mais le résultat est efficace pour les autres structures de numérisation entrelacées.

Conclusion générale

Conclusion générale

De par sa situation géographique, l'Algérie est comptée parmi les meilleurs pays ensoleillés dans le monde et grâce à son Sahara qui constitue un gisement solaire immense peut devenir le premier pays bénéficiant de ce type d'énergies renouvelables. Quoique la maîtrise du caractère aléatoire de cette source d'énergie reste l'un des défis à surmonter afin de mieux l'exploiter.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'Optimisation énergétique de chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque. Qui vise à améliorer les performances de fonctionnement d'un système photovoltaïque (PV) contrôlé par la technologie MPPT, assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le champ photoélectrique.

Dans le premier chapitre, nous avons représenté le principe de conversion photoélectrique et la chaîne de conversion photoélectrique. Nous avons constaté que les performances du module du générateur photovoltaïque sont fortement influencées par les conditions climatiques, en particulier le rayonnement solaire et la température. Pour faire fonctionner un générateur photovoltaïque avec une efficacité optimale, il faut insérer des transformateurs statiques entre le générateur et le récepteur. Pour s'assurer que le générateur PV fonctionne à son point de puissance maximum, des contrôleurs MPPT sont souvent utilisés. Ces contrôleurs sont destinés au suivi PPM afin de réduire l'erreur entre la force de manœuvre et la puissance de référence variable maximale en fonction des conditions climatiques.

Dans le deuxième chapitre, nous introduisons la modélisation de la cellule, du générateur photoélectrique et du convertisseur qui est contrôlé par la méthode de suivi de puissance maximale qui est l'algorithme de Perturbation & Observation, et présentons certains types de convertisseurs DC-DC, est introduite pour faire correspondre la source avec la charge, puis nous introduisons l'algorithme classique pour trouver le point à la puissance maximale PPM "Perturbation & Observation". Nous avons simulé le système PV pour évaluer les performances de la commande MPPT-P&O sous différentes conditions environnementales.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté des simulations de deux types de hacheurs boost entrelacé permet de déterminer la puissance maximale en fonction des changements de conditions Météorologie (rayonnement solaire et température ambiante). Grâce à la simulation du système et à l'étude des résultats, nous avons conclu ce qui suit :

- Le rôle du convertisseur DC-DC est de faire une adaptation entre la source (GPV) et la charge pour avoir un transfert maximal de puissance. Ceci est possible en maintenant le point de fonctionnement sur ou assez proche du MPP pour n'importe quelles conditions de fonctionnement (rayonnement, température, caractéristique de charge, etc.) ;

- Un fonctionnement relativement satisfaisant du système PV est atteint en utilisant la commande MPPT ;
- En utilisant le convertisseur entrelacé, plus vous augmentez le nombre de bras, moins les ondulations de courant, ce qui améliore la puissance de système.

De plus, à l'avenir, vous pourrez compléter l'étude en utilisant d'autres techniques hybrides de maximisation de puissances MPPT et des autres types de convertisseur DC-DC, comme le convertisseur SEPIC et le convertisseur boost à trois niveaux que nous aurions aimé utiliser mais nous n'avions plus le temps.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] **Saloux Etienne**, « Optimisation Structurelle des Systèmes Énergétiques », Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de philosophie doctor, école polytechnique de montréal, juin 2014.
- [2] **Sofiane Abada**, « Étude et Optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur sepic », Mémoire présenté pour l'obtention du grade de Maître ès Sciences (M.Sc.), Université Laval Québec, 2011.
- [3] **Mohamed Amarouayache**, « Contribution à l'optimisation d'une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque », Thèse de Doctorant, Université Constatine1, 2014.
- [4] **Rafika Khezzar**, « Optimisation de Chaîne de Conversion d'énergie photovoltaïque en énergie électrique », Thèse de Doctorat, Université El-Hadj Lakhdar - Batna 1, 2017.
- [5] **Yassine Lasmi**, « Optimisation de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) d'un système photovoltaïque par les techniques intelligentes », Mémoire de Magister, Université Ferhat ABBAS Sétif-1 2013.
- [6] **Baroud kendo li**, « État de l'art et modélisation des microcentrales », Magister en électrotechnique, Université de Constantine 2007.
- [7] **Angel Cid Pastor**, « Conception et Réalisation de modules photovoltaïques électroniques », Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse 2008.
- [8] **Soltane Belakehal**, « Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables », Thèse Doctorat, Université de Constantine, 2010.
- [9] **B. Flèche, D. Delagnes**, « Energie Solaire Photovoltaïque », STI ELT, juin 2007, énergie solaire photovoltaïque.pdf, consulté janv. 2014.
- [10] **O. Gergaud**, « Analysis and Experimental Validation of Various Photovoltaic System Models », PhD- Thesis, McGill University, Montreal, Canada, 2002.
- [11] **Assia Bouraiou**, « Elaboration et Caractérisation des Couches Minces CuInSe2 par Electrodéposition », Thèse de doctorat u M'entourai-CONSTANTINE 2009.
- [12] **Bellala Djamel**, « Contribution à la modélisation d'une cellule solaire », Thèse doctorat, Université de Batna ,2007.
- [13] **Beddar Antar**, « Optimisation de la puissance d'un système d'énergie renouvelable : système photovoltaïque », Mémoire de Master, Université Ferhat Abbas - Sétif 2015.
- [14] **Ahlam Litim**, « Application de la Logique Floue pour la Poursuite du Point de Puissance Maximale d'un Générateur Photovoltaïque », Mémoire de master, Université Dr. Tahar Moulay de Saïda, 2017.
- [15] **Mme Azizi Amina**, « Modélisation et Optimisation d'un système de production d'énergie photovoltaïque avec un système de stockage hybride » Thèse de Doctorat Université d'Annaba 2019.
- [16] **Lazizi Aldjia**, « Modélisation Contrôle et Gestion énergétique d'une Installation de Pompe Solaire » Thèse de Doctorat, Université de Boumerdès 2019.

- [17] **Zaghba Layachi**, « Etude et Commande Adaptative par les Techniques Intelligentes Des Systèmes Non linéaires Application aux Systèmes Photovoltaïques » Thèse de Doctorat, Université de Biskra 2017.
- [18] **Benadel Faiza**, «Etude Et Simulation D'une Commande MPPT Pour Système PV», Mémoire de master, Université de Msila, 2016.
- [19] **Bouchouicha Kada**, « Modélisation multi spectrale des images satellitaire-application : quantification du bilan d'énergie Sol-Atmosphère », Thèse de doctorat, Université d'Oran, 2017.
- [20] **Aouchiche Nedjma**, « Conception d'une Commande MPPT Optimale à base d'intelligence artificielle d'un Système photovoltaïque », Thèse de Doctorat, Université bourgogne Franche-Comté, 2020.
- [21] **Merad Faiza**, « conception d'un programme de calcul du rayonnement solaire, cas particulier de la région de Mostaganem », Diplôme de Magister, Université Mostaganem, 2013.
- [22] **Mme Samira Mouhous-Chaouchi**, « Etude statistique du rayonnement solaire sur un plan incliné », mémoire de magister, université Abou Beker Belkaid, centre de developpement d'énergie renouvelable, 2012.
- [23] **Belkaid Abdelhakim**, «Conception et Implémentation d'une Commande MPPT de haute performance pour une chaîne de conversion photovoltaïque autonome », diplôme de doctorat en sciences, Université Ferhat Abbas – Sétif 1, 2015.
- [24] **Corinne Alonso**, « Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie », mémoire de l'habilitation à diriger les recherches, université Paul Sabatier-Toulouse III, soutenue le : 12/ 10 2003.
- [25] **M. Nour El Houda, B. Bahriya**, « Etude d'injection de l'énergie photovoltaïque dans un réseau électrique à travers une ligne 30KV », mémoire de master, Université Badji 2018.
- [26] **Hélène Horsin Molinaro, Bernard Multon**, « énergie électrique : génération photovoltaïque », culture sciences de l'ingénieur, école normal supérieur paris-saclay, édité le : 20/ 01/ 2020.
- [27] **Khenfer Riad**, « Détection et Isolation de défauts Combinant des Méthodes à base de données Appliquées aux Systèmes électro-énergétiques », Thèse de doctorat en sciences, universite Ferhat Abbas – Sétif 1, 2015.
- [28] **Boukhers Djamil**, « optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompage », mémoire de magister en électrotechnique, université mentouri de Constantine, 2007.
- [29] **Djellali el Hossyen**, « Commande des Convertisseurs DC-DC par Mode de Glissement (Application pour le Module Energie de Bord des Microsatellites »), Thèse de Magister, Université d'Oran Mohamed Boudiaf, 2012.
- [30] **Tarek Bouguerra**, « Optimisation d'un Système Photovoltaïque : Application en continu et en alternatif », Mémoire de Magister en électrotechnique, Université Constantine 1, 2014.
- [31] **Fathi Ghaleb, Kamel Bendjbar, Souad Haouari**, « Lumière et Cellule Solaire », polycopie des travaux pratiques, Département de physique énergétique, Université d'Oran, 2016.

- [32] **Abdelmalik Zorig**, « Modélisation et commande d'un système de production d'énergie photovoltaïque couplé au réseau triphasé », Mémoire de Master, Université de Msila, 2011.
- [33] **M. Slama Fateh**, « Modélisation d'un Système multi générateurs Photovoltaïques interconnectés au réseau électrique », mémoire de magister en électrotechnique, Université Ferhat Abbas – Sétif, 2011.
- [34] **Fellah Nadia, Sidibe Oumar** « Etude et dimensionnement de l'installation photovoltaïque du DECANAT de la faculté ST », Mémoire Master, Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, 2019.
- [35] **J Royer, T Djiako, E Schiller, B Sada Sy**, « le pompage photovoltaïque Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens », IEPF/Université d'Ottawa/EIER/CREPA.
- [36] **Saad Saoud Merwan**, « Optimisation de la gestion de l'énergie photovoltaïque utilisée dans une zone agricole » Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar - Annaba, 2017.
- [37] **Mohamed Redha Rezoug**, « Etude et Réalisation d'un Système d'orientation et de Conversion Destiné à Optimiser le Rendement d'un Système Photovoltaïque », Thèse de Doctorat, Université des Constantine, 2018.
- [38] **Mohamed Lakhdar Louazenen**, « Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla », Mémoire de Magister, de Université de Batna, 2008.
- [39] **M. Boukli-hacene Omar**, « Conception et Réalisation d'un Générateur Photovoltaïque Muni d'un Convertisseur MPPT pour une Meilleure Gestion Energétique », Thèse de Magister, Université Abou Belkaid-Tlemcen 2011.
- [40] **Belhadj Mohammed**, « Modélisation d'un Système de Captage Photovoltaïque autonome », Mémoire de Magister, Universitaire de Bechar, 2008.
- [41] **Helali Kamelia**, « Modélisation d'une Cellule photovoltaïque : Etude Comparative », mémoire de magister en électrotechnique », Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 20012.
- [42] **Cédric Cabal**, « optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque », Thèse doctorat, Université de Toulouse 3, 2008.
- [43] **Seif Eddine Naffouti**, « Dimensionnement et Commande d'un hacheur parallèle alimenté par une source photovoltaïque », Mémoire de Monastir, Université de Tunisie 2012.
- [44] **Cuong Hung Tran**, « Améliorations d'une Chaîne de conversion de l'énergie solaire en électricité autonome en vue d'application dans les pays en voie de développement », Thèse de Docteur, Université de Reims Champagne-Ardenne, 2019.
- [45] **Mohamed Lakhdar Louazene**, « Contribution à l'optimisation des systèmes photovoltaïques utilisés pour l'irrigation dans les zones sahariennes », Thèse de Doctorat Université el Hadj-Lakhdar – Batna ,2015.
- [46] **Ndiaye Papa Amadou et Kawther Achari**, « Production d'énergie électrique à partir d'un système photovoltaïque », Mémoire de Master, Université 8 Mai 1945 – Guelma, 2019.
- [47] **ABBASSEN Lyes**, « Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque », Mémoire de Magister, Université de Tizi Ouzou, 2011.

- [48] **Boutillis Fatima**, «Modélisation et Simulation des sources de production décentralisée Application à l'intégration d'un générateur PV à stockage dans un réseau électrique », Thèse de doctorat, Université de Mostaganem, 2018.
- [49] **Vittorio Guida**, «Conception et Réalisation d'un Convertisseur DC/DC à Haut Rapport de Conversion pour Électrolyseurs », Thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2020.
- [50] **Djeriou Salim**, « Simulation d'un Système Photovoltaïque Alimentant une machine asynchrone », Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif ,2011.
- [51] **ABID Ayyoub, Bechlaghem Yassine**, «Etude et dimensionnement d'un convertisseur SEPIC pour une application photovoltaïque », Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2017.
- [52] **Mahamat Chabakata**, « Analyse et commandes des convertisseurs multiniveaux pour un générateur photovoltaïque connecté au réseau électrique », Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay2018.
- [53] **Huang Bin**, « Convertisseur continu-continu a rapport de transformation élevé pour application pile à combustible, Nancy », Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, 2009.
- [54] **Sébastien Sanchez**, « Contribution à la conception de coupleurs magnétiques robustes pour convertisseurs multicellulaires parallèles », Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 2015.
- [55] **CUONG HUNG TRAN**, «Améliorations d'une chaîne de conversion de l'énergie solaire en électricité autonome en vue d'application dans les pays en voie de développement », Thèse de docteur, Université de Reims Champagne-Ardenne, 2019.
- [56] **Than Nguyen**, « Solar Panel Maximum Power Point Tracker », undergraduate Thesis, University of Queensland, 19 October 2001, Canada.
- [57] **Bhatnagar, P., & Nema, R. K.** (2013). , « Maximum power point tracking control techniques », State-of-the-art in photovoltaic applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 23, 224-241.
- [58] **Motahir, S., Ghizal, A., & Derouich, A.** (2015, May), « Modélisation et commande d'un panneau photovoltaïque dans l'environnement PSIM In Congrès International de Génie Industriel et Management des Systèmes».
- [59] **HAKOUMI Ahme, BENAMAR Abdeldjalil**, «Commande MPPT et contrôle d'un système photovoltaïque 3KW par la logique floue », Mémoire de Master, Université Ahmed Draia Adrar 2019.
- [60] **Houria BOUMAARAF**, « Modélisation et Commande Numérique d'un Système Photovoltaïque Connecté au Réseau », Mémoire de Magister, Université Houari Boumediene, 2010.
- [61] **Bouzeria Hamza**, « Modélisation et Commande d'une Chaîne de Conversion Photovoltaïque », Thèse de Doctorat, Université hadj Lakhdar Batna, 2016.
- [62] **Hua, Chihchiang, Jongrong Lin, and Chihming Shen.** "Implementation of a DSP-controlled photovoltaic system with peak power tracking." IEEE transactions on industrial electronics 45.1 (1998) : 99-107.
- [63] **BOUDJELLAL Bilal**, « Caractérisation des défauts des Convertisseurs Statiques intégrés dans un Système électrique a énergie renouvelable", Thèse de doctorat, Université de Msila, 2017.

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
DE MASTER EN GENIE ELECTRIQUE**

SPECIALITE : ELECTROTECHNIQUE

Proposé et dirigé par :

Dr. BOUDJELLAL Bilal

Présenté par :

BULHOUT Samiha

BOUCGAREB Malika

Thème :

Optimisation énergétique de chaine de conversion d'énergie photovoltaïque

Résumé :

Le générateur photovoltaïque est une source caractérisée par un seul point de fonctionnement où la puissance générée est maximale. Ce point se déplace en fonction des conditions climatiques. Une adaptation adéquate entre le générateur solaire et la charge permet de diminuer le coût de l'installation de tels systèmes. Une utilisation optimale de l'énergie fournie par le générateur solaire nécessite l'utilisation des moyens techniques permettant d'assurer cette tâche.

L'objectif de cette mémoire est de contribuer à l'optimisation d'une chaine de conversion PV. Dans cette mémoire, nous avons étudié un système de production de l'énergie photovoltaïque. Simulations ont été étudiées à savoir la maximisation de puissance MPPT par les technique 'perturbe et observe' (P&O) pour assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur photovoltaïque à l'aide du convertisseur boost classique, nous l'avons remplacé par un boost entrelacé à deux et trois bras. Les résultats de la simulation obtenue sont très encourageants.

Mots clés : Système photovoltaïque, Convertisseur boost, Boost entrelacé, Commande MPPT, P&O.

N° d'ordre : 09