



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique

Université Amar Thelidji-Laghouat

Faculté de Technologie
Département Electrotechnique

Mémoire de MASTER

Domain : SCIENCE ET TECHNOLOGIE

Filière : Génie Electrique

Option : Commande Electrique

Présenté par : - HADJOUJJA AHMED
- HASSANI IBRAHIM

THEME

**Amélioration de la Qualité d'Énergie d'un Système
Photovoltaïque Raccordé au Réseau Électrique**

Soutenu publiquement devant le jury composé de:

KOUZI Katia
BESSEDIK Sid ahmed
OUAI Attalah

Pr
M.C.A
M.C.A

Président
Examineur
Rapporteur

Année Universitaire 2020/2021

ملخص

الهدف الأساسي من العمل المطروح في هذه المذكرة هو تحسين نوعية الطاقة في محطة كهروضوئية موصلة بشبكة كهربائية. لقد قمنا بوصف و نمذجة لمختلف الأجزاء المكونة لهذه المحطة (مولد كهروضوئي، محول مستمر-مستمر موج ذي النبضات المعدلة العرض). التأثيرات المناخية تؤدي إلى تذبذب نقطة استطاعة العظمى لأن خاصية المولد كهروضوئي $I(v)$ تتلخص أساساً بالإشعاع الشمسي و درجة الحرارة.

بالإضافة إلى ذلك، تم استعمل هذا النظام الكهروضوئي من أجل تحسين نوعية الطاقة من خلال ترشيح نوافذات تيارات العاكس. وفي هذا السياق تم اقتراح إضافة المرشح LCL من أجل تحسين تيار الشبكة الكهربائية. النتائج المتحصل عليها عن طريق المحاكاة تبين فعالية و حسن أداء المرشح المستعمل من ناحية تحسين جودة طاقة الشبكة الكهربائية.

الكلمات مفتاحية: مولد كهروضوئي، شبكة الكهربائية، محول مستمر-مستمر، موج ذي النبضات المعدلة العرض، مرشح LCL، تحسين نوعية الطاقة.

Résumé

L'objectif principal des travaux présentés dans ce mémorandum est d'améliorer la qualité de l'énergie dans une station photovoltaïque raccordée à un réseau électrique. Nous avons décrit et modélisé les différents composants de cette station (générateur électro voltaïque, transformateur DC-DC). Les changements climatiques conduisent à la fluctuation du point de puissance maximale car la caractéristique du générateur électro voltaïque $I(v)$ est principalement liée au rayonnement solaire et à la température.

De plus, ce système photovoltaïque a été utilisé pour améliorer la qualité de l'énergie en filtrant les harmoniques des courants des onduleurs. Dans ce contexte, il a été suggéré d'ajouter le filtre LCL afin d'améliorer le courant du réseau électrique. Les résultats obtenus par simulation montrent l'efficacité et les bonnes performances du filtre utilisé en termes d'amélioration de la qualité énergétique du réseau électrique.

Mots clés : générateur électro voltaïque, réseau électrique, transformateur DC-DC, WPM ondulé, filtre LCL, amélioration de la qualité énergétique.

Abstract

The main objective of the work presented in this memorandum is to improve the quality of energy in a photovoltaic station connected to an electric grid. We have described and modeled the various components of this station (electrovoltaic generator, DC-DC transformer). Climatic changes lead to fluctuation of the maximum power point because the characteristic of the electrovoltaic generator $I(v)$ is mainly related to solar radiation and temperature.

In addition, this photovoltaic system was used to improve the power quality by filtering the harmonics of the inverter currents. In this context, it was suggested to add the LCL filter in order to improve the current of the electrical network. The results obtained through simulation show the effectiveness and good performance of the filter used in terms of improving the power quality of the electrical network.

Keywords: electrovoltaic generator, electrical grid, DC-DC transformer, WPM corrugated, LCL filter, energy quality improvement.

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à exprimer nos sincères remerciements à nos encadreurs Mr. OUAI Atallah pour nous avoir encadrés durant ce projet et nous avoir conseillés tout au long de notre travail.

Nous remercions aussi les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en évaluant notre travail.

Nous tenons à remercier particulièrement les enseignants de la faculté de Technologie, Université Amar Telidji pour tout ce qui nous ont transmis, leurs efforts et leur disponibilité.

Que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail trouvent ici l'expression de notre sincère gratitude.

Dédicace

Je dédie ce mémoire, aux personnes qui me sont les plus chères
mes parents qui m'ont énormément soutenu dans les moments les
plus difficiles, partagé mes joies et mes peines, qui se sont toujours
sacrifiés à mes dépends.

A mes frères et à mes sœurs

A toute ma famille.

A mes amis et collègues.

A.HADJOUDDJA

Dédicace

Je dédie ce mémoire, aux personnes qui me sont les plus chères
mes parents qui m'ont énormément soutenu dans les moments les
plus difficiles, partagé mes joies et mes peines, qui se sont toujours
sacrifiés à mes dépends.

A mes sœurs

A toute ma famille.

A mes amis et collègues.

B.HASSANI

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	1
Chapitre I : Etat de l'Art des Système Photovoltaïque	
I-1- Introduction.....	4
I-2-Qu'est-ce que l'énergie renouvelable ?	4
I-3-Les énergies renouvelables.....	5
I-3-1-le Soleil.....	5
I-3-2-la Terre.....	5
I-4-Les différents types d'énergies renouvelables.....	5
I-4-1-Energie éolienne.....	5
I-4-2-L'énergie hydraulique - Hydroélectricité.....	6
I-4-3-La biomasse.....	6
I-4-4-La Géothermie.....	6
I-4-5-L'énergie solaire.....	6
I-5-L'énergie solaire photovoltaïque.....	6
I-6-L'énergie solaire.....	7
I-7- Rayonnement solaire.....	8
I-8- le champ PV.....	8
I-9-Différent types de système PV.....	9
I-9-1-Système autonome.....	9
I-9-2-Système hybride.....	9
I-9-3-Systèmes raccordés au réseau.....	10
I-10-Avantages et inconvénients d'une installation PV	10
I-11-Systèmes Photovoltaïques Connectés au Réseau	11

I-12-Eléments constitutifs d'une installation connectée au réseau.....	13
I-13-Types des installations photovoltaïques connectées au réseau.....	13
I-13-1-Centrale de production d'énergie photovoltaïque.....	13
I-14-Longévité des systèmes photovoltaïques.....	14
a-Les panneaux.....	14
b-Les onduleurs.....	14
I-15-Avantages et inconvénients des systèmes connectés au réseau.....	15
I-16-Description des Centrales PhotovoltaïquesConnectées au Réseau.....	15
I-17-Centrales photovoltaïques connectées au réseau dans le monde.....	16
I-18-Description générale des centrales photovoltaïques connectées au réseau.....	18
I-19-Description générale des différents blocs constituant la Centrale Photovoltaïque Connectée au Réseau	19
I-12-Classifications des Centrales Photovoltaïques Connectées au Réseau	20
I-21-Composants des centrales photovoltaïques connectées au réseau	21
a- Générateur photovoltaïque	21
b- La poursuite du point de puissance maximale	21
I-22-conclusion	22

Chapitre II : Modélisation des composants d'une centrale PV connecté au réseau

II-1- introduction.....	24
II-2-La cellule photovoltaïque	24
II-2-1-Définition d'une cellule solaire	24
II-2-2- Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire	24
II-3-La cellule PV	25
II-4-Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque	25

II-4-1-Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque	25
a-La résistance série	26
b-Résistance parallèle	26
II-5-Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque	27
II-6- Les filières technologiques d'une cellule photovoltaïque	28
II-7-composant d'un système photovoltaïque	28
II-7-1-Modules	28
II-7-2-Association d'un générateur photovoltaïque	30
a. Une association de n_s cellules en série permet.....	30
b. Association parallèle.....	31
II-8- Caractéristiques d'un module	32
II-8-1- Effet de l'éclairement.....	33
II-8-2- Influence de la température.....	34
II-8-3- Interprétations des Résultats.....	35
II-9- Le Panneau Photovoltaïque	35
II-10-Convertisseurs DC/DC	36
II-10-1-Convertisseur abaisseur "Buck"	37
II-10-2-Convertisseur élévateur "BOOST"	37
II-10-3- Convertisseur BUCK -BOOST	38
II-11-Commande MPPT	39
II-11-1-Principe De La Commande MPPT	39
II-11-2- Classification Des Commandes MPPT	40
II-11-3-Techniques de commande MPPT	41
II-12-Convertisseurs DC/AC	43
II-12-1 Principe de fonctionnement d'un onduleur	43

II-12-2- Les types des onduleurs	44
II-13-Commande de l'onduleur photovoltaïque connecté au réseau	45
II-14-conclusion	47

Chapitre III : Simulation et discussion

III-1-introduction.....	50
III-2- l'amélioration de la qualité d'énergie.....	50
III-3- Distorsion harmonique globale (Total Harmonic Distorsion, THD).....	50
III-4-Dimensionnement du générateur photovoltaïque.....	51
III-4-1- Caractéristiques globales d'un générateur photovoltaïque.....	51
III-5-filtre LCL	53
III-5-1- Procédure de dimensionnement.....	54
III-5-2- Limites sur les éléments du filtre LCL	54
III-5-3- Calcul de l'inductance maximale.....	55
III-5-4- Calcul de l'inductance L1 (inductance du côté onduleur)	55
III-5-5-Calcul de l'inductance L2 (inductance du côté réseau).....	55
III-5-6- Calcul de la capacité du filtre	56
III-5-7- Fréquence de filtre.....	56
III-5-8- Résistance à l'amortissement.....	56
III-6- Résultat de simulation d'un générateur PV couplé au réseau via un onduleur à MLI (d'une batterie).....	57
III-7-Résultat de simulation d'un générateur couplé au réseau via un onduleur à MLI en cascade avec un hacheur	59
III-8-conclusion.....	61
Conclusion générale.....	62

Liste des abréviations

I_{op}	: Courant optimum (A)
V_{op}	: Tension optimum (V)
P_m	: Puissance maximal (W)
I_d	: Le courant traversant la diode. (A)
I_{ph}	: Courant photo généré. (A)
I_p	: Le courant traversant la résistance parallèle. (A)
I_{cc}	: Le courant de court-circuit (A)
V_{co}	: La tension de circuit ouvert. (V)
I_{sa}	: Courant de saturation de la diode (A)
n	: Coefficient d'idéalité de la diode
T	: La température de la cellule (C°)
V_{th}	: La tension thermique (V)
I_{ccr}	: Courant de court-circuit de référence. (A)
R_p	: Résistance en parallèle. (Ω)
R_c	: Résistance en série (Ω)
G	: L'irradiation solaire (W / m ²)
q	: Charge d'électron $q = 1.602 \cdot 10^{-19}$ c (C)
C_1	: La capacité (F)
K	: Constante de Boltzmann $k = 1.381 \cdot 10^{-23}$ J/K (J / K)
D	: Est appelé rapport cyclique, et compris entre 0 et 1
PV	: Photovoltaïque
SAPV	: Stand alon Photovoltaïque
GPV	: Générateur Photovoltaïque
FF	: Facteur de forme
MPPT	: Maximum Power Point Tracking
P&O	: Perturbation et Observation
DC	: Courant Continu
AC	: Courant Alternative
η	: Rendement
P_c	: Puissance crête (Wc)
K_h	: Gain statique

Liste des figures

Chapitre I : Etat de l'Art des Système Photovoltaïque

Figure I.1 : regroupement de modules solaires photovoltaïques.....	4
Figure I.2 : Types de rayonnements solaires reçus au sol.....	8
Figure I.3 : Champ photovoltaïque.....	9
Figure I.4 : Système photovoltaïque raccordé au réseau.....	10
Figure I.5 : Types des systèmes connectés au réseau.....	12
Figure I.6 : Configuration d'un système PV avec : a) un onduleur b) plusieurs onduleurs.....	14
Figure I.7 : Schéma d'une Centrale Photovoltaïque Connectées au Réseau.....	20
Figure I.8 : Schéma bloc d'un convertisseur MPPT.....	22

Chapitre II : Modélisation des composants d'une centrale PV connecté au réseau

Figure II-1 : Schéma d'une cellule photovoltaïque.....	25
Figure II-2 : Schéma électrique du modèle équivalent à deux diodes d'une cellule Photovoltaïque	26
Figure II-3 :Caractéristique courant-tension et paramètres physiques d'une cellule photovoltaïque	28
Figure II-4 : module Photovoltaïques.....	29
Figure II-5 : Caractéristique courant tension d'un module PV.....	30
Figure II-6 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de ns cellules en série.....	31
Figure II-7 : Caractéristiques résultant d'un groupement de N_p cellules en parallèle.....	31
Figure II-8 : Influence de l'éclairement sur les caractéristiques électriques P-V et I-V.....	33
Figure II-9 : Influence de la température sur les caractéristiques électriques P-V et I-V.....	34
Figure II-10 : Caractéristique $P=f(V)$ de la Cellule.....	35
Figure II-11 : Caractéristique $I=f(V)$ de la cellule.....	36
Figure II-12 : Convertisseur continu-continu.....	36
Figure II-13 : Convertisseur Buck.....	37

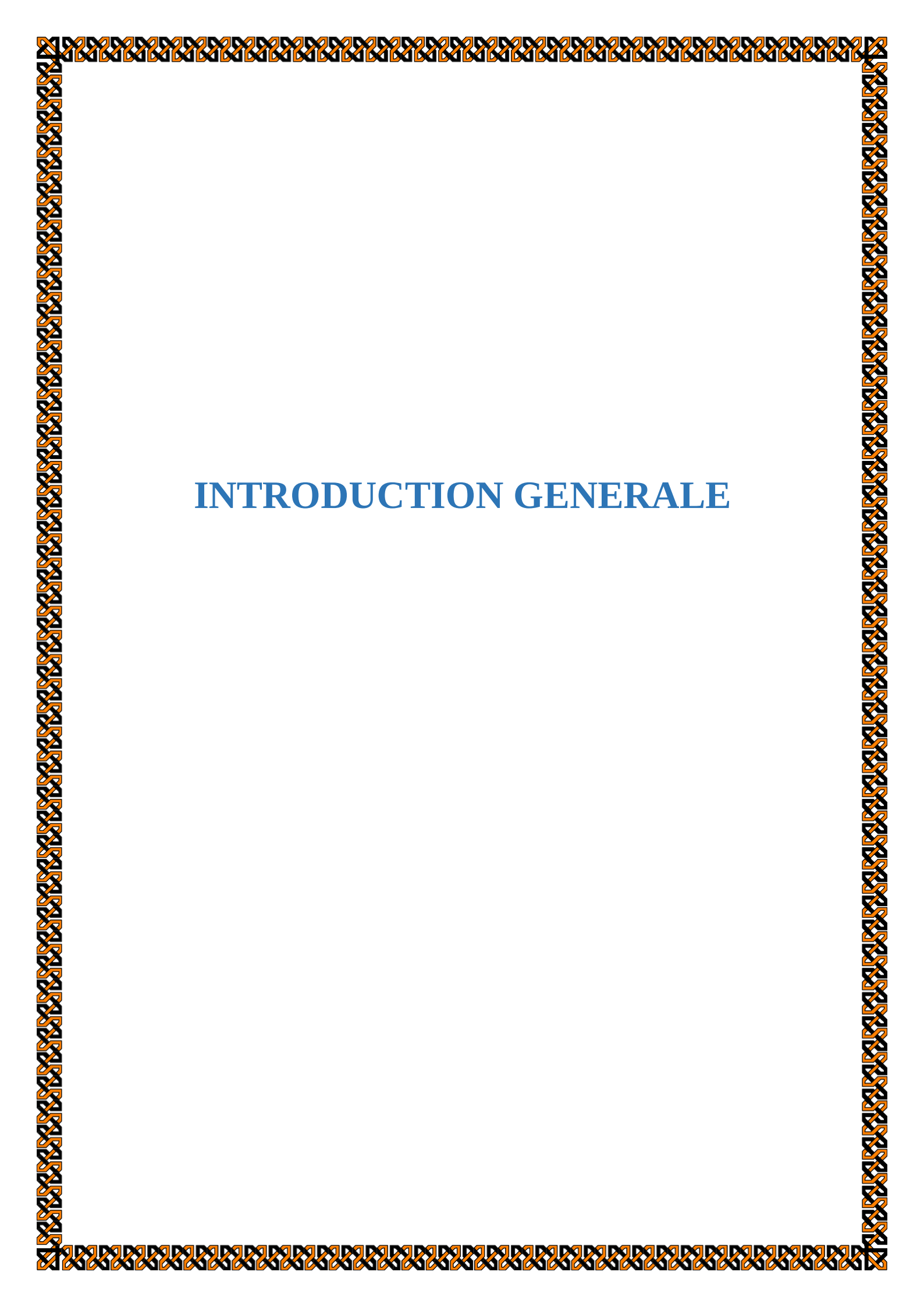
Figure II-14 : Formes d'ondes du hacheur de type BOOST.....	37
Figure II-15 : Schéma théorique d'un convertisseur buck-boost.....	38
Figure II-16 : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge.....	39
Figure II-17 : Principe de la commande MPPT.....	40
Figure II-18 : Principe de la première technique MPPT numérique.....	41
Figure II-19 : Recherche du PPM par la méthode (P&O).....	42
Figure II-20 : Relation entre PPV et le rapport cyclique D du convertisseur statique.....	43
Figure II-21 : schéma d'un onduleur monophasé.....	44
Figure II-22 : La topologie « Onduleur Central ».....	45
Figure II-23 : Contrôle de courant par hystérésis.....	46
Figure II-24 : Contrôle de courant par MLI.....	46
Figure II-25 : Principe de la Commande MLI.....	47

Chapitre III : Simulation d'un Système PV

Figure III-1 : Evolution de la caractéristique (I-V) du générateur en fonction de la température...	51
Figure III-2 : Evolution de la caractéristique (P-V) du générateur en fonction de la Température..	51
Figure III-3- : Evolution de la caractéristique (I-V) du générateur en fonction de L'éclairement...	52
Figure III-4- : Evolution de la caractéristique (P-V) du générateur en fonction de l'éclairement...	52
figure III-5- : résultats de simulation de système PV étudié en absence du filtre LCL.....	57
Figure III-6- : résultat de simulation du système PV étudié en présence d'un filtre LCL.....	58
La Figure III-7- : Résultat de simulation d'un générateur PV connecté au réseau (hacheur + onduleur + réseau) avant et après le filtrage.....	60

Liste des tableaux

Tableau (II.1) Caractéristiques physiques et électriques du module photovoltaïque BP SX 150 S.....	32
Tableau (II.2) : Les principales caractéristiques électriques de l'onduleur.....	44
Tableau (III.2) : paramètre électrique du filtre LCL.....	55



INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution.

Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit, les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures [1].

Dans ce mémoire de mastère, on a parlé généralement sur les énergies renouvelable on précis le système PV raccordés au réseau et les Avantages et inconvénients d'une installation PV et leur types des installations photovoltaïques et les Centrales Photovoltaïques Connectées au Réseau Ainsi, la production photovoltaïque peut être autonome ou injectée au réseau électrique. Ce présent travail de mastère traite un système PV connecté au réseau. Etant donné que la production PV est intermittente, l'injecter dans un réseau dont la production est stable nécessite une étude approfondie. Dans ce contexte, le premier objectif de ce travail sera d'étudier la structure d'un système PV raccordé au réseau.

De la chaîne PV au réseau dépend de la charge qu'ils fournissent, les appareils doivent être utilisés pour améliorer leur qualité.

Par conséquent, le deuxième objectif est de mener une étude de la qualité de l'énergie injectée dans le réseau pour réduire les perturbations qui vont survenir sur celui-ci.

Cette thèse sera structurée sous la forme de trois chapitres:

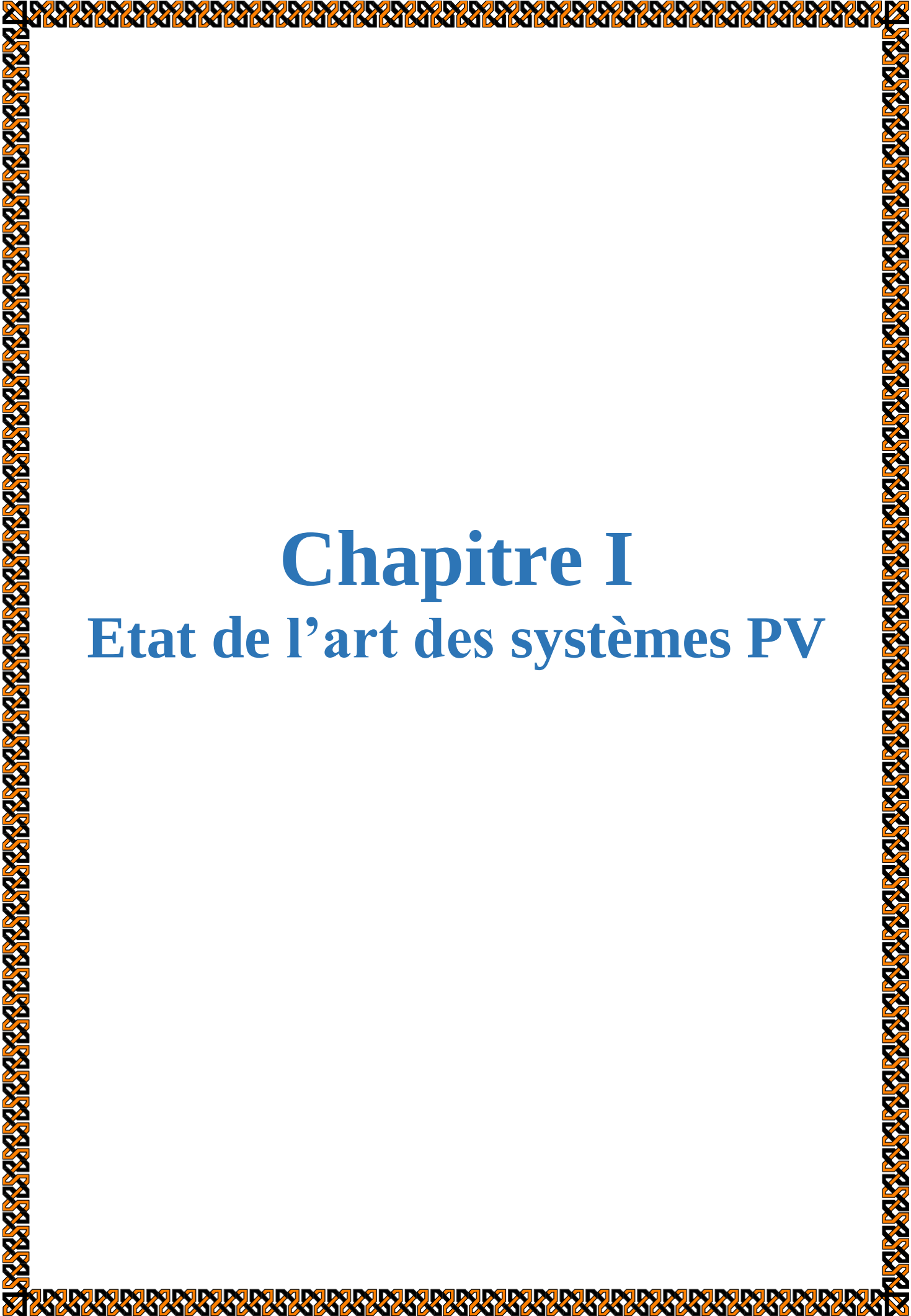
- Le premier chapitre : généralité sur les énergies renouvelables et les types d'énergies (L'énergie solaire) et spécialement le système PV avec le Différent types et les systèmes PV raccordé au réseau et en fin description des centrales Photovoltaïques connectées au réseau
- Le deuxième chapitre : fera l'objet d'une étude générale sur les générateurs PV où le modèle mathématique ainsi que les caractéristiques du panneau PV seront mentionnés. Nous présenterons aussi les différentes structures utilisées des chaines PV connectées au réseau. et portera sur la modélisation de chaque partie de la chaine PV à savoir le

convertisseur DC-DC et sa commande MPPT, le convertisseur DC-AC et sa commande MLI sinus triangle

- Le troisième chapitre : sera consacré aux résultats de simulation de toute la chaîne PV connectée au réseau. Les simulations seront effectuées sous l'environnement MATLAB

Et l'étude de la qualité de l'onde du courant du réseau au point de raccordement. Pour éliminer les différentes perturbations ont utilisé un filtre LCL passe bas.

Enfin, on termine par une conclusion générale qui résume l'ensemble des résultats obtenus.



Chapitre I

Etat de l'art des systèmes PV

I-1-Introduction

Les énergies renouvelables (hydraulique, solaire, éolien, géothermie et biomasse) se développent intensément partout dans le monde, portées par la nécessité de lutter contre le réchauffement climatique en réduisant les émissions de gaz à effet de serre [2].



Figure I.1 regroupement de modules solaires photovoltaïques [2].

I-2-Qu'est-ce que l'énergie renouvelable ?

Sont considérées comme renouvelables toutes les sources d'énergie qui ont la capacité de se renouveler de manière quasi infinie et à un rythme plus rapide que leur utilisation. Comme le soleil, le vent ou l'eau, par exemple. Aujourd'hui, les énergies renouvelables représentent 9,4 % de la consommation d'énergie primaire. Des chiffres en progression régulière depuis une dizaine d'années grâce à l'essor des biocarburants, des pompes à chaleur et de la filière éolienne. Une progression qui repose notamment sur la contribution des particuliers.

A la fin de l'année 2015, la part des énergies renouvelables dans la consommation finale représentait 14,9 %. L'objectif de la loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte à horizon 2030 est de porter à 32% la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique global. Que cet objectif soit ou non exactement atteint, l'évolution des chiffres de production depuis 2005 démontre que l'adoption des énergies renouvelables est à présent une

composante du paysage social, économique et environnemental. Adopter ces énergies alternatives aujourd'hui s'assimile à une démarche moderne et responsable. En anticipant ce que sera demain, une entreprise prouve ainsi sa capacité à anticiper et donc à innover [2].

I-3-Les énergies renouvelables : Une énergie est dite renouvelable lorsqu'elle est produite par une source que la nature renouvelle en permanence, contrairement à une énergie dépendant de sources qui s'épuisent. Les énergies renouvelables sont très diverses mais elles proviennent toutes de deux sources naturelles principales [3] :

I-3-1-le Soleil : il émet des rayonnements transformables en électricité ou en chaleur, il génère des zones de températures et de pression inégales à l'origine des vents, il engendre le cycle de l'eau, il permet la croissance des plantes et la génération de la biomasse [3].

I-3-2-la Terre : dont la chaleur interne peut être récupérée à la surface.

Exemple :

- Vent : éolienne
- Soleil : thermique, photovoltaïque, thermodynamique.
- Chaleur terrestre : géothermie.
- Eau : hydroélectrique, marémotrice.
- Biodégradation : biomasse.
- Biocarburant.

I-4-Les différents types d'énergies renouvelables

I-4-1-Energie éolienne : Comme les moulins à vent du passé, les éoliennes génèrent des forces mécaniques ou électriques.

Avec une puissance mondiale installée de 200 GW en 2011, l'énergie éolienne est devenue un producteur majeur d'énergies renouvelables électriques. L'énergie éolienne est produite par des aérogénérateurs qui captent à travers leurs pales l'énergie cinétique du vent et entraînent elles-mêmes un générateur produit de l'électricité d'origine renouvelable. L'énergie éolienne ambitionne de fournir à l'horizon 2020 de 14 à 18 % de l'électricité qui sera consommée en Europe [3].

I-4-2-L'énergie hydraulique - Hydroélectricité : À L'image des moulins à eau de jadis, l'hydroélectricité ou production d'électricité par captage de l'eau est apparue au milieu du [3] XIXe siècle. L'eau fait tourner une turbine qui entraîne un générateur électrique qui injecte les Kilowattheures sur le réseau. L'énergie hydraulique représente 19% de la production totale d'électricité dans le monde. C'est la source d'énergie renouvelable la plus utilisée. Cependant, tout le potentiel hydroélectrique mondial n'est pas encore exploité.

I-4-3-La biomasse : Comprend trois familles principales :

- Les bois énergie ou biomasse solide
- Le biogaz
- Les biocarburants

Ce sont tous des matériaux d'origine biologique employés comme combustibles pour la production de chaleur, d'électricité ou de carburants [3].

I-4-4-La Géothermie : La géothermie est l'exploitation de la chaleur stockée dans le sous-sol. L'utilisation des ressources géothermales se décompose en deux grandes familles : la production d'électricité et la production de chaleur. En fonction de la ressource, de la technique utilisée et des besoins, les applications sont multiples. Le critère qui sert de guide pour bien cerner la filière est la température. Ainsi, la géothermie est qualifiée de « haute énergie » (plus de 150°C), « moyenne énergie » (90 à 150°C), « basse énergie » (30 à 90°C) et « très basse énergie » (moins de 30°C) [3].

I-4-5-L'énergie solaire : L'énergie solaire, qu'elle soit photovoltaïque ou solaire thermique, a une caractéristique remarquable : elle peut être produite et consommée ponctuellement, par tout un chacun, pauvre ou riche, dans des endroits isolés ou au cœur des villes. Ce caractère diffus et universel lui assure une place particulière dans les nouveaux usages énergétiques de demain [3].

Est produite sous deux formes :

- **Le solaire photovoltaïque** qui transforme le rayonnement lumineux du soleil en électricité grâce à des panneaux formés de cellules de semi-conducteurs.
- Et **le solaire thermique** qui capte la chaleur du soleil, qu'on utilise comme telle ou bien qu'on transforme en énergie mécanique, puis en électricité.

I-5-L'énergie solaire photovoltaïque : L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs comme le silicium ou recouverts d'une mince couche métallique. Ces matériaux

photosensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure. C'est l'effet photovoltaïque. L'énergie est apportée par les photons, (composants de la lumière) qui heurtent les électrons et les libèrent, induisant un courant électrique. Ce courant continu de micro puissance calculé en watt crête (WC) peut être transformé en courant alternatif grâce à un onduleur.

L'électricité produite est disponible sous forme d'électricité directe ou stockée en batteries (énergie électrique décentralisée) ou en électricité injectée dans le réseau [4].

Un générateur solaire photovoltaïque est composé de modules photovoltaïques eux même composés de cellules photovoltaïques connectées entre elles.

Les performances d'une installation photovoltaïque dépendent de l'orientation des panneaux solaires et des zones d'ensoleillement dans lesquelles vous vous trouvez.

L'avenir du photovoltaïque dans les pays industrialisés passe par son intégration sur les toits et les façades des maisons solaires [4].

I-6-L'énergie solaire : L'énergie solaire vient de la fusion nucléaire qui se produit au centre du soleil. Elle se propage dans le système solaire et dans l'univers essentiellement sous forme d'un rayonnement électromagnétique de photons et de rayonnement infrarouge. L'énergie solaire reçue en un point du globe dépend de [5] :

- la latitude, la saison et l'heure, qui influent sur la hauteur du soleil et donc sur l'énergie reçue au sol par unité de surface, ainsi que sur la nébulosité en fonction du climat local.

La distance de la terre au soleil est d'environ 150 million de kilomètres et la vitesse de la lumière est d'un peu plus de 300000 km/h, les rayons du soleil mettent donc environ 8 minutes à nous parvenir. La constante solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au soleil. Sa valeur est communément prise égale à 1360W/m².

Au niveau du sol, la densité d'énergie solaire est réduite à 1000 W/ m² à cause de l'absorption dans l'atmosphère. Albert Einstein a découvert en travaillant sur l'effet photoélectrique que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie est portée par des particules, les photons [5].

L'énergie d'un photon étant donnée par la relation :

$$E = \frac{hc}{\lambda} \dots\dots\dots (I.1)$$

λ : La densité d'énergie solaire.

h : la constante de planck.

c : la vitesse de la lumière.

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande Une façon commode d'exprimer cette énergie est :

$$E = \frac{1.26}{\lambda} \dots\dots\dots (I.2)$$

I-7- Rayonnement solaire

Notre soleil est une étoile naine qui se compose de 74% d'hydrogène, 25% d'hélium et d'une fraction d'éléments plus lourds, sa température à la surface est d'environ 5530°C [5].

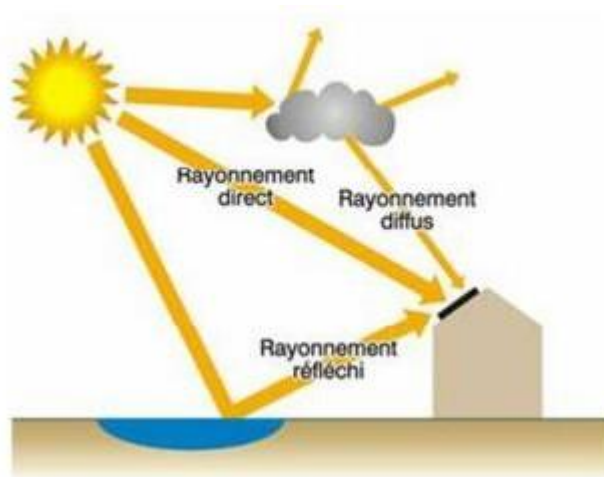


Figure I.2 Types de rayonnements solaires reçus au sol [5].

I-8- le champ PV

C'est un regroupement de modules solaires photovoltaïques raccordés entre-deux et destiné à produire de l'électricité, soit à titre autonome (panneaux solaires sur les toits des habitations par exemple), soit dans le cadre d'un raccordement à un réseau public de distribution d'électricité [6].



Figure I.3 Champ photovoltaïque [6].

I-9-Différent types de système PV

I-9-1-Système autonome

Les systèmes autonomes sont complètement indépendants d'autres sources d'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons, les chalets ou les camps dans les régions éloignées ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau [7].

Selon l'utilisation ou non du stockage électrochimique, les systèmes photovoltaïques autonomes sont classés comme suit :

- Des systèmes photovoltaïques autonomes avec stockage.
- Des systèmes photovoltaïques sans stockage (au fil du soleil).

I-9-2-Système hybride

Une des limites d'un système autonome purement photovoltaïque, comme on vient de le décrire, est qu'il fournit une puissance donnée, variable selon la saison, mais que l'on ne peut pas dépasser au risque de détruire la batterie ; or les consommateurs ont des besoins qui évoluent, et pas forcément en phase avec les saisons [7].

Avoir un système hybride, c'est disposer d'une autre source d'électricité qui vient compléter l'apport photovoltaïque. Cette autre source peut être un groupe électrogène (appelé aussi "génératrice") ou une éolienne. De tels systèmes ont habituellement des accumulateurs de stockage d'énergie et donc ils permettent en outre de recharger la batterie lorsqu'elle est faible. Un tel système photovoltaïque hybride fournit une grande fiabilité du système et peut

représenter la solution adéquate pour les sites isolés; il convient aussi lorsque la demande en énergie est élevée (pendant l'hiver ou tout le long de l'année) [7].

I-9-3-Systèmes raccordés au réseau

Un tel système s'installe sur un site raccordé au réseau. Généralement sur les habitations ou les entreprises qui souhaitent recourir à une forme d'énergie renouvelable et qui bénéficient d'un bon ensoleillement [8].

L'énorme avantage de cette solution est l'absence de batterie. On ne stocke plus l'énergie, on l'injecte directement au réseau local ou national. Il y a un compteur qui tourne dans un sens pour la consommation, et un autre dans l'autre sens pour la production. Mais il faut tout de même convertir le courant continu des panneaux en alternatif à travers un onduleur. Cet onduleur doit être homologué par la compagnie d'électricité qui va recevoir ce courant (il doit respecter des normes sur sa qualité sinusoïdale). Dans certains cas, on ajoute au système une batterie de secours pour les coupures de courte durée [8].

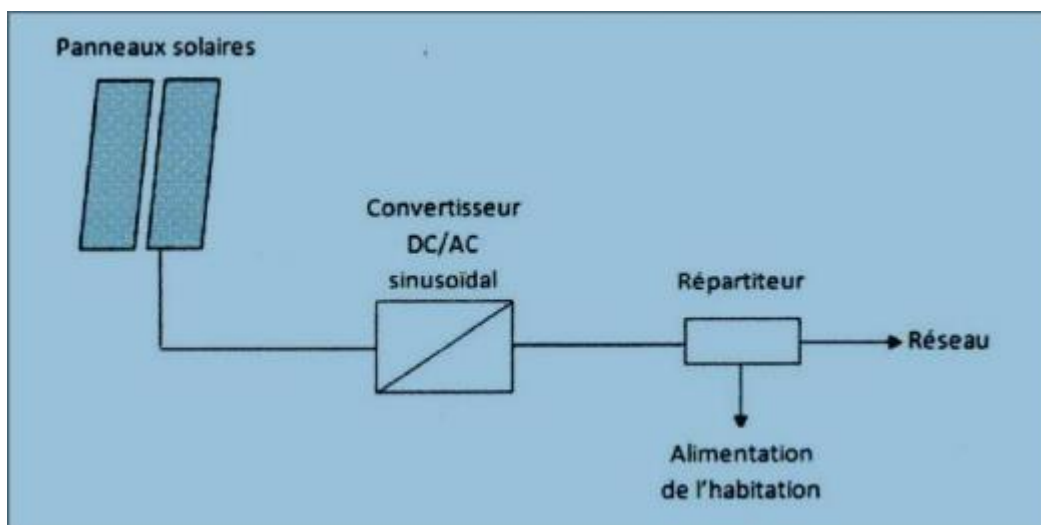


Figure I.4 : Système photovoltaïque raccordé au réseau [8].

I-10-Avantages et inconvénients d'une installation PV

1-Avantage

- Une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes

peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au mégawatt.

- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions [8].

2- Inconvénients

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % (soit entre 10 et 15 MW/km² par an pour le BENELUX) avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Tributaire des conditions météorologiques.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.
- Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur [8].

I-11-Systèmes Photovoltaïques Connectés au Réseau

Les systèmes connectés au réseau sont aujourd'hui prisent sérieusement pour compléter la génération conventionnelle d'énergie dans plusieurs pays industrialisés. Il y a certainement plusieurs projets de démonstrations connectés aux réseaux qui étudient cette possibilité. Bien qu'ils sont devenus viables dans le développement économique, la participation des

Photovoltaïques dans la génération d'énergie de grande échelle est augmentée à cause des effets environnementaux défavorables des sources conventionnelles d'énergie... [9].

Les installations photovoltaïques peuvent être raccordées au réseau, ce qui représente une économie importante en investissement et en fonctionnement. Elles utilisent le réseau comme un stock, et transforment la totalité de l'électricité produite en courant alternatif de 220 V ou 380V, ainsi que le photovoltaïque est la seule filière qui peut être installée n'importe où. On distingue deux types d'installations connectées au réseau :

- **Installation centralisée** : génération de la puissance Photovoltaïque à grand-échelle centralisée dans les stations de puissance Photovoltaïque.
- **Installation décentralisée** : forme alternative de génération de puissance distribuée dans les unités situées directement dans le lieu du consommateur.

De jour, les installations photovoltaïques couplées au réseau injectent de l'énergie dans le réseau à travers le convertisseur. Au contraire, pendant la nuit le propriétaire de l'installation peut "récupérer" cette énergie, dans le cas des installations décentralisées, et travaillent en cas de charges de pic avec le réseau, dans le cas des installations centralisées. Comme la consommation électrique est importante de jour, cette manière de procéder est très raisonnable [9].

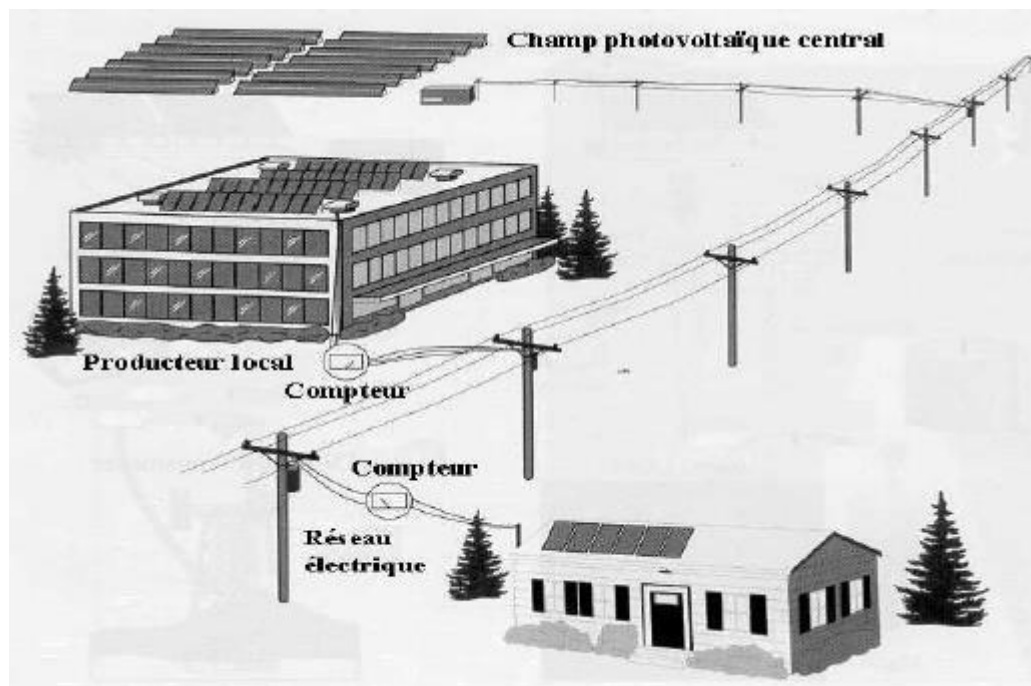


Figure I.5 : Types des systèmes connectés au réseau [9]

I-12-Eléments constitutifs d'une installation connectée au réseau

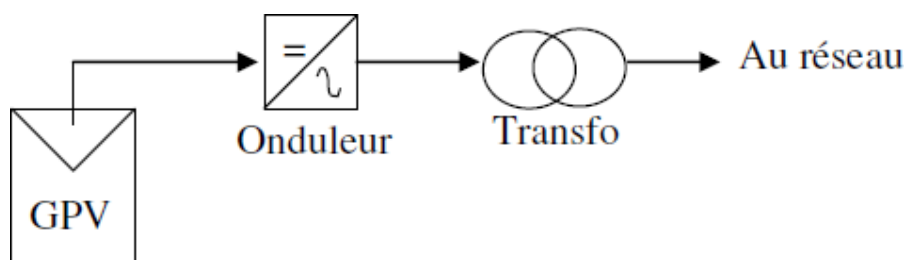
Elle est constituée de trois éléments essentiels :

- Les panneaux photovoltaïques
- Un onduleur synchrone qui transforme le courant pour qu'il soit compatible avec les caractéristiques du réseau. C'est "l'interface" entre l'installation et la compagnie d'électricité.
- Un compteur d'énergie (en fait, en général, deux compteurs dans le cas des Installations décentralisées).
- Accessoires [9].

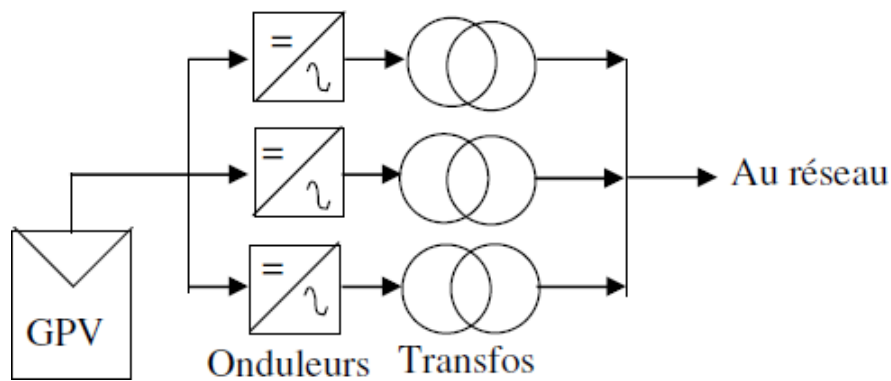
I-13-Types des installations photovoltaïques connectées au réseau**I-13-1-Centrale de production d'énergie photovoltaïque**

Avec les applications photovoltaïques connectées au réseau d'électricité national, il y a un fort potentiel de diffusion dans les pays industrialisés. Des centrales de production photovoltaïque sont expérimentées depuis quelques années en Europe, aux Etats-Unis et au Japon, mais elles sont encore au stade pilote. Seules les centrales photovoltaïques de moyenne et faible puissances (0,1 à 0,5 MW) semblent avoir une rentabilité économique. Elles seront vraisemblablement destinées à compléter le réseau en différents points critiques [10].

Un système de puissance PV qui génère la puissance instantanément alimente le réseau à travers un ou plusieurs onduleurs et transformateurs. La plupart des systèmes utilisent des redresseurs qui fonctionnent en régime onduleur équipés par un poursuiveur de point de puissance maximale comme il est montré sur la (Fig. II.2.a, II.2.b). A cause de tous ça il peut être économique de placer un système PV pour assister avec un réseau local durant les périodes de demande de pic pour fonctionner en parallèle, plus au moins que construire une nouvelle station de puissance . Aux extrémités d'un réseau, la qualité de la puissance se détériore lorsque la demande en électricité augmente. Une centrale photovoltaïque placée en bout de ligne permet de redresser la tension et d'améliorer la puissance [10].



A)



b)

Figure I.6 : Configuration d'un système PV avec :
A) un onduleur **b)** plusieurs onduleurs. [10]

I-14-Longévité des systèmes photovoltaïques

A-Les panneaux : les fabricants de panneaux cristallins, actuellement les plus répandus, garantissent une perte de rendement inférieurs à 5 ou 10% pour une durée de 25 à 30ans. Le rendement des panneaux au silicium amorphe, moins performant mais aussi moins chers, ne tient pas aussi longtemps. Dans un futur proche, les filières couche minces rassembleront les avantages de ces deux technologies : le bas prix du silicium amorphe, l'efficacité et la fiabilité des produits cristallins [10].

B-Les onduleurs : la nouvelle génération de ces appareils de haute technologie est très fiable. D'après les fabricants, ils tenir 10 ans en moyenne avant la première panne. Le prix de l'onduleur représente en principe 10 à 20% de l'investissement global ; son coût de remplacement en cas de panne après la période de garantie peut donc être pris en compte dans le calcul de retour sur investissement.

Un toit solaire étant modulaire, il doit en principe être facile d'en remplacer une partie en cas de défaillance, à condition que cela ait été prévu lors de la conception du projet et que les fabricants proposent des produits de dimensions et de caractéristiques identiques. De même, un toit solaire peut être agrandi et complété par un autre toit solaire à tout moment, éventuellement avec des équipements de modèles différents. La compatibilité des onduleurs aux normes sévères du réseau garantit aussi la compatibilité des onduleurs entre eux [10].

I-15-Avantages et inconvénients des systèmes connectés au réseau**A-Avantages**

- n'ont pas besoin de stockage d'énergie et éliminent donc le maillon le plus problématique (et plus cher) d'une installation autonome. C'est en fait le réseau dans son ensemble qui sert de réservoir d'énergie.
- Pas de gaspillage - tout excédent est livré au réseau - particulièrement intéressant pendant les périodes d'absence de son domicile, pendant le week-end, pendant les vacances quand les modules continuent à travailler.

On évite les pertes d'énergie associées au stockage en batterie lorsque la batterie est complètement chargée par exemple.

- On n'est pas obligé de calculer méticuleusement ses besoins en électricité, et de prévoir des niveaux de demande exceptionnellement très élevés, même si très rares.
- On peut commencer petit et agrandir par la suite sans problèmes de dimensionnement compliqués
- .On peut satisfaire à une partie ou à la totalité de ses besoins [10].

B-Inconvénients

C'est vraiment la voie royale qui permettra au photovoltaïque de faire sa percée dans nos vies. Cependant...

- La consommation risque de redevenir relativement "invisible," et on pourrait retomber dans le piège de la consommation irréfléchie.
- Les contraintes électriques imposées par les sociétés d'électricité peuvent être rigoureuses, et les onduleurs synchrones doivent répondre aux exigences techniques des compagnies de production et de transport d'énergie. Par exemple, il faut un mécanisme de coupure automatique du courant au réseau dans l'éventualité d'une panne pour éliminer tout risque à ceux qui font les travaux de réparation [10].

I-16-Description des Centrales PhotovoltaïquesConnectées au Réseau

Les centrales photovoltaïques connectées au réseau électrique constituent l'application de l'énergie solaire photovoltaïque la plus développée ces dix dernières années dans le monde. Avant de décrire et d'étudier des différents composants constituant ce type de centrale, il est important de passer en revue l'expérience des pays ayant intégrés cette technologie tant en matière de recherche que dans l'ensemble urbanistique de leur région [9].

I-17-Centrales photovoltaïques connectées au réseau dans le monde

L'origine des CPCr remonte à la moitié de la décennie soixante-dix aux Etats-Unis avec l'élaboration des recommandations relatives à l'utilisation de l'énergie solaire PV dans des édifices. Le succès initial de ces projets avec le soutien certain des états a donné lieu à une notoriété croissante des CPCr. L'Europe à la fin des années 80 réalise ses premiers CPCr en Allemagne, en Autriche et en Suisse. Caractérisé initialement comme projet de démonstration technologique, la situation a évolué plus rapidement durant la décennie 90 avec l'accroissement du nombre de réalisations et du nombre de pays impliqués. Dans les pays qui se sont dotés de politiques énergétiques claires et de mécanismes d'inter- financement pour favoriser les investissements privés, les grandes multinationales du secteur des services énergétiques telles que Shell et BP-Amoco, ont investi des sommes considérables dans la fabrication de produits solaires dans le cadre de leur stratégie globale de diversification commerciale. Plusieurs pays industrialisés éliminent les barrières commerciales afin de permettre aux consommateurs de se munir de systèmes PV pour diverses raisons environnementales et économiques. Le Japon, les Etats-Unis, l'Allemagne, les Pays-Bas et la Suisse ont lancé des programmes de développement du PV dans le but de se doter d'une infrastructure dans ce secteur et de favoriser l'introduction sur le marché de la construction de produitsPV. En voici les grandes lignes [9].

1-Etats-Unis

C'est le premier pays dans le monde au potentiel PV total installé de 74,8MWc à la fin des années 95. Le programme PV des Etats-Unis vise à mettre au point des techniques PV bon marché et à réduire le coût de production des systèmes. L'objectif est d'amener ce secteur à occuper une place importante dans l'économie, tant comme industrie que comme source d'énergie.

Parmi les grands projets, mentionnons le "Utility PhotoVoltaic Group", le "Photovoltaics for Utility-Scale Applications", les "Building Opportunities in the United States for Photovoltaics" et le "Photovoltaics for Federal Agency Applications". Le 26 juin 1997, le président Clinton a annoncé le " Million Solar Roofs Initiative" c'est- à-dire le million de toits solaires.

L'état du Maryland en participant à ce projet, s'est engagé à allier une aide sous la forme d'achat de réductions d'intérêt sur des produits au système d'achat d'état pour avantager le

client économiquement. L'objectif est d'installer 20200 systèmes solaires sur des résidences pour produire 14,4 MW de puissance PV installée d'ici à 2010 [9].

2- Japon

Il a été un des premiers à développer cette technique de manière volontariste. Second pays au potentiel PV installé de 26 MWc à la fin des années 98; il est aujourd'hui le premier pays investisseur de CPCR. Le programme «70 000 toits solaires » installés pour l'an 2000, initié par l'état japonais en 1994, a rapidement engendré une baisse des coûts des équipements.

Les consommateurs japonais sont séduits. Dans ce contexte, a été réalisé 400MWc pour la fin 2000 et sont prévus 4600MWc pour 2010.

Le Japon s'est fixé un objectif ambitieux, soit porter à 5000 MW la puissance installée des systèmes PV, dans le but de respecter ses engagements de Kyoto qui prévoient que 3,1% de l'offre d'énergie primaire sera assurée par des combustibles sans émission de carbone en 2010 [9].

3- Allemagne

L'Allemagne a été le premier pays en Europe à reconnaître la contribution potentielle des systèmes résidentiels de toits solaires au développement du marché du PV. Elle a fait œuvre de pionnier en matière de systèmes PV de toit reliés au réseau et, de 1990 à 1995, a facilité l'installation de 2056 systèmes de toit totalisant 5,3 MWc. En janvier 1999, le gouvernement a lancé le programme des 100000 installations PV de toit en offrant des incitations importantes et inédites sur les marchés financiers. Le budget accordé au programme est de l'ordre de 0,5 milliards d'Euros. Les aides se font sous la forme de prêts à 0% sur dix ans, sans remboursement les deux premières années.

Récemment, le Parlement allemand a aussi adopté la Loi sur les Energies Renouvelables (LER) qui donne préséance aux énergies renouvelables comme sources d'électricité.

La LER offre des incitations, fondées sur le tarif, pour les systèmes PV de toits reliés au réseau; ces incitations s'appliquent en sus du programme de financement existant. Misant sur une puissance installée de 300 MWc en 2005, l'Allemagne se classe maintenant au deuxième rang des marchés PV, derrière le Japon [9].

4- Suisse

Avec une capacité totale installée de 8,1 MWc à la fin 95, l'administration fédérale Suisse avait pour projet d'atteindre les 50 MWc en 2000. Entre autre il convient de souligner « un

programme de 1000 toits PV » à caractère privé, équivalent à 3MWc installé sur des HLM, ainsi qu'un programme de démonstration de l'installation d'1MWc pour alimenter un centre éducatif, avec différentes mesures de tarification adoptées par les gouvernements régionaux des cantons. Sur les 10 MWc déjà installés dans ce pays en 1997, environ 85% sont raccordés au réseau [9].

5- Hollande

A la fin 96 existait 215 CFCR totalisant 598 kWc. Le gouvernement prétend par « le plan 250 MWc », atteindre cette capacité en 2010. Un programme visant à installer un million de toits PV soit 1800 MWc en 2020 se met en place. Le gouvernement propose des réductions d'impôts, des tarifications vertes et des prêts à taux zéro.

6- Algérie

L'Algérie bénéficie d'une durée d'ensoleillement comprise entre 2800 et 3200 heures par an. L'énergie moyenne annuelle reçue s'élève à 2000 kWh / m². Le gisement solaire est donc très important et le potentiel en énergies renouvelables est considérable mais reste largement sous exploité. Cependant ces dernières années et malgré des difficultés notamment en l'absence de moyens financiers suffisants, les perspectives de développement des énergies renouvelables dans la région semblent prometteuses, eu égard aux multiples possibilités de soutien qui existent en matière de financement qu'en matière de coopération régionale avec les pays méditerranéens en particulier.

A l'heure actuelle, l'Algérie ne dispose d'aucune installation de système PV connecté au réseau. La CPCR dont l'étude est le sujet de ce mémoire va être installée au CDER. Ce projet fait partie d'un contrat de coopération entre l'Agence Internationale de Coopération Espagnole (AECI) et le CDER. Cette centrale sera la première du genre en Algérie [9].

I-18-Description générale des centrales photovoltaïques connectées au réseau

Les centrales photovoltaïques connectées au réseau électrique conventionnel sont généralement installées à proximité du lieu de consommation et intégrée dans l'architecture en plus ou moins grande partie sur l'édifice de consommation. Elles fonctionnent « au fil du jour ». Leur fonctionnement est particulièrement optimisé du fait des exigences imposées par les caractéristiques techniques de la connexion au réseau de distribution électrique [9].

Les caractéristiques du générateur photovoltaïque (PV) sont combinées aux besoins des consommateurs d'énergie avec l'échange d'énergie résultant entre l'édifice et le réseau

électrique conventionnel suivant les quatre cas suivants :

1-L'électricité PV produite est supérieure aux besoins en électricité de

L'habitation :

L'électricité en surplus est ainsi injectée dans le réseau et rachetée par l'entreprise de distribution de l'électricité selon le tarif en vigueur dans le pays. Le propriétaire de la centrale devient alors producteur d'électricité.

Un compteur électromécanique, en tournant à l'envers ou un compteur électronique réversible, comptabilisera la production d'énergie PV [9].

2-L'électricité PV produite est égale aux besoins (cas théorique) :

Les appareils consomment de l'énergie PV strictement, le compteur d'énergie ne tourne pas et la centrale PV est dans une phase d'équilibre.

3-L'électricité PV produite est inférieure aux besoins ou nulle (la nuit) :

La totalité de l'électricité solaire est utilisée par les appareils et un complément est apporté par le réseau. Le compteur tourne, mais moins vite que s'il n'y avait pas de centrale PV. La facture est donc réduite d'autant [9].

4-L'électricité PV est entièrement injectée dans le réseau :

Le producteur consomme l'énergie fournie par le réseau de distribution électrique et utilise le réseau pour stocker toute l'énergie produite par sa centrale PV.

Dans tous les cas, l'électricité produite n'est pas gaspillée : dès que les conditions minimales de luminosité seront atteintes, la centrale PV produira.

L'énergie PV est de plus totalement modulable et peut donc répondre à un large éventail de besoins. La taille des installations peut aussi être augmentée par la suite afin de suivre l'évolution des besoins ou des moyens financiers [9].

I-19-Description générale des différents blocs constituant la Centrale Photovoltaïque Connectée au Réseau

Une Centrale Photovoltaïque Connectée au Réseau (CPCR), schématisée en **figure 1.7**, est constituée de 4 blocs fonctionnels différents :

1-Le générateur : est formé par de modules PV pouvant être connectés en série et/ou en parallèle qui convertissent l'énergie du soleil en électricité continue. Les modules sont montés et fixés sur une structure métallique.

2-Le dispositif de conditionnement de puissance (DCP) : est constitué d'un convertisseur DC/DC ayant pour fonction la poursuite du point de puissance

maximum (MPPT) et d'un onduleur DC/AC qui permet d'adapter les caractéristiques de l'énergie produite par le générateur PV (DC) aux besoins du réseau électrique.

3-Les protections ou les éléments de mesure : adaptés pour garantir la qualité de l'onde sinusoïdale injectée au réseau et d'une manière générale la sécurité de la CPCR et du réseau. Il est utilisé pour ce faire des fusibles, des disjoncteurs différentiels, des disjoncteurs magnétothermiques, des varistances.

4-Le réseau de distribution électrique basse tension : de tension 220V ou 380V alternative et de fréquence 50 Hz [9].

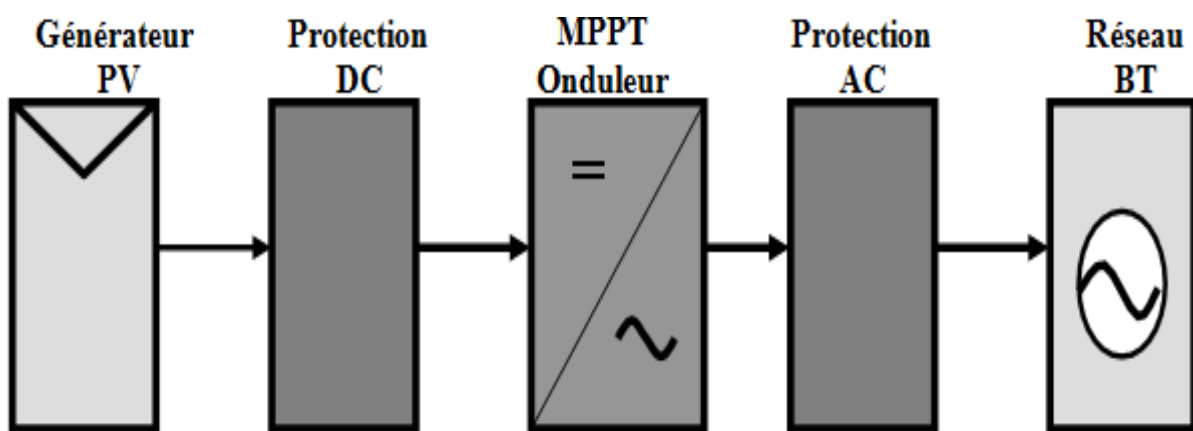


Figure I.7 : Schéma d'une Centrale Photovoltaïque Connectées au Réseau [9].

I-20-Classifications des Centrales Photovoltaïques Connectées au Réseau

Une première classification des CPCR en fonction de leur taille peut être faite de la manière suivante :

1-De petite taille avec des puissances allant de 1 à 10 KWC pour des applications sur les toits de maisons individuelles ou d'institutions publiques telles que les écoles, parkings,... connectée au réseau basse tension.

2-De taille moyenne avec des puissances allant de 10 KWC à quelques centaines de **KWC**. Ce type de système peut se trouver installé et intégré sur un édifice, sur un toit ou une façade. Il peut être connecté à la basse ou à la moyenne tension du réseau de distribution électrique selon sa taille [9].

3-De grande taille avec des puissances allant de 500kWc et plus (en générale 1 MWc en PV). Ce sont des systèmes centralisés et sont propriétés de compagnies d'électricité

I-21-Composants des centrales photovoltaïques connectées au réseau

1-Générateur photovoltaïque

La production d'électricité par conversion de la lumière à l'aide de cellules PV connaît un essor fulgurant à l'aube du 21ème siècle avec un taux de croissance record de plus de 40% depuis 2000. De nouvelles approches technologiques seront toujours nécessaires afin de réaliser des cellules à faible coût et à haut rendement de conversion énergétique afin de permettre au PV d'ici l'an 2010 d'atteindre le seuil de compétitivité des autres sources de production d'électricité.

La réalisation de cellules à base de silicium cristallin reste la filière la plus avancée sur le plan technologique et industriel. En effet, le silicium est l'un des éléments les plus abondants sur terre sous forme de silice, parfaitement stable et non toxique.

La cellule individuelle, unité de base d'un système PV, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module. Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. Le courant de sortie, et donc la puissance, seront proportionnels à la surface du module.

L'interconnexion de modules entre eux - en série ou en parallèle - pour obtenir une puissance encore plus grande, définit la notion de champ PV.

Le générateur PV se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adapte l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs.

Le module est un assemblage de cellule élémentaire connectée les unes aux autres pour former des chaînes.

Le nombre de cellules connectées en parallèle et en série définissant les caractéristiques du module PV [9].

2-La poursuite du point de puissance maximale

Le générateur PV transforme directement l'énergie solaire en énergie électrique. Cette énergie varie en fonction de l'éclairement et de la température.

La fonction caractéristique du courant fournie par le générateur en fonction de sa tension autrement dit la caractéristique I-V du générateur passe par un point appelée Point de Puissance Maximale ou MPP (Maximum Power Point) qui est le point optimum où la puissance du générateur est maximum (I_m et V_m).

La caractéristique courant-tension (I-V) du générateur PV étant non linéaire et variant avec

l'éclairement solaire et la température de fonctionnement des modules PV, pour que la puissance fournie par le générateur à la charge soit maximale, il faut que l'impédance interne du générateur soit bien adaptée à l'impédance de la charge. Il est donc nécessaire de placer entre le générateur PV et la charge, un convertisseur continu– continu [9].

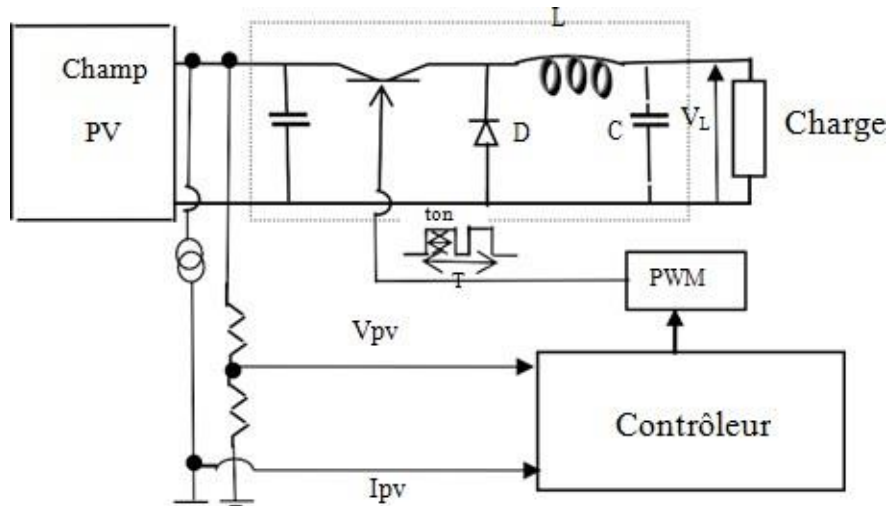
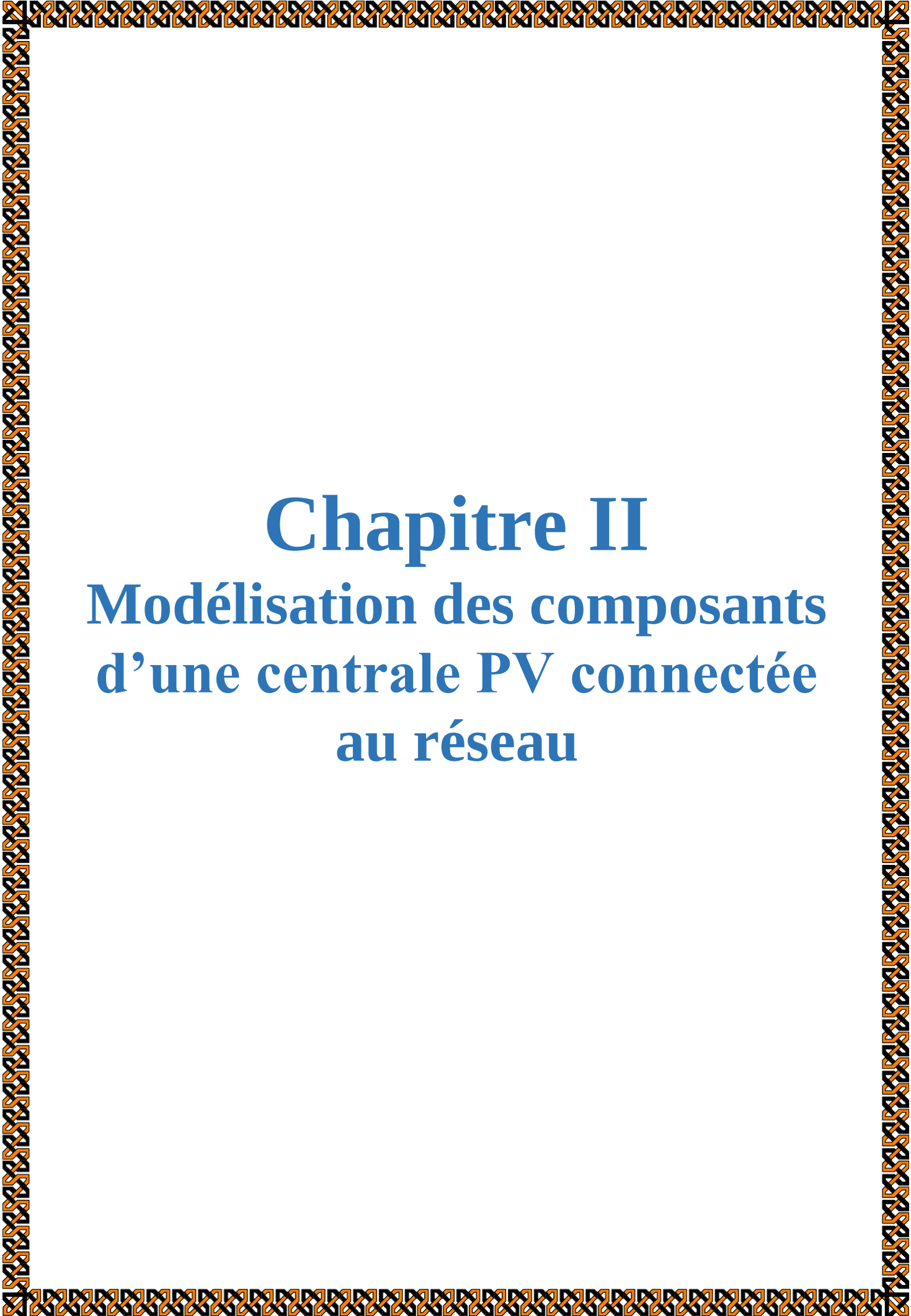


Figure I.8 : Schéma bloc d'un convertisseur MPPT [9].

I-22-Conclusion

Dans ce chapitre nous avons permis de donner un aperçu général sur les systèmes photovoltaïques et les différents types d'énergie renouvelable.

Dans la première partie on a donné une classification des systèmes solaires photovoltaïques avec les types des installations photovoltaïques connectées aux réseaux, et la deuxième partie sur les centrales photovoltaïques (description).



Chapitre II

Modélisation des composants d'une centrale PV connectée au réseau

II-1- introduction

L'effet photovoltaïque c'est un phénomène physique qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et de vieillissement de la cellule [11].

II-2 La cellule photovoltaïque

II-2-1-Définition d'une cellule solaire

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériau semi-conducteur et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Les cellules photovoltaïques sont constituées :

- D'une fine couche semi-conductrice (matériau possède une bande interdite, qui joue le rôle de la barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne.
- D'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.
- D'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode.
- Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement [11].

II-2-2- Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif ;
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création des paires électron/trou dans le matériau semi-conducteur ;
- Collecte des particules générées dans le dispositif [11] ;

II-3-La cellule PV

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique [12].

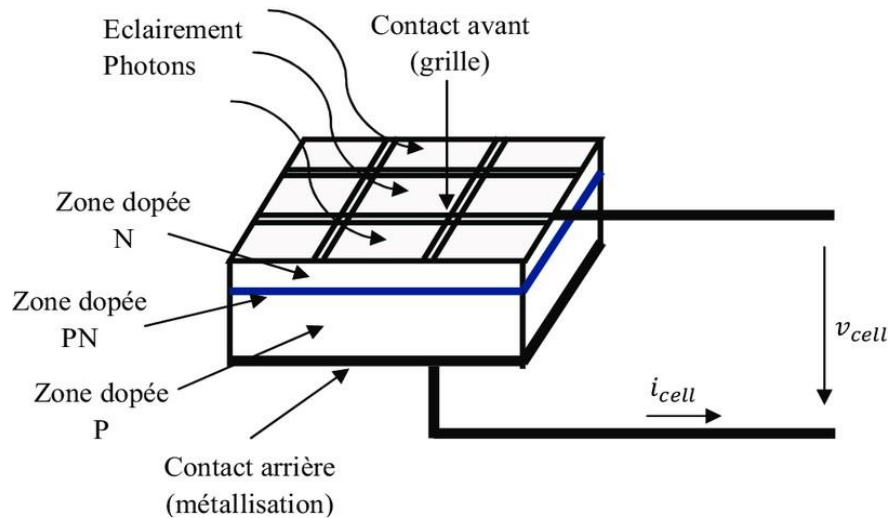


Figure II-1 Schéma d'une cellule photovoltaïque [12].

II-4-Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Le principe de fonctionnement de cette cellule repose sur l'effet photovoltaïque, en effet une cellule est constituée de deux couches minces d'un semi-conducteur, ces deux couches sont dopées différemment :

- pour la couche N, apport d'électrons périphériques
- pour la couche P, déficit d'électrons

Ces deux couches présentent ainsi une différence de potentiel. L'énergie des photons lumineux captés par les électrons périphériques (couche N) leur permet de franchir la barrière de potentiel et d'engendrer un courant électrique continu. Pour effectuer la collecte de ce courant, des électrodes sont déposées par sérigraphie sur les deux couches de semi-conducteur [12].

II-4-1-Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque

Le schéma du circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque qui est largement utilisé dans la littérature est représenté sur la figure I.4

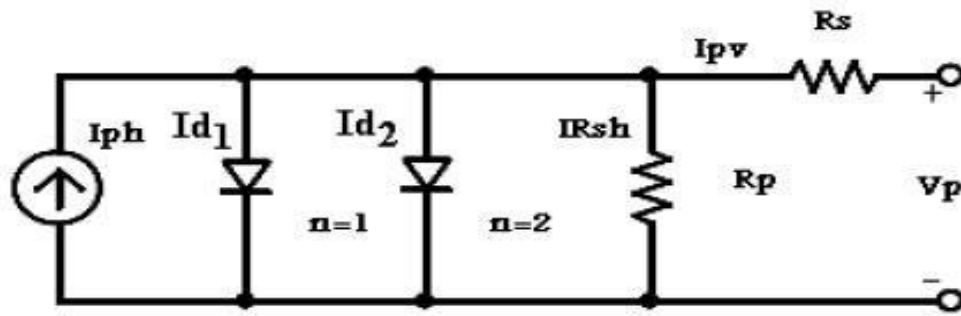


Figure II-2 Schéma électrique du modèle équivalent à deux diodes d'une cellule photovoltaïque [12].

Comme le montre le schéma de la figure une photopile comporte en réalité une résistance série (R_s) et une résistance de dérivation ou shunt (R_p). Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique ($I_{pv} - V_p$) de la photopile [12].

1. La résistance série

En pratique, la cellule PV, contient des résistances dans le matériel qui constitue des semi-conducteurs, et contacts, et autobus courant de rassemblement. L'ensemble des pertes dépend, de la résistance série (R_s). Son effet devient très remarquable en module composé de plusieurs cellules connectées en série, la valeur de cette résistance est multipliée par le nombre de cellules [12].

2. Résistance parallèle

Également, la résistance shunt, représente une partie des pertes liées à une petite fuite de courant par un chemin résistif parallèlement au dispositif intrinsèque. Ceci peut être représenté par une résistance parallèle (R_p). Son effet est beaucoup moins remarquable dans un module photovoltaïque comparé à la résistance série. Qui devient seulement apparent quand un certain nombre de cellules sont reliées en parallèle pour créer un générateur photovoltaïque [12].

D'après la figure II.4: l'équation mathématique (courant-tension) du circuit électrique équivalent de la cellule photovoltaïque est écrite comme suit.

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat1} \cdot \exp \frac{qV_p + R_s \cdot I_{pv}}{n_1 k \cdot T} - 1 - I_{sat2} \cdot \exp \frac{qV_p + R_s \cdot I_{pv}}{n_2 k \cdot T} - \frac{V_p + R_s \cdot I_{pv}}{R_p} \dots\dots\dots (II.1)$$

Il est possible de combiner entre les deux diodes (n_1, n_2), et la réécriture de l'équation précédente sous la forme suivante :

$$I_{PV} = I_{PH} - I_d - I_{sh} \dots \dots \dots (II.2)$$

$I_{ph} = I_{cc}(\frac{G}{1000})$: Photo-courant de cellule, proportionnel à l'éclairement (G). Ce courant

correspond également au courant de court-circuit.

$$I_d = I_{sat} \cdot \exp\left(\frac{V_p R_s I_{PV}}{n \cdot V_t}\right) - 1 \dots \dots \dots (II.3)$$

$$I_{Rsh} = \frac{V_p R_s I_{PV}}{R_p} \dots \dots \dots (II.4)$$

$$I_{PV} = I_{PH} - I_{sat} \cdot \exp\left(\frac{V_p + R_s \cdot I_{PV}}{V_t}\right) - 1 - \frac{V_p + R_s \cdot I_{PV}}{R_p} \dots \dots \dots (II.5)$$

$V_t = n \cdot K \cdot T / q$: représente la potentielle thermodynamique

I_d : Courant direct de la diode.

I_{sat} : Le courant de saturation de la jonction.

K : La constante de Boltzmann ($1,381 \cdot 10^{-23}$ Joules/Kelvin).

T : La température de la cellule en kelvin.

q : La charge d'un électron.

I_{pv} : Le courant fourni par la cellule.

V_p : La tension aux bornes de la cellule.

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

V_{co} : La tension du circuit-ouvert.

R_p : La résistance modélisant les courants de fuites de la jonction.

R_s : La résistance série caractérisant les diverses résistances de contacts et de connexions.

n : "Facteur d'idéalité" ; prend une valeur entre (1 et 2) [12].

II-5-Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

Il existe de nombreux paramètres qui permettent de caractériser une cellule solaire. Ces paramètres sont appelés paramètres photovoltaïques et sont déduits de la caractéristique $I(V)$. La figure II.3 représente une caractéristique courant-tension $I(V)$ dans le noir et sous illumination typique d'une cellule photovoltaïque à jonction PN. Le tracé de cette courbe

permet d'accéder à bon nombre de paramètres physiques caractéristiques du composant. Les premiers paramètres qui apparaissent sur la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque sont le courant de court-circuit I_{cc} (I_{cc}), la tension à circuit ouvert (V_{co}) et le facteur de forme FF du composant [13].

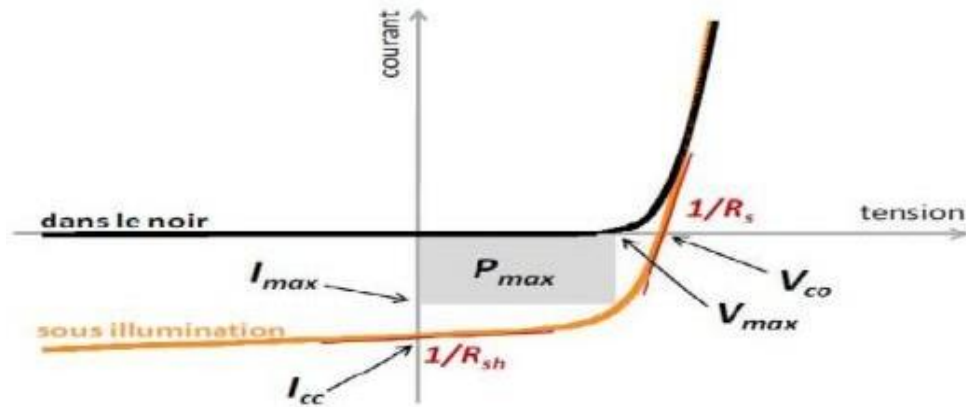


Figure II-3 Caractéristique courant-tension et paramètres physiques d'une cellule photovoltaïque [13].

- A. Le courant de court-circuit (I_{cc}) :** Il s'agit du courant lorsque le potentiel appliqué à la cellule est nul.
- B. Tension du circuit-ouvert (V_{co}) :** Comme son nom indique, c'est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge ou lorsqu'elle est connectée à une charge de résistance infinie [13].

II-6- Les filières technologiques d'une cellule photovoltaïque

- Le silicium
- Silicium monocristallin
- Le silicium multicristallin
- Le silicium amorphe
- Les couches minces
- Les cellules au Tellure de Cadmium ($CdTe$)

II-7-composant d'un système photovoltaïque

II-7-1-Modules

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

La fragilité des cellules au bris et à la corrosion exige une protection envers leur environnement. Généralement, elles sont encapsulées sous verre ou sous composé plastique (résine) pour former le module photovoltaïque.

La durée de vie d'un module PV est autour de 20 ans, est normalement indiquée par le fabricant. L'encapsulation est l'un des facteurs influant l'espérance de vie d'un module PV.

Les modules mono et multi-cristallins les plus courants sont composés de 36 cellules disposées en 4 x 9 et depuis quelques années avec l'augmentation de la dimension des centrales photovoltaïques, les constructeurs proposent maintenant des modules composés de plus de cellules, souvent 72 cellules, soit l'équivalent d'un module double. Les dimensions des modules dépendent de celles des cellules ; actuellement de 125 x 125 mm, avec une tendance vers des cellules plus grandes 156 x 156 mm pour les multi-cristallines [11].

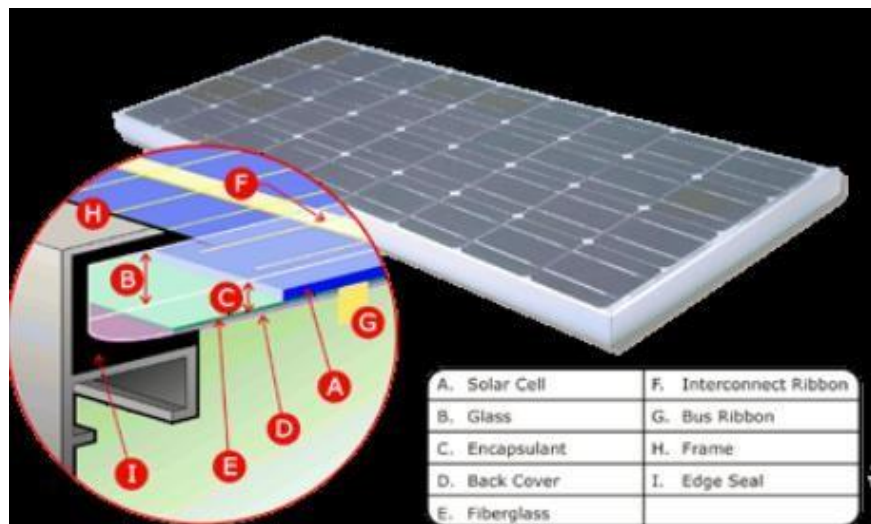


Figure II-4 module Photovoltaïques [11].

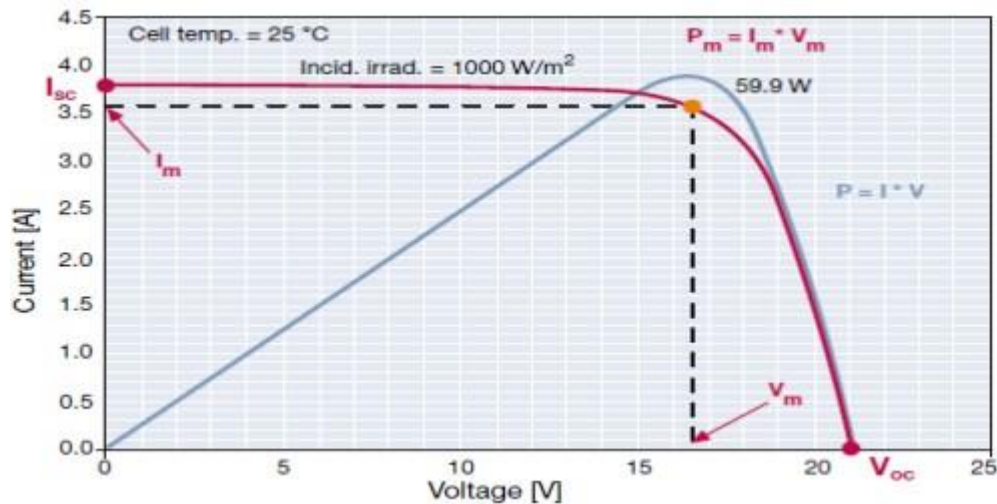


Figure II-5 Caractéristique courant tension d'un module PV [11].

II-7-2-Association d'un générateur photovoltaïque

Dans des conditions d'ensoleillement standard (1000 W/m^2 ; 25°C ; AM1.5), la puissance maximale délivrée par une cellule silicium de 150 cm^2 est d'environ 2.3 Wc sous une tension de 0.5 V . Une cellule photovoltaïque élémentaire constitue donc un générateur électrique de faible puissance insuffisante en tant que telle pour la plupart des applications domestiques ou industrielles. Les générateurs photovoltaïques sont, de ce fait réalisés par association, en série et/ou en parallèle, d'un grand nombre de cellules élémentaires [14].

1. Une association de n_s cellules en série permet : d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, Figure. L'équation (II -6) résume les caractéristiques électriques d'une association série de n_s cellules [14].

$$V_{CO_{NS}} = N_s * V_{CO}; I_{CC} = I_{CC_{NS}} \dots \dots \dots \text{(II -6)}$$

$V_{CO_{NS}}$: La somme des tensions en circuit ouvert de N_s cellules en série.

$I_{CC_{NS}}$: Courant de court-circuit de N_s cellules en série.

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

technologique alors que sa tension reste toujours très faible. L'association série permet ainsi d'augmenter la tension de l'ensemble et donc d'accroître la puissance de l'ensemble.

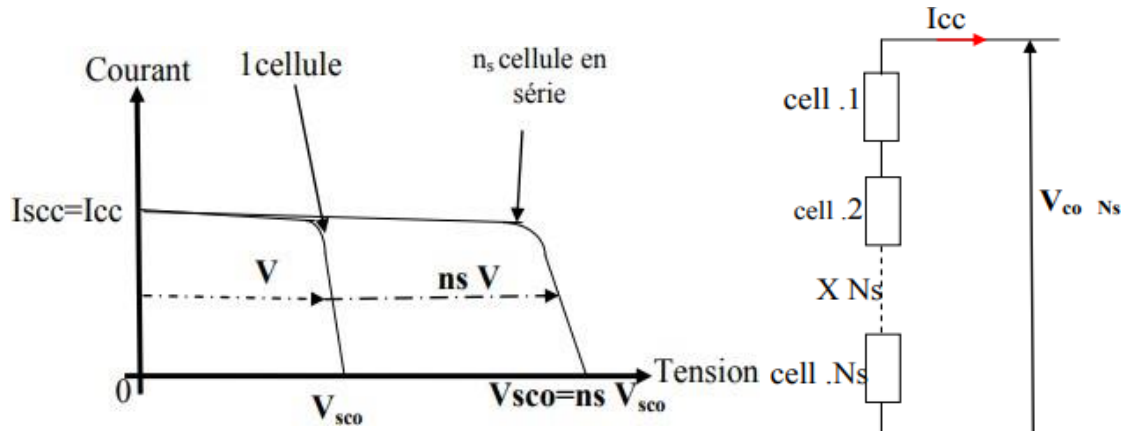


Figure II-6 Caractéristiques résultantes d'un groupement de n_s cellules en série [14].

2. Association parallèle

De N_p cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants, Figure L'équation (II -7) résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de N_p cellules [14].

$$I_{CC_{NP}} = N_p * I_c; V_{CO} = V_{CO_{NP}} \dots \dots \dots (II -7)$$

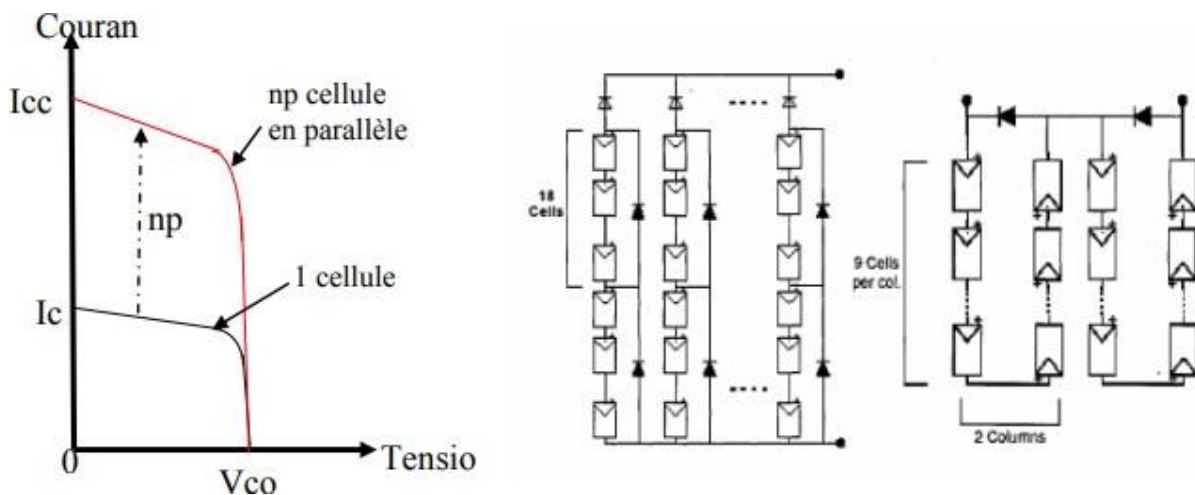


Figure II-7 Caractéristiques résultant d'un groupement de N_p cellules en parallèle (II -7) [14].

Afin d'évaluer l'influence de la température, l'irradiation et la résistance série sur les caractéristique du module photovoltaïque, des essais ont été mènes sur le module **BP SX 150s**. La fiche technique de ce module indique les informations résumées dans le Tableau II.1.

Tableau II.1. Caractéristiques physiques et électriques du module photovoltaïque BP SX 150s [15].

Caractéristiques électrique	Bps x 150s
Puissance maximale	150w
Tension a la puissance maximale (vmpp)	34.5v
Courante a la puissance maximale (impp)	4.35A
Tension de circuit ouvert (vco)	43.5v
Courante de court-circuit	4.75A

II-8- Caractéristiques d'un module

Voici la description des paramètres d'un module :

La puissance crête PC : puissance électrique maximum que peut fournir le module dans la condition standard (25°C et un éclairement de 1000W/m²).

La caractéristique I (V) : courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui –ci.

Tension à vide V_{co} : tension aux bornes du module en absence de tout courant, pour un éclairement « plein soleil ».

Courant de court-circuit I_{cc} : courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement « plein soleil ».

Point de fonctionnement optimum (U_m, I_m) : lorsque la puissance de crête est maximum en « plein soleil », $P_m = U_m \cdot I_m$.

Rendement maximal : rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.

Facteur de forme : rapport entre la puissance optimale P_m et la puissance de radiation incidente [11].

II-8-1- Effet de l'éclairement

Le courant I_{cc} varie directement avec le rayonnement lumineux (la relation est Proportionnelle), la tension restant relativement constante. On remarque dans la figure (II.8) que le courant optimal est très sensible à l'éclairement. Par contre la tension optimale varie très peu avec l'éclairement.

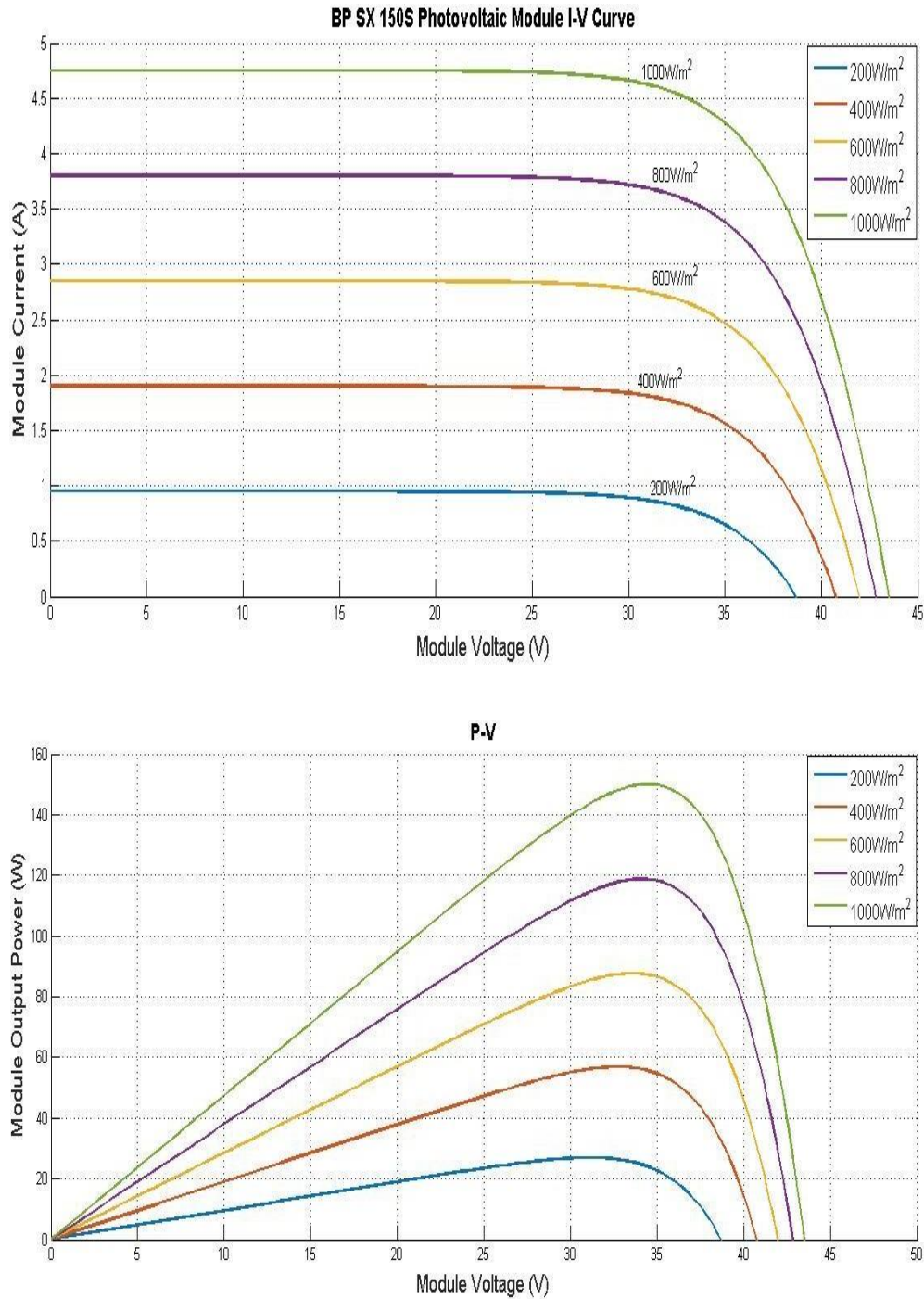
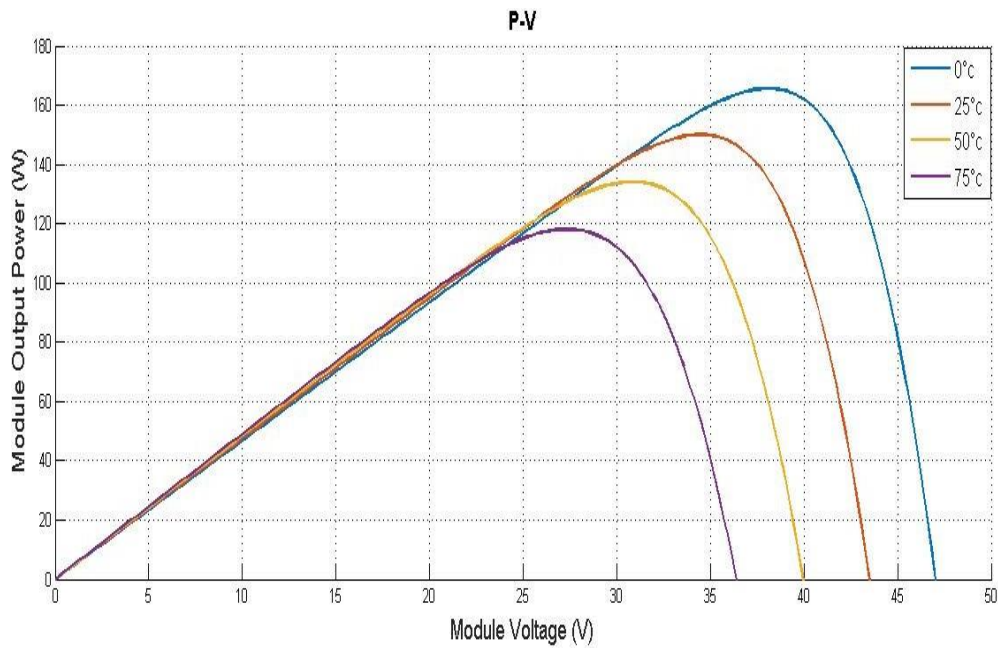


Figure II.8 : Influence de l'éclairement sur les caractéristiques électriques P-V et I-V

II-8-2- Influence de la température

Quand la température diminue, la tension à vide augmente, mais le courant de court-circuit diminue dans des proportions moindres (Figure II.9). La diminution du courant de saturation est la principale cause de la chute de courant à basse température. Aussi, on considère en première approximation que le fonctionnement optimal du générateur PV correspond sensiblement à un fonctionnement à tension optimale constante.



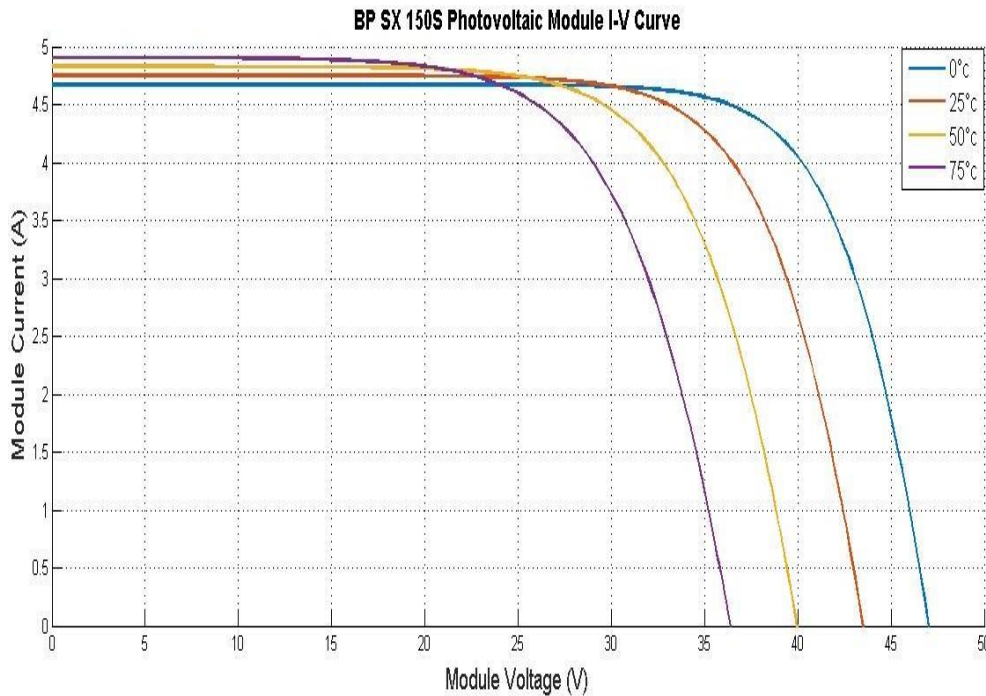


Figure II-9: Influence de la température sur les caractéristiques électriques P-V et I-V

II-8-3- Interprétations des Résultats

La figure (II.8) montre l'influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V). A une Température constante, on constate que le courant subit une variation importante, mais par contre La tension varie légèrement. Car le courant de court-circuit est une fonction linéaire de L'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique. La figure (II.9) montre l'influence de la température sur la caractéristique I(V). Il est essentiel de comprendre l'effet de changement de la température d'une cellule solaire sur la caractéristique P(V). Le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Par conséquent la puissance maximale du générateur subit une diminution.

II-9- le panneau photovoltaïque

Afin d'obtenir des puissances de quelques KW à quelques MW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en série (augmenté la tension) et en parallèle (augmenté le courant) pour former un panneau (ou champ PV) [16].

La quantité d'électricité dans l'ensemble des composants du panneau PV dépend :

- Des besoins en électricité
- De la taille du panneau

- De l'ensoleillement du lieu d'utilisateur
- De la saison d'utilisateur

-Simulation de composant :

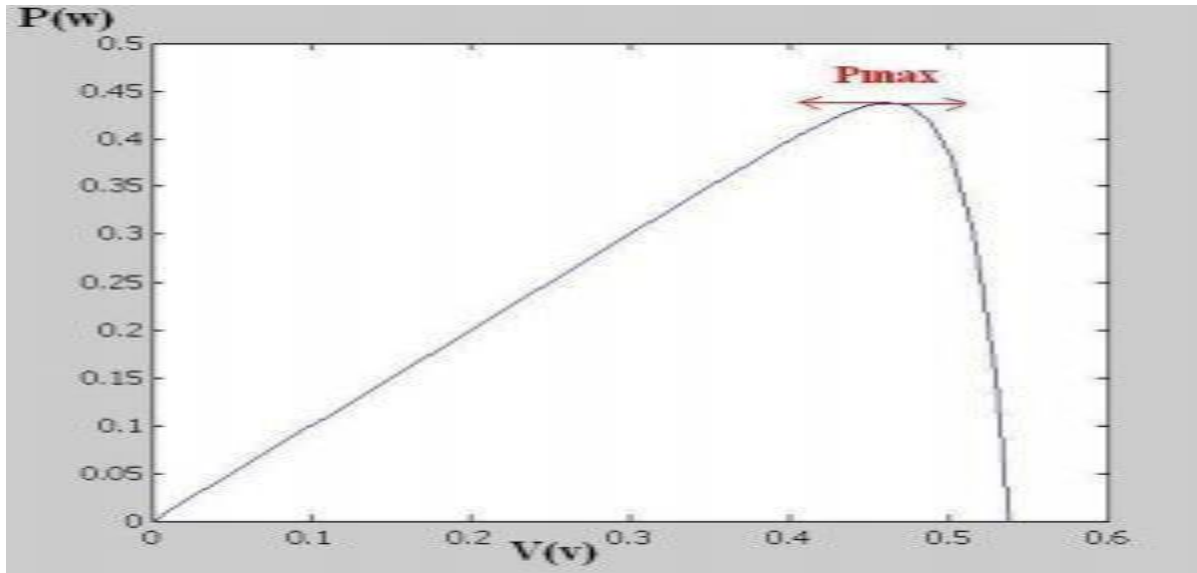


Figure II-10 Caractéristique $P=f(V)$ de la Cellule.

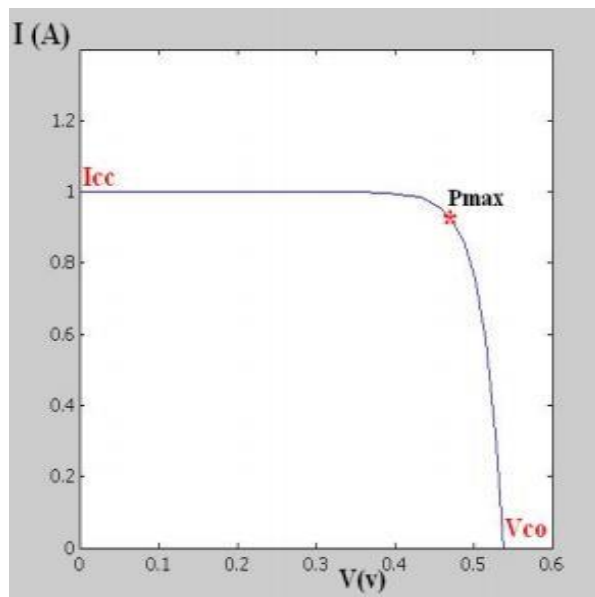


Figure II-11 Caractéristique $I=f(V)$ de la cellule.

D'après ces résultats de simulation, on peut constater que cette cellule à :

- Courant de court-circuit $I_{cc} = 1$ A.
- Tension de circuit ouvert $V_{co} = 0.54$ v.
- Puissance maximale $P_m = 0.44$ w.

II-10-Convertisseurs DC/DC

Un convertisseur de tension continue DC/DC est un module (ou mini module) générant une tension de sortie régulée, isolée de la tension d'entrée. Cette conversion d'énergie s'effectue grâce à un "découpage" haute fréquence caractérisée par un rendement élevé jusqu'à 94% [17].



Figure II-12 Convertisseur continu-continu [17].

Dans la littérature il y a plusieurs types des convertisseurs DC/DC, le choix de l'un par rapport à l'autre dépend de l'application. Par la suite, nous verrons quelques types qui seront utilisés dans ce travail.

II-10-1-Convertisseur abaisseur "Buck"

Hacheur abaisseur, hacheur dévolteur, hacheur série, hacheur de type BUCK, Buck chopper.

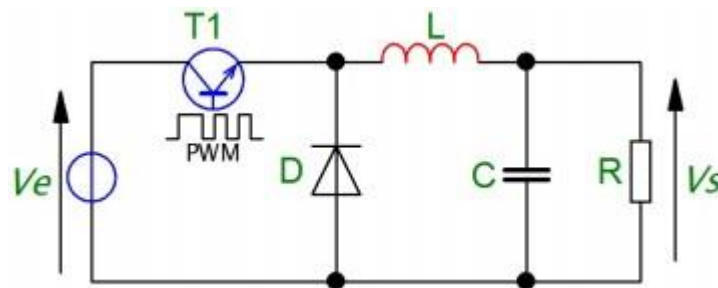


Figure II-13 Convertisseur Buck [17].

Le hacheur série est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant. L'interrupteur T1 peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage). L'interrupteur T1 est fermé pendant la fraction aT de la période de découpage T . La source d'entrée fournit l'énergie à la charge R au travers de l'inductance L . Lors du blocage du transistor, la diode D assure la continuité du courant dans l'inductance. L'énergie emmagasinée dans cette inductance est alors déchargée

dans le condensateur et la résistance de charge. La valeur moyenne de la tension aux bornes de l'inductance est nulle. La tension de sortie est donnée par la relation [17]. suivante :

$$V_s = (u_s) = (u - u_L) = (u) = \alpha V_e \dots\dots\dots (\text{II -8})$$

Par définition, $0 < \alpha < 1$, ce qui induit que le montage est abaisseur de tension (dévolteur).

II-10-2-Convertisseur élévateur "BOOST"

Hacheur élévateur, hacheur survolteur, hacheur parallèle, hacheur de type BOOST, BOOST chopper

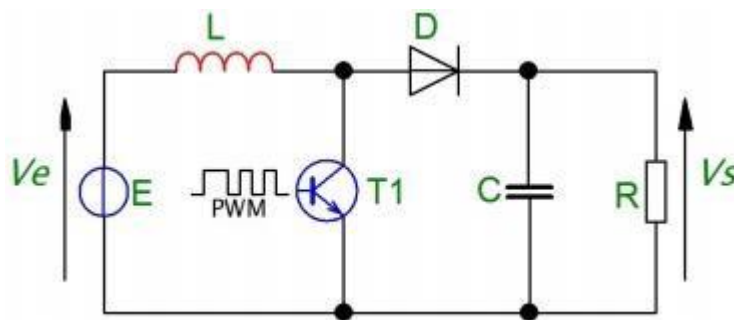


Figure II-14 Formes d'ondes du hacheur de type BOOST [17].

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur T1 peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage). L'interrupteur T1 est fermé pendant la fraction αT de la période de découpage T. La source d'entrée fournit l'énergie à la charge R au travers de l'inductance L. Lors du blocage du transistor, la diode D assure la continuité du courant dans l'inductance. [17]. L'énergie emmagasinée dans cette inductance est alors déchargée dans le condensateur et la résistance de charge. En régime permanent, la valeur moyenne de la tension aux bornes de l'inductance est nulle, ce qui impose la relation suivante :

$$V_e = (u_e) = (V_t) = (1 - \alpha) V_s \dots\dots\dots (\text{II -9})$$

Soit,

$$V_s = \frac{V_e}{1 - \alpha} \dots\dots\dots (\text{II -10})$$

Par définition, $0 < \alpha < 1$, ce qui induit que le montage est élévateur de tension (survolteur).

II-10-3- Convertisseur BUCK -BOOST

Il s'appelle aussi (hacheur survolteur-dévolteur ou bien hacheur à accumulation inductive)

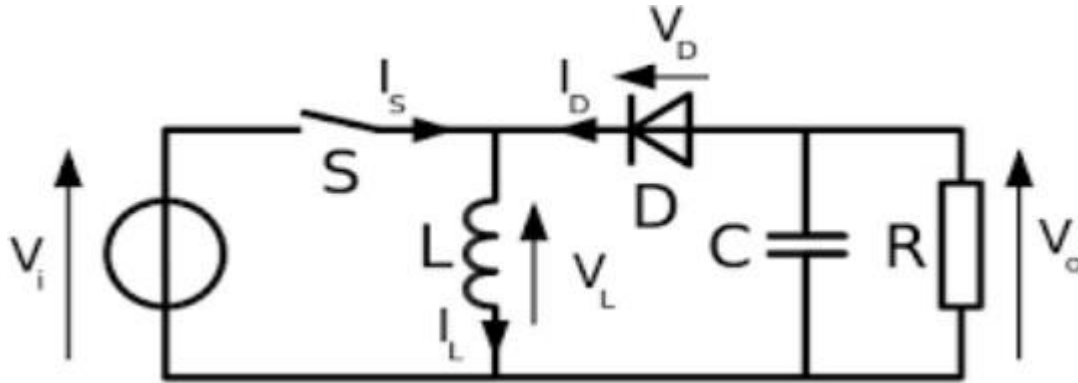


Figure II-15 Schéma théorique d'un convertisseur buck-boost [17].

Un convertisseur Buck-Boost est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible ou plus grande valeur mais de polarité inverse [17].

II-11-Commande MPPT

La commande MPPT, est une commande essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque. Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique D en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le panneau PV. Pour cette raison, on va présenter et étudier par la suite les algorithmes de commande les plus populaires [18].

II-11-1-Principe De La Commande MPPT

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un GPV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quel que soit les conditions météorologiques (température et irradiation), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (VPPM et IPPM). La chaîne de conversion photovoltaïque sera optimisée à travers un convertisseur statique (CS) commandé par une MPPT. Il peut être représenté par le schéma de la Figure II-16 [18].

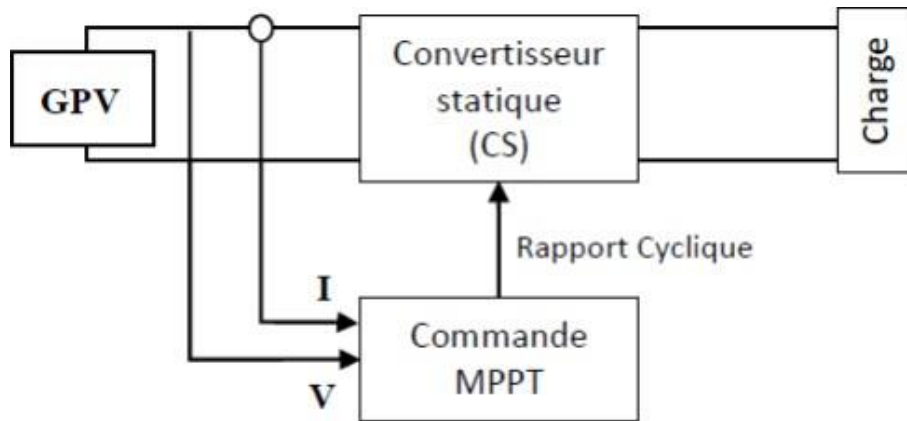


Figure II-16 Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge [18].

La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique (CS), à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de puissance que le GPV peut fournir. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du CS en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (I et V et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le MPPT [18].

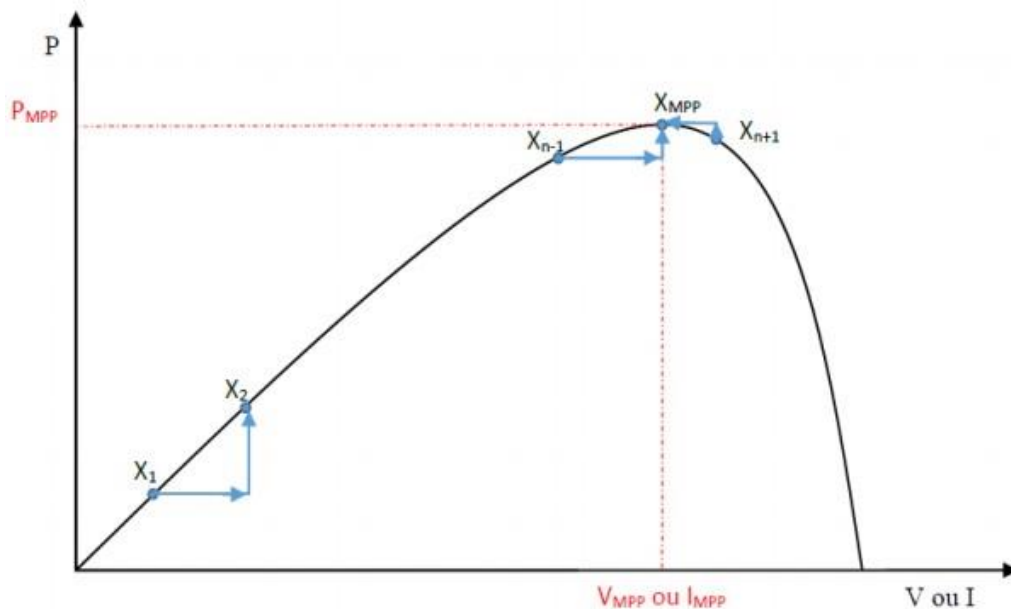


Figure II-17 Principe de la commande MPPT [18].

II-11-2- Classification Des Commandes MPPT

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 [19].

II-11-2-1-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.
- 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.

II-11-2-2-Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche

- A. 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,
- B. 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 [19].

II-11-3-Techniques de commande MPPT

L'algorithme mis en œuvre dans les premières commandes MPPT était relativement simple. En effet, les capacités des calculateurs disponibles à l'époque étaient faibles et les applications, surtout destinées au spatial avaient beaucoup moins de contraintes en variation de température et d'éclairement que les applications terrestres appliquées initialement. Au photovoltaïque, son principe a d'abord été décrit par A.F. Bohringer. Cette commande est basée sur un algorithme de contrôle adaptatif, permettant de maintenir le système à son point de puissance maximum (PPM), ce dernier est décrit en (figure II-18) [19].

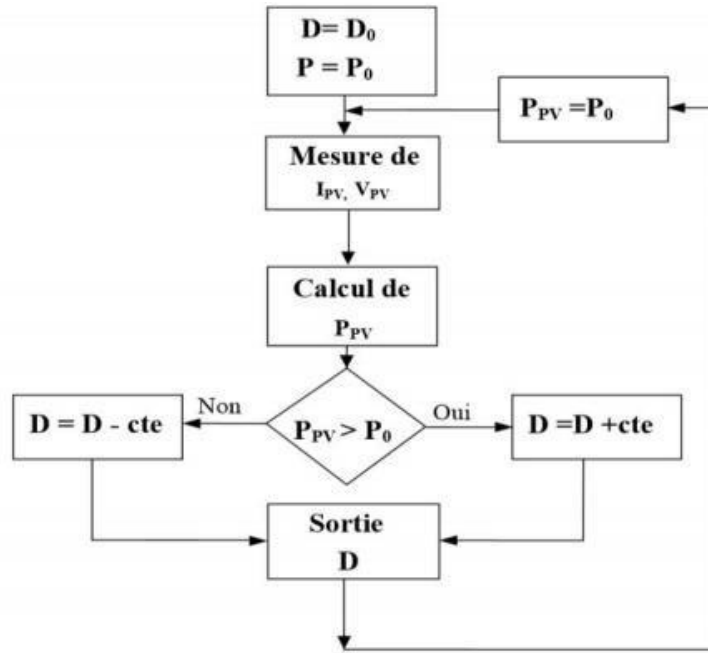


Figure II-18 Principe de la première technique MPPT numérique [20].

Étant donné le grand nombre de publications dans ce domaine, nous avons fait une présentation de deux différentes MPPT existantes.

1- Principe de la commande “Perturbe and Observa” (P&O)

Le principe des commandes MPPT de type **P&O** consiste à perturber la tension V_{PV} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{PV} qui en résulte. Ainsi, 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 [20].

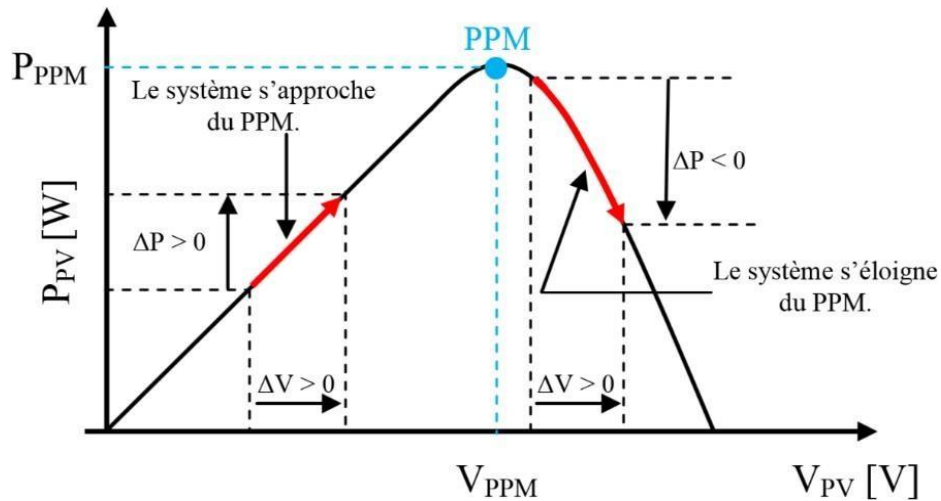


Figure II-19 Recherche du PPM par la méthode (P&O) [20].

2- Principe des commandes “Hill CLIMBING”

La technique de contrôle nommée Hill CLIMBING consiste à faire « monter » le point de fonctionnement le long de la caractéristique du générateur présentant un maximum. Pour cela, deux pentes sont possibles. La recherche s'arrête théoriquement quand le point de puissance maximal est atteint. Cette méthode est basée sur la caractéristique de la puissance en fonction du rapport cyclique $P(D)$. Mathématiquement, le PPM est atteint lorsque $\frac{dP_{PV}}{dD} = 0$ comme le montre la figure II-19 [20].

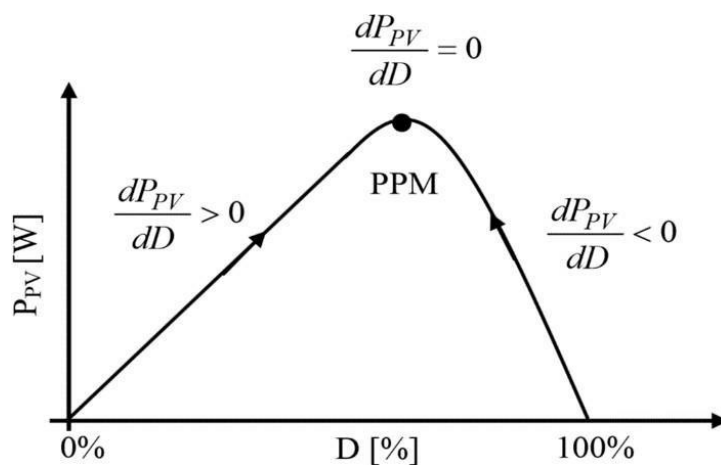


Figure II-20 Relation entre PPV et le rapport cyclique D du convertisseur statique [20].

II-12-Convertisseurs DC/AC

L'onduleur est un convertisseur statique DC/AC de haute performance il convertit la tension continue, en tension alternative contrôlée de façon très précise. La source de tension continue soit un aérogénérateur ou des panneaux solaires.

La commande de l'onduleur est basée sur la prédiction de la tension de sortie d'un pas en avant que nous appellerons « Dead beat control » par cette commande, la tension de sortie de l'onduleur est forcée de suivre une référence sinusoïdale échantillonnée pour la production à la sortie du filtre une onde proche d'une sinusoïde avec un taux de distorsion harmonique très réduit [21].

Tableau (II.2) : Les principales caractéristiques électriques de l'onduleur [15].

Tension minimale DC d'entrée	125 V
Tension maximale DC d'entrée (V MAX)	450 V
Puissance nominale AC de sortie	2500 W
Puissance maximale AC de sortie	2700 W
Tension nominale de sortie	220/230
Vac Fréquence	50 Hz
Distorsion harmonique	< 5% (THD)
Cos (φ)	0.8 – 1

II-12-1 Principe de fonctionnement d'un onduleur

Un onduleur est un dispositif électronique assurant la conversion statique d'une tension/courant continu en tension /courant alternatif. Il est dit autonome s'il assure de lui-même sa fréquence et sa forme d'onde .Deux types d'onduleurs sont donc utilisés pour assurer une telle conversion [21].

- Onduleur Monophasé.
- Onduleur Triphasé.

II-12-2- Les types des onduleurs

On va présenter les deux types d'onduleur et on va voir leur schéma électrique

II-12-2-1- Onduleur Monophasé

Ce type d'onduleur délivrant en sa sortie une tension alternative monophasée, est généralement destinée aux alimentations de secours. Deux classes d'onduleurs monophasés sont à distinguer, suivant leur topologie [21].

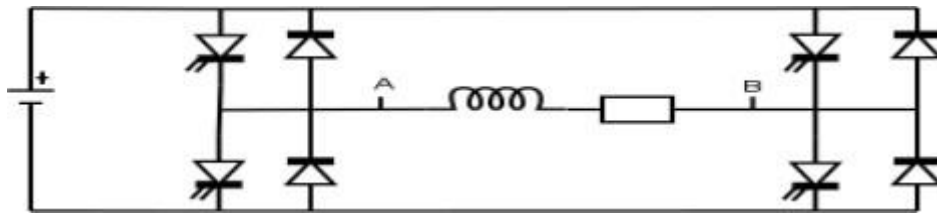


Figure II-21 schéma d'un onduleur monophasé [21].

II-12-2-2- Onduleur triphasé

Ce type d'onduleur est généralement recommandé pour des applications de grande puissance. La structure de tel convertisseur se fait par l'association, en parallèle, de trois onduleurs monophasés en demi pont (ou en pont) donnant trois tensions de sortie déphasées de 120° degrés, l'une par rapport à l'autre [21].

II-12-2-3-L'onduleur central

La topologie la plus ancienne et la plus classique est composée d'un seul onduleur réalisant l'interface entre le réseau et le champ photovoltaïque, où des chaînes de modules (ou "string") sont connectées en parallèle (cf. Figure 22). Ce montage est généralement utilisé pour des installations de grandes puissances (20-400 kW [PRO]) dans lesquelles des protections anti-retour de courant sont implantées par rangée [21].

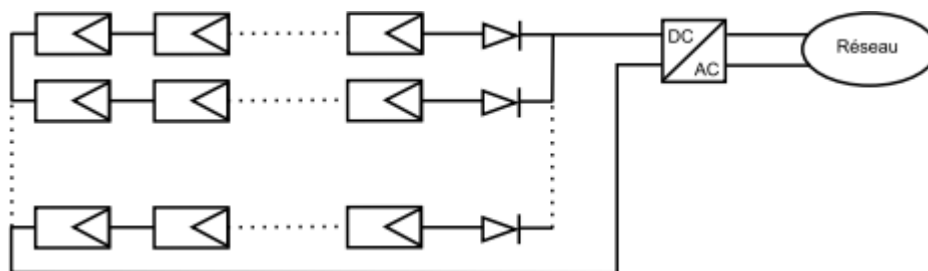


Figure II-22 La topologie « Onduleur Central » [21].

L'avantage de la topologie « onduleur central » est sa simplicité de mise en œuvre : un seul onduleur connecté au champ photovoltaïque est nécessaire. De plus, l'onduleur central demande un faible coût d'investissement tout en permettant une maintenance simple. La simplicité du montage permet également un meilleur rendement de la conversion de la tension. En effet, la mise en série de plusieurs modules permet d'obtenir un rapport de transformation faible, ce qui augmente le rendement du convertisseur.

Par contre, ce montage présente plusieurs défauts [BAC06] :

- pertes de conversion solaire (un seul MPPT pour un ensemble de modules)
- pertes et risques électriques dans le câblage DC - aucune évolutivité
- aucune continuité de service en cas de panne de l'onduleur

Malgré les nombreux défauts de cette configuration, cette solution reste très employée dans les centrales PV au sol de forte puissance [21].

II-13-Commande de l'onduleur photovoltaïque connecté au réseau

Le système de production d'énergie est connecté au réseau via un onduleur et un filtre. Le rôle d'onduleur est de maintenir la tension du bus continu constante quel que soit l'amplitude et le sens de la puissance, en générant le courant du condensateur nécessaire notamment dans la phase de démarrage par le contrôle des courants transités par le réseau via le filtre.

L'objectif de la commande est de générer les ordres d'ouverture et de fermeture des interrupteurs de sorte que la tension créée par l'onduleur soit la plus proche de la tension de référence [22].

Pour obtenir une forme d'onde image de la référence on doit faire face au choix de la commande rapprochée :

II-13-1-Commande par hystérésis

Le principe de contrôle des courants par hystérésis consiste à maintenir chacun des courants générés dans une bande enveloppant les courants de référence. Chaque violation de cette bande donne un ordre de commutation [22]. En pratique, c'est la technique schématisée sur la Figure II.23 que l'on utilise. La différence entre le courant de référence et celui mesuré est appliquée à l'entrée d'un comparateur à hystérésis dont la sortie fournit directement l'ordre de commande des interrupteurs du bras correspondant de l'onduleur :

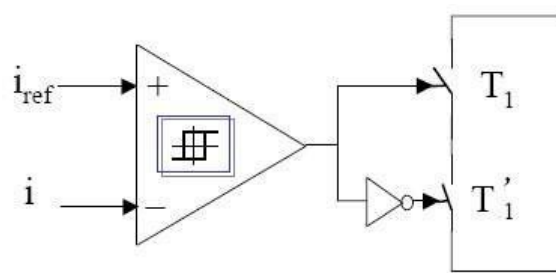


Figure II-23 Contrôle de courant par hystérésis [22].

II-13-2-La commande vectorielle

La modulation de largeur d'impulsion vectorielle utilise un algorithme numérique afin d'obtenir une séquence de commande des interrupteurs de l'onduleur permettant de générer un vecteur tension de sortie qui s'approche le mieux possible du vecteur tension de référence [22].

II-13-3-Commande par MLI

La méthode basée sur la MLI met en œuvre d'abord un régulateur qui, à partir de l'écart entre le courant et sa référence, détermine la tension de référence de l'onduleur (modulatrice). Cette dernière est ensuite comparée avec un signal en dent de scie à fréquence élevée (porteuse) [22].

La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs. Le schéma de principe de cette méthode est donné sur la Figure II.24 :

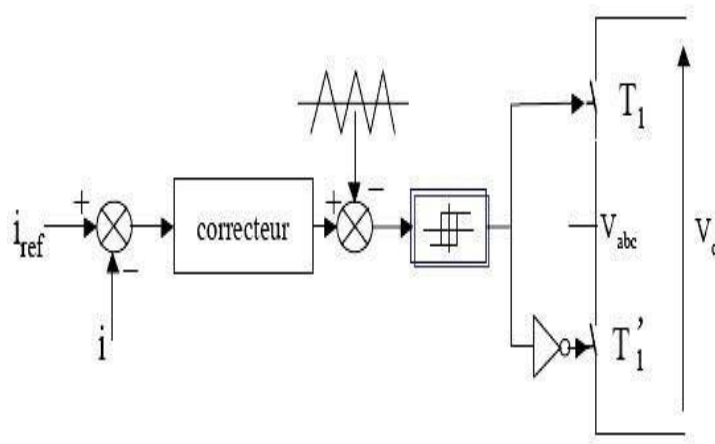


Figure II-24 Contrôle de courant par MLI [22].

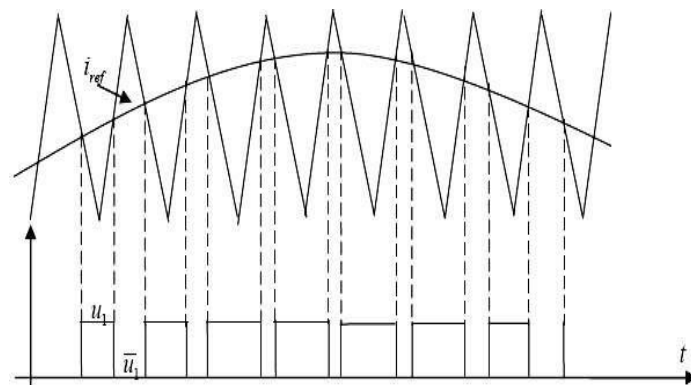


Figure II-25 Principe de la Commande MLI [22].

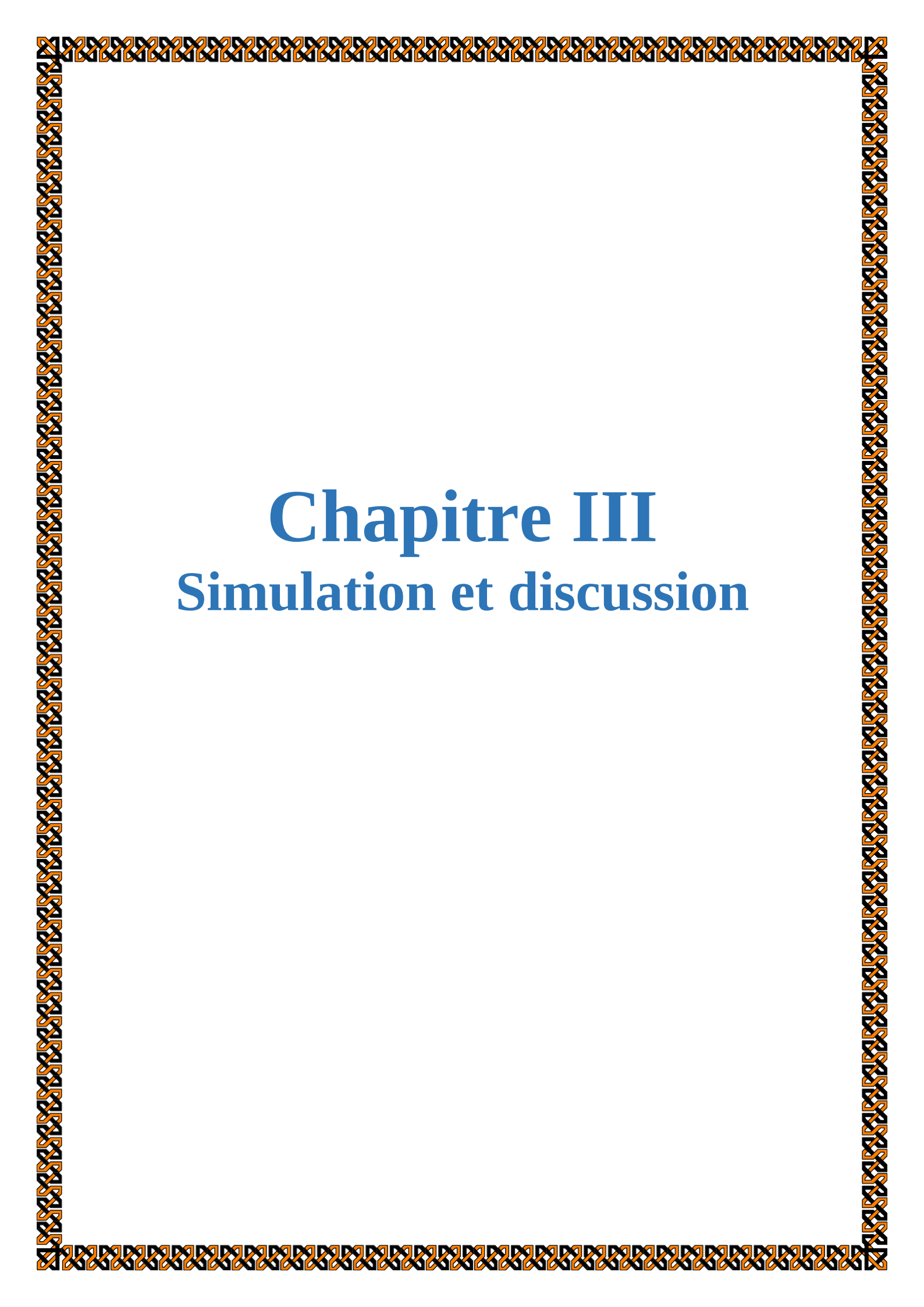
II-14-conclusion

Dans ce chapitre on a exposé la description de la cellule pv et le modèle mathématique et les courants d'un système pv.

Dans La première partie est concernés au générateur pv et l'influence de température et l'éclairement sur leur caractéristique $I=f(v)$.

Dans le deuxième partie on a exposé brièvement quelque topologies de base de convertisseurs (DC-DC) (boost/buck/boost-buck), on a présenté aussi la commande MPPT de convertisseur (DC-AC).

Dans la troisième partie on a donné les différent topologie des onduleurs utilisés dans les systèmes pv pour leur raccordement aux réseaux électriques.



Chapitre III

Simulation et discussion

III-1-Introduction

Sera consacré aux résultats de simulation de toute la chaîne PV connectée au réseau. Les simulations seront effectuées sous l'environnement MATLAB Et l'étude de la qualité de l'onde du courant du réseau au point de raccordement. Pour éliminer les différentes perturbations ont utilisé un filtre LCL passe bas.

III-2- L'amélioration de la qualité d'énergie

Pour l'amélioration de la qualité d'énergie un système PV connecté au réseau nous avons utilisé le filtrage (filtre LCL passe base) après l'onduleur qui contrait L_i , L_g , C_f , R_{sd} , cette filtrage est utilisé pour diminué les harmonique de single courante à la sortie de l'onduleur pour injecté l'énergie dans le réseau il faut que le THD <5%.

III-3- Distorsion harmonique globale (Total Harmonic Distorsion, THD)

La distorsion harmonique (THD) est définie comme le rapport de la valeur efficace du signal (Root Mean Square, rms) composé de toutes les harmoniques sauf de la première harmonique sur la valeur efficace de la première harmonique :

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \dots \dots \dots (III-1)$$

Où V_1 est la valeur rms de la 1^{ère} harmonique et V_n sont les valeurs efficaces des n autres harmoniques.

Les concepteurs et fabricants d'onduleur doivent répondre à une réglementation stricte et à des standards des compagnies d'électricité et des associations publiques de sauvegarde du consommateur qui les assignent et les restreignent à des limites de déviations et de distorsions tolérables de fréquence et de tension par rapport aux valeurs nominales [25].

La qualité de l'onde de tension obtenue sera évaluée par le THD, ou taux d'harmonique ramené au fondamental (THD idéal = 0%).

Actuellement, les meilleurs onduleurs existant sur le marché exhibent des niveaux de distorsions harmoniques inférieures à 3% et un rendement de l'ordre de 90 à 96 %.

Pour commander un onduleur il est nécessaire de satisfaire les deux contraintes suivantes:

- La réduction de la distorsion harmonique globale.
- Le réglage du fondamental de la tension de sortie.

Ces dernières années, le développement récent des interrupteurs pouvant fonctionner à des fréquences suffisamment élevées (quelques centaines de kHz) tels que les BJT, MOSFET, IGBT et les MCT ainsi que l'introduction des microprocesseurs et les composants VLSI pour l'élaboration de la commande et le contrôle dans le domaine de l'électronique de puissance, a permis l'essor et l'élaboration de nouvelles stratégies de commande d'onduleurs en vue de l'amélioration de la qualité de l'onde de sortie; c'est à dire la minimisation du taux d'harmonique [25].

III-4- Dimensionnement du générateur photovoltaïque

Le générateur PV est constitué de 90 modules photovoltaïques 150 W_c, couplés sur trois onduleurs de 1000 W triphasé. Chacun de ces onduleurs est branché sur une phase 230V, 50Hz du réseau Sonelgaz.

Chacun des onduleurs aura son champ photovoltaïque indépendant. Le générateur PV sera donc constitué de trois champs de 30 modules chacun.

Le courant continu du générateur PV est transformé en courant alternatif par les onduleurs qui injectent celui-ci sur le réseau Sonelgaz au travers d'un compteur d'énergie.

III-4-1- Caractéristiques globales d'un générateur photovoltaïque

Le module photovoltaïque (BP SX 150 S), est choisi pour la modélisation puis la simulation. Il fournit une puissance maximum nominale de 150W [14].

Les caractéristiques physiques et de ce panneau photovoltaïque sont données par :

Nombre de cellules en série (N_s) = 10

Nombre de cellules en parallèle (N_p) = 9

1- Pour un éclairement constant ($G=1000 \text{ w/m}^2$), on varie la température afin de voir l'influence de celui-ci par rapport à la caractéristique de générateur PV. En faisant varier la température ambiante (T) entre (0°C et 75 °C).

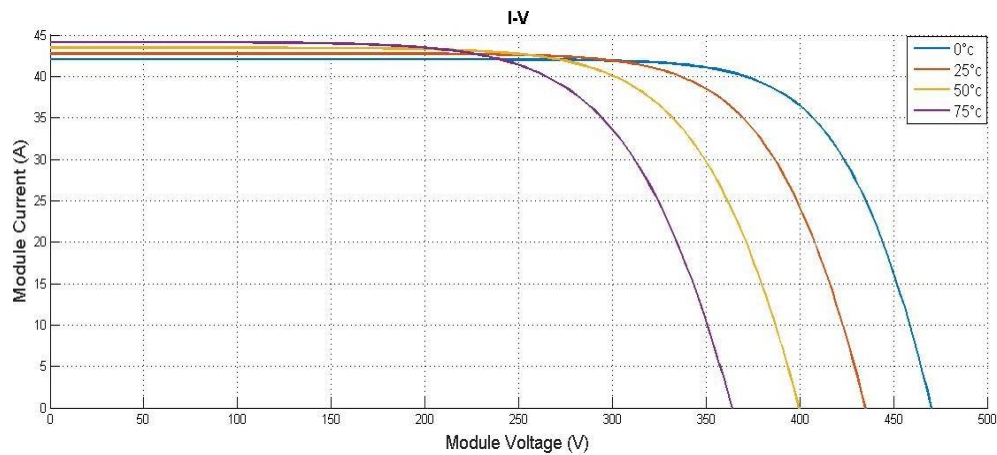


Figure III-1 : Evolution de la caractéristique (I-V) du générateur en fonction de la température.

On note d'après la figure III-1 que L'effet de l'augmentation de température fait diminuer la tension du circuit ouvert de GPV, contrairement au courant de court-circuit qui reste constant.

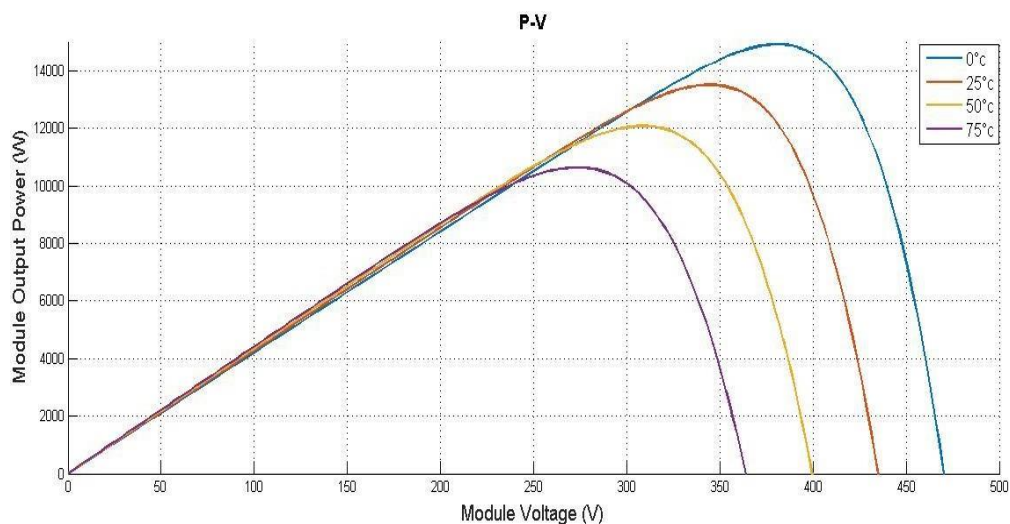


Figure III-2 : Evolution de la caractéristique (P-V) du générateur en fonction de la Température

L'effet de l'augmentation de température fait diminuer la tension du circuit ouvert de GPV, contrairement au courant de court-circuit qui reste constant.

2- Pour visualiser l'influence de l'éclairement, on a fixé la température ambiante ($T=25^{\circ}$) et on a fait varier l'éclairement dans une gamme suffisante. En faisant varier l'éclairement (G) entre 200W/m^2 et 1000 W/m^2 avec un pas de 200.

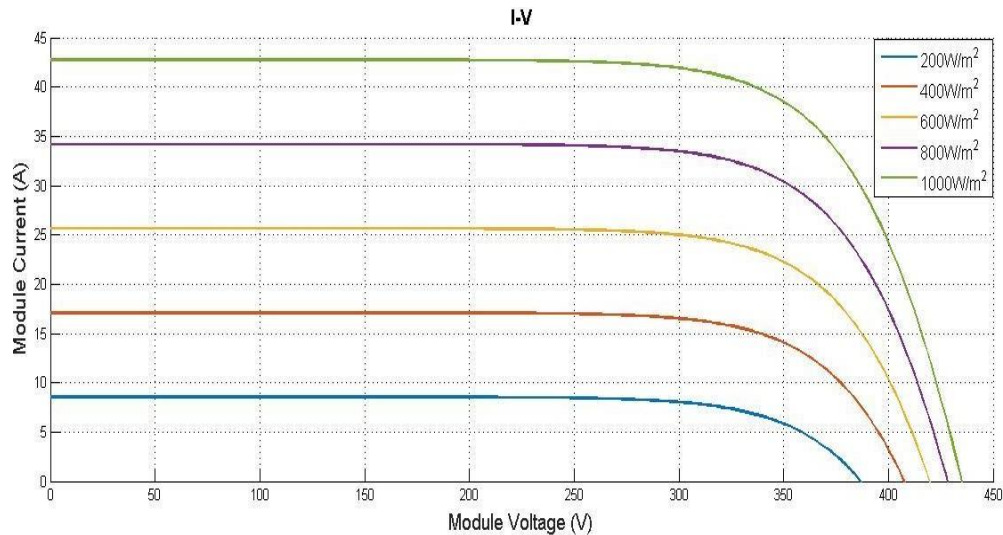


Figure III-3- : Evolution de la caractéristique (I-V) du générateur en fonction de l'éclairement.

On remarque une forte diminution du courant de court-circuit par rapport l'éclairement (G) et une faible diminution de tension de circuit ouvert.

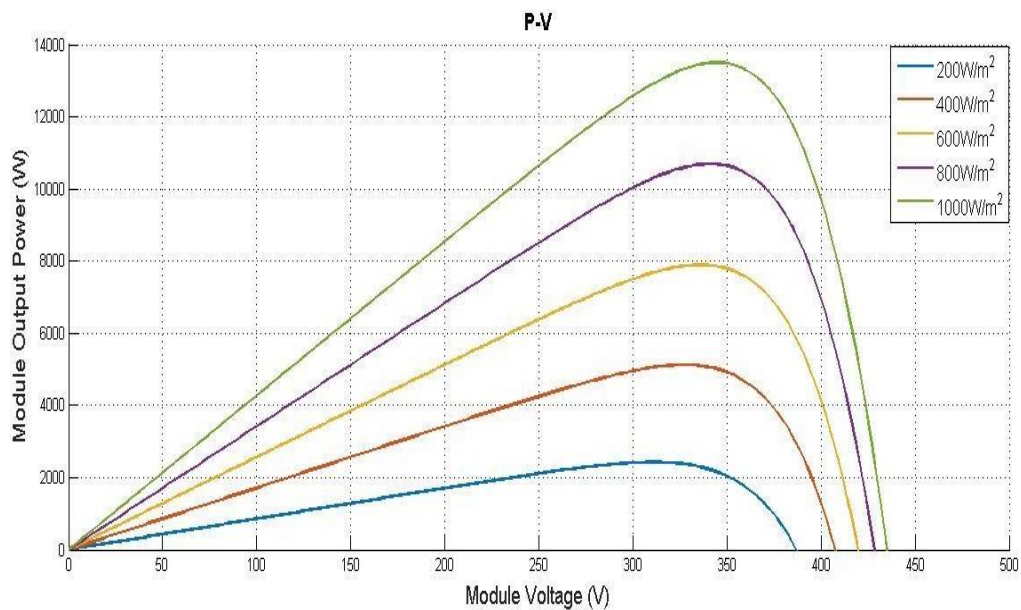


Figure III-4- : Evolution de la caractéristique (P-V) du générateur en fonction de l'éclairement.

On remarque sur (III.4) que l'éclairement influe proportionnellement sur la puissance.

III-5-filtre LCL

Le filtre L a une fonction de transfert du premier ordre et présente donc une atténuation de 20dB/décade surtout la gamme de fréquence. Par conséquent, pour que l'atténuation des harmoniques générés par la commutation de l' onduleur soit suffisante, la fréquence de

commutation de l'onduleur doit être élevée. Ce qui peut avoir pour effet d'augmenter les pertes internes de l'onduleur. Une autre topologie de filtre couramment utilisée avec les alimentations sans interruption est le filtre LC pour l'alimentation des charges résistives. Cependant, quand le filtre LC est connecté au réseau de distribution, la fréquence de résonance du filtre varie en fonction du temps [23].

III-5-1- Procédure de dimensionnement

La procédure étape par étape de dimensionnement du filtre LCL s'inspire de et Calcul de l'impédance de base Z_b et de la capacité de base C_b [23].

$$Z_b = (E_n^2)/P_n \dots\dots\dots (III-2)$$

$$C_b = 1/ (\omega_n * Z_b) \dots\dots\dots (III-3)$$

Les deux inductances L_1 et L_2 du filtre LCL sont exprimées en pourcentage de Z_b et la capacité du filtre C_f en pourcentage de la capacité de base C_b (pu). Avec P_n , la puissance nominale du système d'interfaçage ou encore celle délivrée au réseau en négligeant les pertes internes de l'onduleur [23].

III-5-2- Limites sur les éléments du filtre LCL

1. la valeur de la capacité du filtre est limitée par la chute de facteur de puissance admissible. à la puissance nominale. Généralement, la chute de facteur de puissance admissible est de 0.05pu.
2. la somme des deux inductances du filtre LCL doit être inférieure à 0.1pu pour limiter la chute de tension pendant le fonctionnement du système d'interfaçage [23].
3. La fréquence de résonance du filtre doit être comprise entre dix fois la fréquence du réseau (600Hz) et la moitié de la fréquence de commutation ($4500/2=2.25\text{kHz}$) afin de ne pas créer de la résonance dans les plus basses et hautes fréquences du spectre harmonique.
4. la résistance d'amortissement de la résonance en série avec la capacité du filtre doit être ni trop basse pour éviter des oscillations, ni trop grande pour éviter des Pertes et réduire le rendement du filtre [23].

La procédure de dimensionnement du filtre expliquée ci-dessus a permis de dimensionner le filtre LCL.

III-5-3- Calcul de l'inductance maximale

La réduction des harmoniques de courant autour de la fréquence de commutation et des harmoniques multiples de la fréquence de commutation est faite en accord avec le standard IEEE 519-1992. Des grandes valeurs d'inductance peuvent permettre de

Respecter le code IEEE 519-1992, tout de même les bobines sont encombrantes et chères puis limitent la dynamique du convertisseur statique. L'inductance totale maximale permise [23], est calculée comme suit :

$$L \leq \frac{\sqrt{\frac{2}{3} V_{dc}^2 - E_n^2}}{\omega_n I_{nm}} \dots\dots\dots (III-4)$$

L'inductance totale maximum est limitée par le point 2 de l'étape 2 de la procédure de Dimensionnement du filtre LCL [23].

III-5-4- Calcul de l'inductance L1 (inductance du côté onduleur)

La première étape du calcul des composants du filtre est la conception de l'inductance côté onduleur Li, qui peut limiter l'ondulation du courant de sortie jusqu'à 10 % de l'amplitude nominale [23]. Il peut être calculé selon l'équation dérivée dans :

$$\Delta I_{Lmax} = 0.1 * ((P_n * \sqrt{2}) / E_n) \dots\dots\dots (III-5)$$

$$L_i = V_{dc} / (16 * f_{sw} * \Delta I_{Lmax}) \dots\dots\dots (III-6)$$

III-5-5- Calcul de l'inductance L2 (inductance du côté réseau)

L'inductance côté réseau Lg peut être calculée comme :

$$r = 0.6 \dots\dots\dots (III-7)$$

$$L_g = r * L_i \dots\dots\dots (III-8)$$

III-5-6- Calcul de la capacité du filtre

La conception de la capacité du filtre procède du fait que la variation maximale du facteur de puissance acceptable par le réseau est de 5% [24]. La capacité du filtre peut donc être calculée comme une multiplication de la capacité de base du système C_b :

$$x = 0.15 \dots\dots\dots (III-9)$$

$$C_f = x \cdot C_b \dots\dots\dots (III-10)$$

III-5-7- Fréquence de filtre

La dernière étape de la conception est le contrôle de la fréquence de résonance du filtre. La fréquence de résonance doit être éloignée de la fréquence du réseau et doit être au moins égale à la moitié de la fréquence de commutation, car le filtre doit avoir une atténuation suffisante de la fréquence de commutation du convertisseur [24]. La fréquence de résonance du filtre LCL peut être calculée comme suit

$$W_{res} = \sqrt{(L_i + L_g) / (L_i \cdot L_g \cdot C_f)} \dots\dots\dots (III-11)$$

$$f_{res} = w_{res} / (2 \cdot \pi) \dots\dots\dots (III-12)$$

III-5-8- Résistance à l'amortissement

Afin de réduire les oscillations et les états instables du filtre, le condensateur doit être ajouté avec une résistance connectée en série. Cette solution est parfois appelée « amortissement passif ». c'est simple et fiable, mais cela augmente les pertes de chaleur dans le système et cela diminue considérablement l'efficacité du filtre [24]. La valeur de la résistance d'amortissement peut être calculée comme :

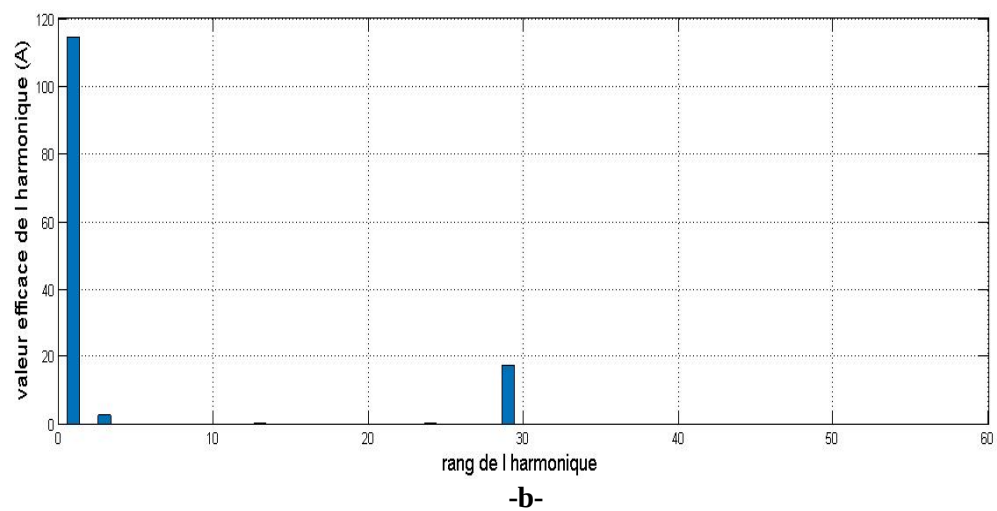
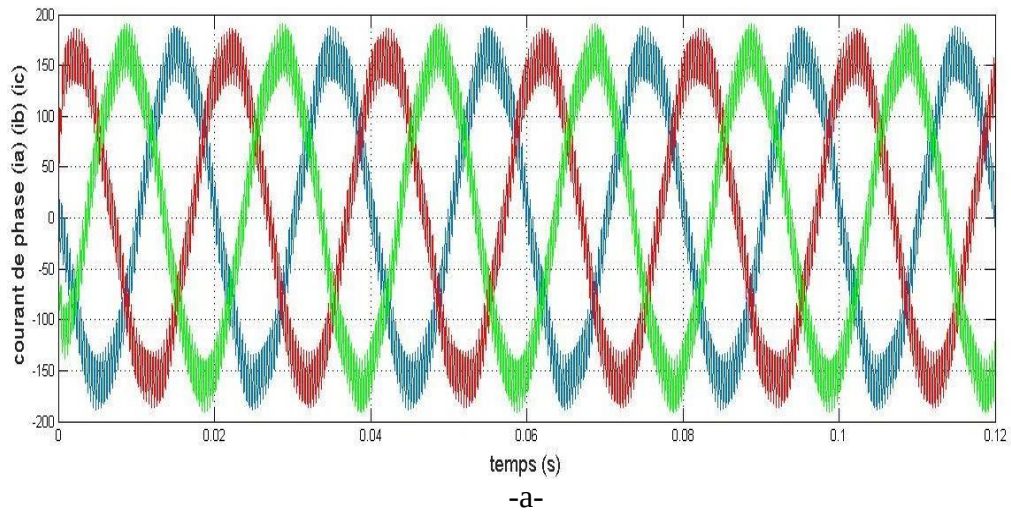
$$R_d = 1 / (3 \cdot w_{res} \cdot C_f) \dots\dots\dots (III-13)$$

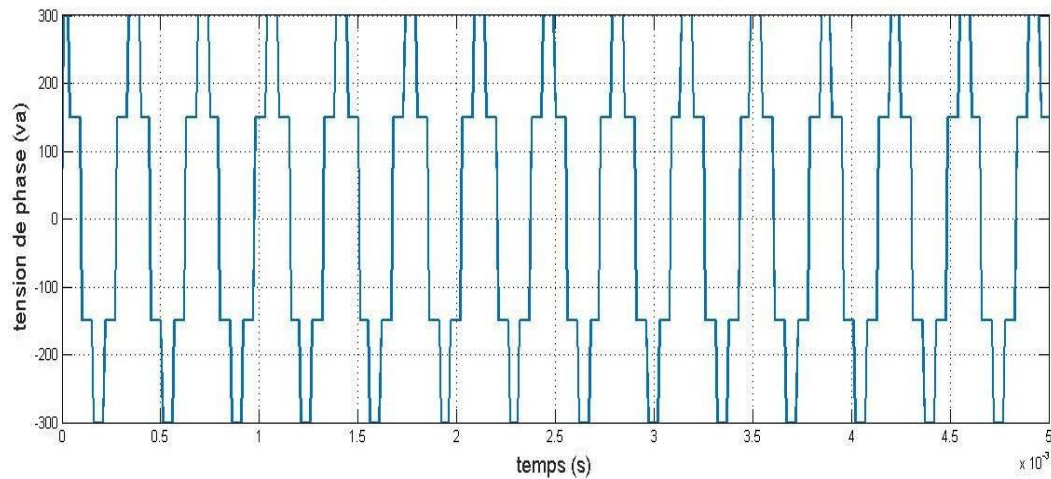
Tableau (III.2) : paramètre électrique du filtre LCL.

Paramètre	Valeur
L_i	0.016 H
L_g	$9.758 \times 10^{-4} \text{H}$
C_f	$2.2565 \times 10^{-5} \text{F}$
f_{res}	$1.567 \times 10^3 \text{Hz}$
R_d	1.7330Ω

III-6- Résultat de simulation d'un générateur PV couplé au réseau via un onduleur à MLI (d'une batterie)

1- Avant le filtrage





-c-

figure III-5- : résultats de simulation de système PV étudié en absence du filtre LCL

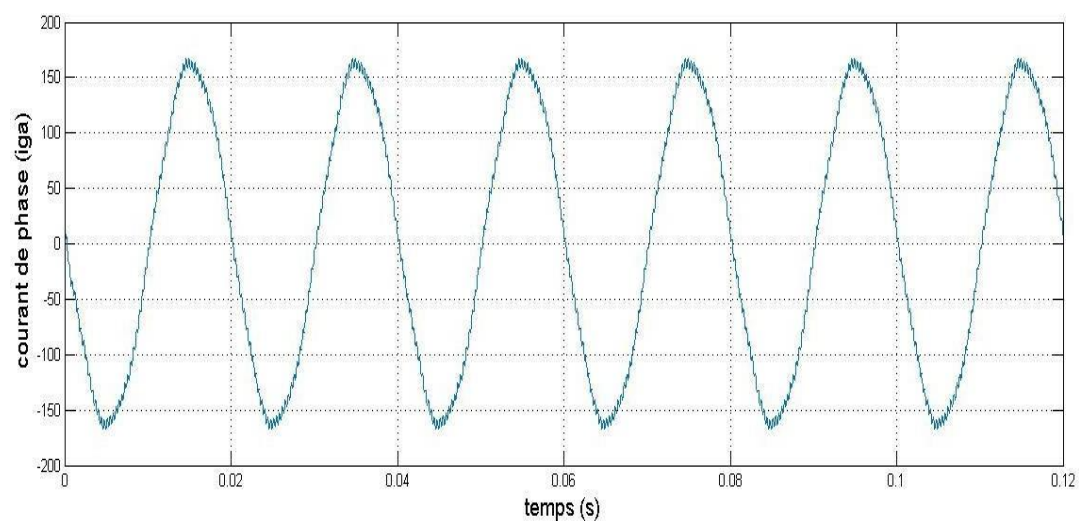
On a simulé aussi le système étudié qui est constitué d'un générateur PV couplé direct avec un onduleur dans le réseau (assimiler d'un réseau)

On a obtenu le résultat de simulation par la figure III-5

Ce groupe de résultats de simulation sous code Matlab représente (a-c). La tension et les courants à la sortie de l'onduleur de courant avant l'opération de filtrage par le filtre LCL qui a comme rôle de minimiser l'harmonique. Comme illustré aux figures précédentes les courants avant le filtrage sont déformés par les harmoniques avec un THD haut 15,45%.

La figure -c- qui suit représente le THD qui est élevé à la sortie de l'onduleur cause des harmoniques aux niveaux de courant THD=13.88%.

2- Après le filtrage



-d-

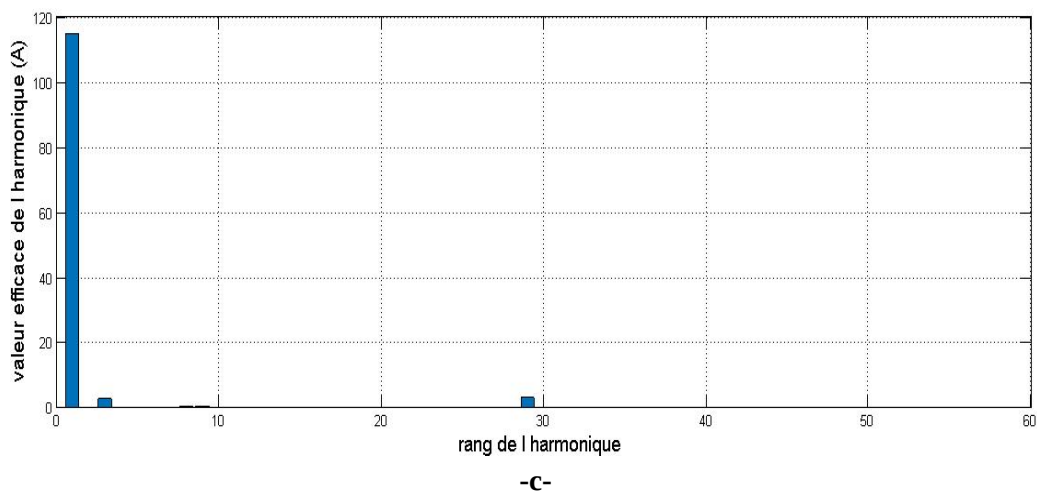


Figure III-6 : résultat de simulation du système PV étudié en présence d'un filtre LCL

Après avoir mesuré le courant après le filtrage on remarque que la forme de signal de courant c'est améliorer de manier significative est devenue presque sinusoïdal. Nous avons obtenu de bon résultat là. Ont diminué les harmonique et on a augmentés la qualité d'énergie .Dans la figure III-6-d- nous observons la forme de courant qui injecter dans le réseau.

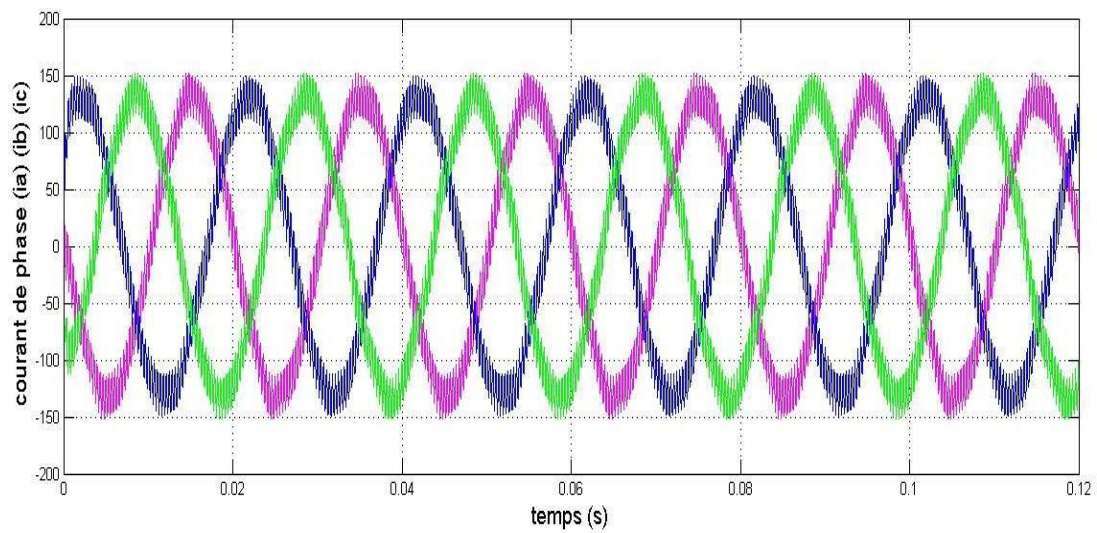
Le signale représente le courant de phase (iga) après le filtrage.

La figure III-6-c- indiquent le THD qui a diminuer de 15.45% à 3.8% a qui montre l'efficacité de filtre utilisé sur l'amélioration de courant qui injectée au réseau.

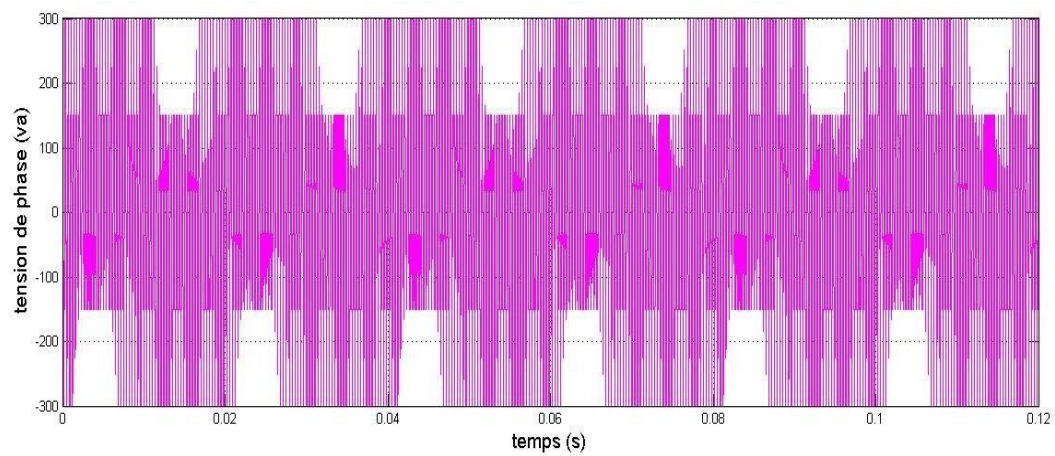
III-7-Résultat de simulation d'un générateur couplé au réseau via un onduleur à MLI en cascade avec un hacheur

III-7-1-En absence et en présence du filtre LCL

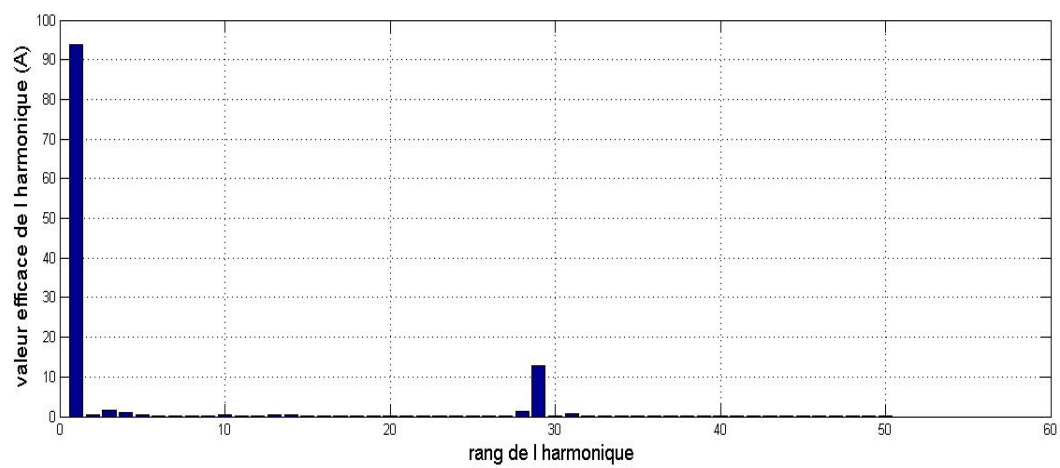
La figure III-7 représente les résultats obtenus par simulation d'un générateur couplé au réseau via un onduleur à MLI en cascade avec un hacheur avant et après l'opération de filtrage en utilisant le filtre LCL qui joue un rôle très important dans la minimisation des harmoniques de hautes fréquences. L'opération du filtrage nous a permis d'obtenir un courant de réseau de forme quasi sinusoïdale, comme il est illustré sur la figure (III.7.d). Nous avons noté une réduction du *THD* de ce courant de 13.88 % à 3.46 %. Ceci permet de respecter bien la limite permise par la norme *IEEE 519* (*THD* <5%). Notons dans ce cas, que le système PV étudié peut rester connecter au électrique de distribution.



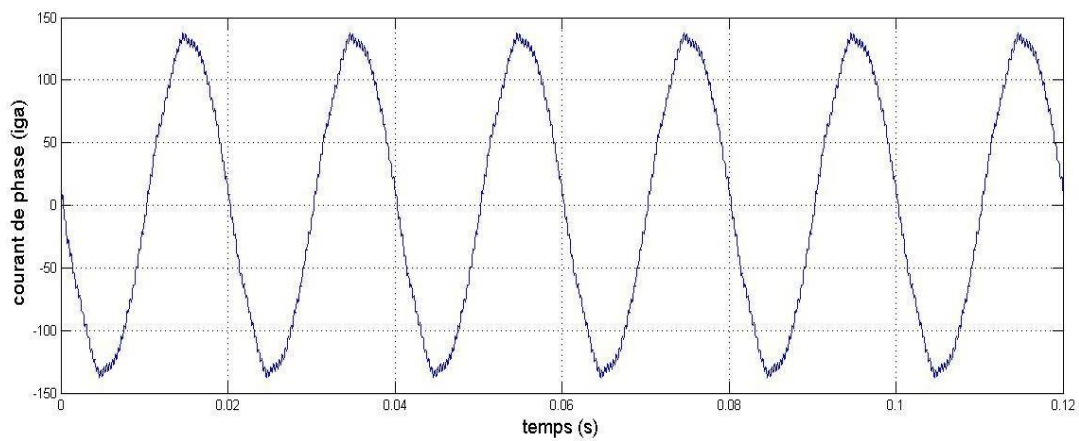
-a-



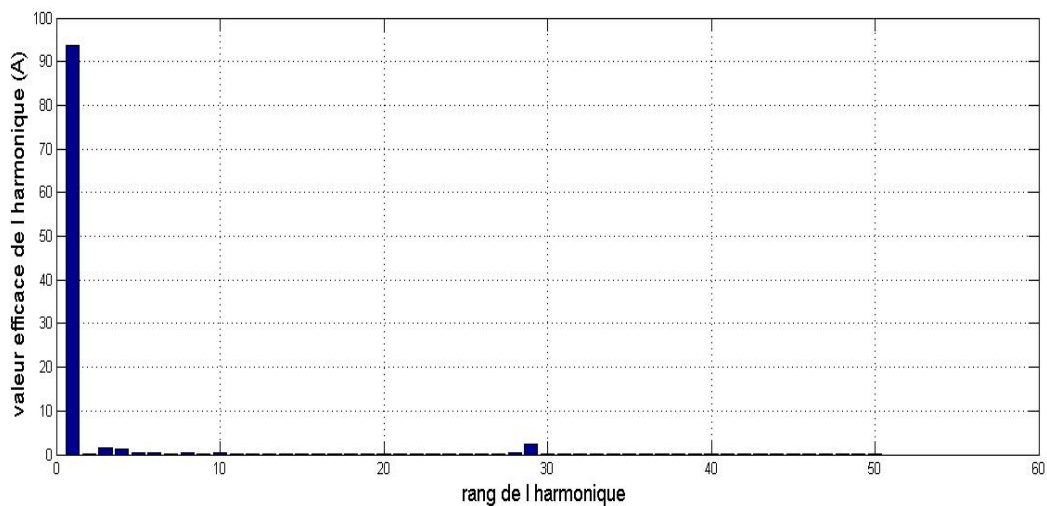
-b-



-c-



-d-



-e-

La Figure III-7 : Résultat de simulation d'un générateur PV connecté au réseau (hacheur + onduleur + réseau) avant et après le filtrage

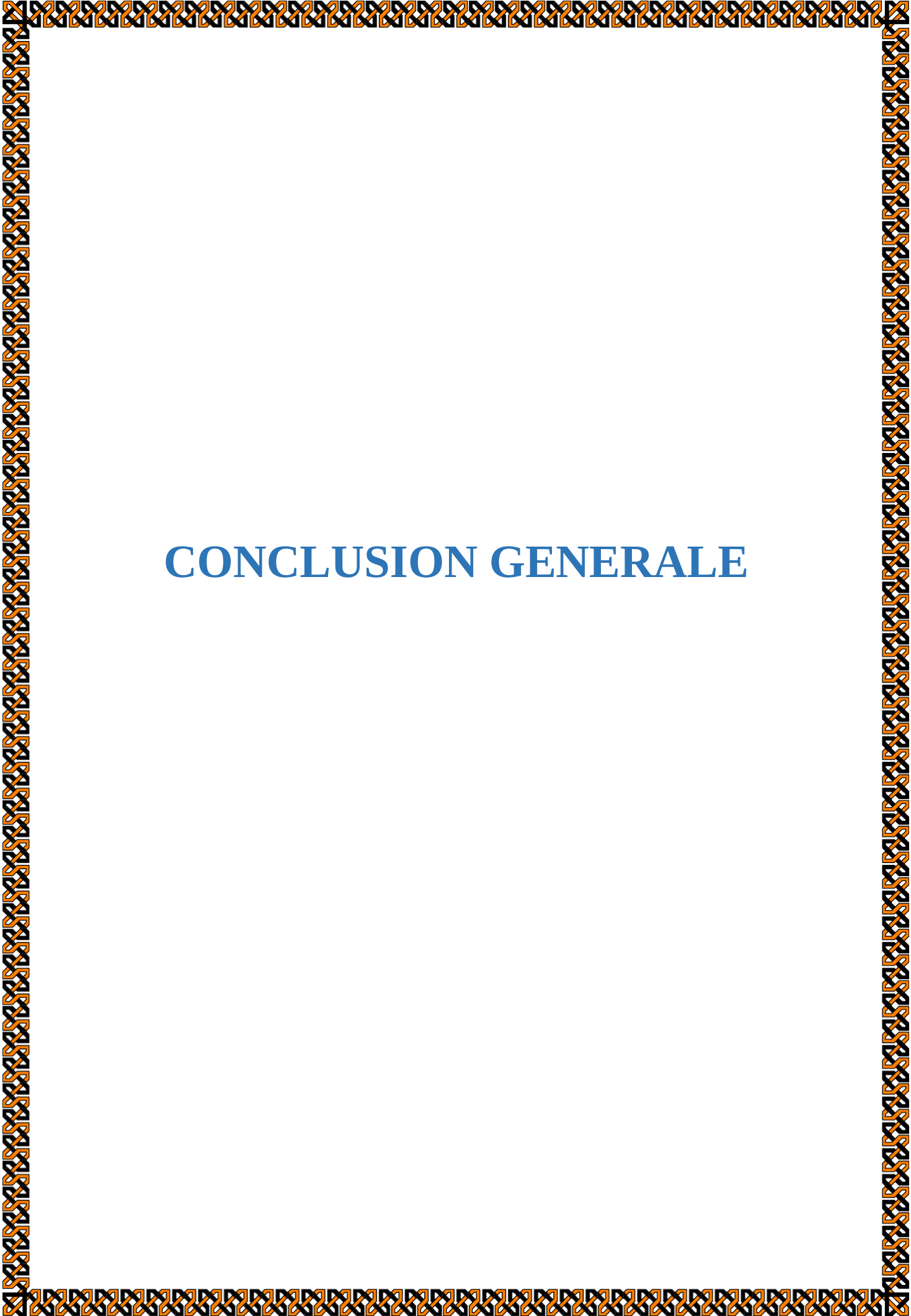
III-8-Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait l'étude de l'amélioration de la qualité d'énergie d'un système PV raccordé au réseau.

- Système pv raccordée au réseau via un onduleur
- Système pv raccordée au réseau via un onduleur on cascade avec un hacheur

On a basé sur le courant qui injecté dans le réseau, nous avons trouvé dans la sortie de l'onduleur la forme de courant est déformée par les harmoniques et le THD est ($THD > 5\%$) élevé.

Après le filtrage on a trouvé que le signal de courant est amélioré par rapport à l'autre et le THD est diminué ($THD < 5\%$).



CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Dans ce travail nous avons fait l'étude de l'amélioration de la qualité d'énergie d'un système PV raccordé au réseau qui compose essentiellement d'un générateur PV (GPV), convertisseur (DC, DC) BOOST, convertisseur (DC, AC), Onduler commander par MLI sinus triangle, filtre (LCL) passe bas.

L'étude, exposée dans le premier chapitre, a touché l'état d'art des systèmes photovoltaïques et les types d'énergies (L'énergie solaire).

Le deuxième chapitre : fera l'objet d'une étude la modélisation des différents composants d'un système photovoltaïque, nous avons présenté une modélisation des différents types des convertisseurs entre les générateurs PV et les charges. On a exposé les différents convertisseurs à savoir DC/DC et DC/AC. Pour les premiers nous avons illustré une méthode utilisée pour la commande du MPPT. Pour les seconds convertisseurs, on a donné les différentes topologies des onduleurs utilisés dans les systèmes PV pour leur raccordement aux réseaux électriques.

L'essentiel du travail, qui a été accompli dans ce mémoire, est donné dans le dernier chapitre, où différents cas de fonctionnement d'un générateur PV couplé au réseau via un onduleur à MLI ou d'un générateur PV couplé au réseau via un onduleur à MLI en cascade avec un hacheur ont été simulés et discutés.

De plus, nous avons proposé une procédure de filtrage des harmoniques de tension de l'onduleur triphasé à MLI en se basant sur un filtre passif de type LCL. Ce chapitre a été clôturé par quelques résultats de simulation montrant l'efficacité de cette stratégie de filtrage en termes de dépollution du courant de réseau et d'amélioration de la qualité d'énergie.

Finalement et comme perspectives de ce travail de mémoire, les points essentiels suivants sont envisageables :

- Validation expérimentale de la procédure de commande et de filtrage d'un système PV connecté au réseau.
- Etudier la poursuite du point de puissance maximale en utilisant d'autres techniques de commande modernes telles que celles de l'intelligence artificielle (réseaux de neurones et neuro-flous).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Belhadj Mohammed, « modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome », mémoire de magister en microélectronique –photovoltaïque, centre universitaire de Bechar, 2008.
- [2] Gilles corman, différences entre énergies fossiles et renouvelables : publié le 25 juil. 2016, <https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/les-energies-renouvelables>
- [3] Alain Beltran, l'observatoire des énergies renouvelables : publié le 1 janvier 2007, http://www.energies-renouvelables.org/energie_eolienne.asp
- [4] Othman Ben seddik. Fathi Djaloud. Étude et optimisation d'un sys pv. Mémoire de master eth. Université d'Ouargla 2012.
- [5] Salim Arab. Aalila Toudert. Étude d'un système photovoltaïque. Mémoire de fin d'étude de master académique de Tizi-Ouzou 2017.
- [6] Alain Ricaud. Systèmes photovoltaïques. poly Tech savoie 5eme année. oct 2011.
- [7] B. flèche, D. Delagnes, « énergie solaire photovoltaïque », sti elt, juin 2007, document d'internent disponible à, http://www.itismajo.it/fff/.../energie_solaire_photovoltaique.pdf, consulté janv. 2014.
- [8] Sofiane Fellouah. Siham Mesbahi. Étude d'un système photovoltaïque connecte au réseau. Mémoire de fin d'études de master. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou 15/07/2015.
- [9] Farida Boukhtouche Cherfa. Étude et réalisation d'une centrale photovoltaïque connectée au réseau de distribution électrique BT. Mémoire de magister école nationale polytechnique 2004.
- [10] Thomas Mambrini. Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies. Météorologie. Université paris sud - paris xi, 2014. Français.
- [11] Messaoudene Hichem. Détermination intelligente de la puissance maximale des modules photovoltaïques. Mémoire de magister Université El hadj Lakhdar Batna.2013.
- [12] Helali kamelia. Modélisation d'une cellule photovoltaïque : étude comparative. Mémoire de magister en électrotechnique université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.le25/06/ 20012.
- [13] Maher Chaabene, « gestion énergétique des panneaux photovoltaïques », master de génie électrique, conversion électrique des énergies renouvelables (CEER), université de Sfax école

nationale d'ingénieurs de Sfax, 2008, document d'internent disponible à, www.maher.cmerp.net/doc/conférence_2.ppt, consulté 08/05/2017.

[14] I. Boumrar. Améliorations des performances d'un panneau photovoltaïque. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou faculté du génie de la construction département de génie mécanique mémoire de fin d'études.2010.

[15] Mokhtari Abdallah- Berrakhoua Fakhereddine. Étude par simulation d'un système photovoltaïque autonome. Mémoire de master université Amar Thelidji laghouat.2016/2017.

[16] Euroserv'er. Baromètre photovoltaïque. Systèmes solaires - le Journal du photovoltaïque, hors-série n.1, 2009

[17] Matheepot Phattanasak. Étude, modélisation et mise en œuvre de convertisseurs dc-dc isolés multiport et modulaires. Autre. Université de lorraine, 2012. Français. ffnnt :2012lorr0193ff. fftel-01749387

[18] Hanen abbes, Hafedh Abid, Kais loukil, Ahmad Toumi, Mohamed Abid. Étude comparative de cinq algorithmes de commande mppt pour un système photovoltaïque. Conférence internationale des énergies renouvelables (cier'13) Sousse, Tunisie – 2013

[19] Dries Hania. Larbi Lylia. M'hand Said Zoubir. Synthèse des méthodes de commande mppt sous ombrage total et partiel. Projet de fin d'étude de master université Amira-Bejaia. 2019/2020

[20] Benadel faiza. Étude et simulation d'une commande mppt pour système pv. Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de master en génie électrique université Mohamed Boudiaf - M'sila. 2015 – 2016

[21] S.Chikhi, M.d. Draou, f. Chikhi, a. Mehdaoui et A. Mammeri. Étude, modélisation et réalisation d'un convertisseur DC/AC pour système de pompage photovoltaïque de 4 kva. Division conversion photovoltaïque, unité de recherche en énergies renouvelables en milieu saharien, URERMS centre de développement des énergies renouvelables, cder 01000, Adrar, Alegria. 20 décembre 2011

[22] Aboub Hania, commande d'un onduleur neuf niveaux destiné aux fortes puissances pv, magister en électrotechnique. Alegria. 18 décembre 2009

[23] Aslain Ovono Zue. Conception et simulation de systèmes d'interfaçage de l'énergie photovoltaïque au réseau de distribution opérationnels 24h par jour. comme exigence partielle à l'obtention de la maîtrise en génie électrique. École de technologie supérieure université du Québec. le 31 janvier 2007

- [24] A. Reznik, M. Godoy Simões, Ahmed Al-durra, S. M. Muyeen. Colorado school of mines, EECS depart, golden, co, USA. electrical engineering department, the petroleum institute, Abu Dhabi, use.
- [25] W.R. Anis, "stepped sine wave dc/ac inverter" solar energy, vol .ie.29, n°3, pp249-254, 1999.