

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la
recherche scientifique Université A. MIRA-BEJAIA

Faculté Technologie

Département de Génie Électrique



Mémoire de fin d'étude en vue d'obtention du diplôme Master

En Génie Electrique

Option : Electrotechnique Industriel

Thème :

**Amélioration des performances de la connexion
au réseau d'un system photovoltaïque**

Réalisé par :

M^r : MOUKA Ahmed

M^r : NACERI Cherif

Encadré par :

M^r BOUDRIES Zoubir

Année universitaire : 2021-2022

Remerciements

Nous rendons nos profondes gratitude à dieu qui nous a aidé à réaliser ce modeste travail.

Nous exprimons nos profondes gratitude à nos parents pour leurs encouragements, leurs soutiens et pour les sacrifices qu'ils ont enduré.

Nous remercions notre encadreur Mr Boudries Zoubir* pour l'effort qu'ils ont déployé, pour nous aider, conseiller, encourager et corriger.

Nous remercions aussi tout le corps enseignant et administratif qui ont contribué à notre formation universitaire.

Table des matières

Introduction générale.....	- 1 -
CHAPITRE I Généralités sur les systèmes PV connectés au réseau.	- 2 -
I.1 Introduction.....	- 3 -
I.2 Les émissions du Soleil.....	- 3 -
I.3 La cellule photovoltaïque.....	- 4 -
I.3.1 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	- 4 -
I.3.2 Types des cellules photovoltaïques :.....	- 5 -
I.3.3 Associations des cellules photovoltaïques	- 6 -
I.3.4 Protection d'un module photovoltaïque.....	- 6 -
I.3.5 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....	- 7 -
I.4 Applications des systèmes photovoltaïques.....	- 7 -
I.4.1 Systèmes autonomes	- 7 -
I.4.2 Systèmes hybrides.....	- 8 -
I.4.3 Systèmes couplés au réseau.....	- 8 -
I.4.3.1 Topologies des systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique	- 9 -
I.4.3.2 Classifications des Centrales Photovoltaïques Connectées au Réseau.....	- 11 -
I.5 Qualité de l'énergie électrique	- 11 -
I.6 Perturbations dans les réseaux électriques [14]	- 12 -
I.6.1 Perturbations harmoniques	- 12 -
I.6.2 Harmoniques et inter harmoniques.....	- 12 -
I.6.3 Caractérisation des harmoniques [15]	- 13 -
I.7 Normes de qualité	- 14 -
I.8 Dispositifs de filtrage.....	- 15 -
I.8.1 Filtrage passif.....	- 15 -
I.8.2 Filtrage actif [17]	- 16 -
I.8.2.1 Les filtres actifs parallèles (compensation de courant harmonique).....	- 16 -
I.8.2.2 Les filtres actifs séries (compensation de tension harmonique).....	- 17 -
I.8.2.3 Les filtrages hybrides.....	- 17 -
I.9 Conclusion	- 19 -
CHAPITRE II Modélisation du système PV connecté au réseau	- 20 -
II.1 Introduction	- 21 -
II.2 Modélisation du générateur photovoltaïque	- 21 -
II.2.1 Modèle idéal.....	- 21 -
II.2.2 Modèle à une diode avec résistance shunt.....	- 22 -
II.2.3 Modèle à une diode	- 23 -

II.3 Simulation du panneau photovoltaïque SIEMENS SM 110-24	- 25 -
II.3.1 Caractéristique (I_{pv} - V_{pv}) (et (P_{pv} - V_{pv}) du panneau PV dans les conditions (STC)	- 26 -
II.3.2 Effet de l'éclairement et de la température.....	- 26 -
II.3.3 Effet de l'éclairement	- 26 -
II.3.4 Effet de la température	- 28 -
II.4 Les convertisseurs DC-DC (Hacheurs)	- 28 -
II.4.1 Modélisation de le hacheur élévateur (Boost).....	- 29 -
II.5 Modélisation du bus continu.....	- 30 -
II.6 Description de la commande MPPT	- 31 -
II.6.1 Introduction.....	- 31 -
II.6.2 Méthode de perturbation et observation (P&O)	- 31 -
II.6.3 Modélisation de l'onduleur triphasé à 2 niveaux.....	- 32 -
II.6.4 Modélisation du réseau électrique	- 34 -
II.7 Conclusion	- 34 -
Chapitre III Commande, simulation et amélioration du système	- 35 -
III.1 Introduction	- 36 -
III.2 La modulation sinus-triangle (MLI sinusoïdale).....	- 36 -
III.3 Boucle de régulation du bus continu	- 36 -
III.4 Simulation avec la commande MLI deux niveaux.....	- 37 -
III.4.1 Résultats de simulation pour un onduleur MLI deux niveaux.....	- 38 -
III.5 Amélioration de la connexion réseau	- 42 -
III.6 Conclusion.....	- 47 -
Conclusion Générale	- 48 -

Liste des figures

Figure I. 1 L'éclairement énergétique et la puissance reçue sous forme de rayonnement par unité de surface [1].	- 3 -
Figure I. 2 Structure d'une cellule photovoltaïque.	- 5 -
Figure I. 3 Images des différents types de cellule photovoltaïque.	- 5 -
Figure I. 4 Schéma des cellules photovoltaïques connectées en série [5].	- 6 -
Figure I. 5 Schéma des cellules photovoltaïques connectées en parallèle [5].	- 6 -
Figure I. 6 Disposition des différentes protections voir : la diode by-pass et anti-retour [7].	- 7 -
Figure I. 7 Installation photovoltaïque autonome [8].	- 8 -
Figure I. 8 Système hybride.	- 8 -
Figure I. 9 Systèmes PV couplés aux réseaux.	- 9 -
Figure I. 10 Topologies des onduleurs PV.	- 10 -
Figure I. 11 Système PV connecté au réseau électrique [10].	- 11 -
Figure I. 12 Structure d'un filtre amorti et un filtre résonant agissant sur plusieurs rangs harmoniques.	- 16 -
Figure I. 13 Configuration d'un filtre actif parallèle.	- 16 -
Figure I. 14 Filtre actif série.	- 17 -
Figure I. 15 Association des filtres actifs série et parallèle.	- 17 -
Figure I. 16 Filtre actif série avec filtre passif parallèle.	- 18 -
Figure I. 17 Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.	- 18 -
Figure I. 18 Filtre actif série en série avec un filtre passif parallèle.	- 18 -
Figure II. 1 Modèle électrique idéal d'un module photovoltaïque.	- 21 -
Figure II. 2 Modèle électrique à une diode avec résistance shunt.	- 22 -
Figure II. 3 Modèle à une diode sans résistance shunt.	- 23 -
Figure II. 4 Schéma bloc d'une cellule photovoltaïque sous Matlab/Simulink.	- 25 -
Figure II. 5 Caractéristique I_{pv} - V_{pv} d'une panneau PV dans les conditions STC.	- 26 -
Figure II. 6 Caractéristique P_{pv} - V_{pv} d'une panneau PV dans les conditions STC.	- 26 -
Figure II. 7 Effet de l'ensoleillement sur la caractéristique I_{pv} - V_{pv} .	- 27 -
Figure II. 8 Effet de l'ensoleillement sur la caractéristique P_{pv} - V_{pv} .	- 27 -
Figure II. 9 Effet de la température sur la caractéristique I_{pv} - V_{pv} .	- 28 -
Figure II. 10 Effet de la température sur la caractéristique P_{pv} - V_{pv} .	- 28 -
Figure II. 11 Symbole d'un convertisseur DC-DC.	- 29 -
Figure II. 12 Schéma équivalent d'un hacheur survolteur.	- 29 -

Figure II. 13 Schéma équivalent du hacher boost avec K fermé.....	- 29 -
Figure II. 14 Schéma équivalent du hacheur boost avec K ouvert.....	- 30 -
Figure II. 15 Schéma équivalent d'un bus continu.....	- 30 -
Figure II. 16 Schéma de converge vers le PPM par P&O.....	- 32 -
Figure II. 17 Organigramme de la méthode Perturbation et Observation.....	- 32 -
Figure II. 18 Circuit de l'onduleur relié au réseau électrique.	- 33 -
Figure III. 1 Schéma de principe de la technique MLI	- 36 -
Figure III. 2 Régulation du bus-continue.	- 36 -
Figure III. 3 Schéma de simulation global d'un système photovoltaïque connecté au réseau.	- 37 -
Figure III. 4 Allure de la puissance en sortie du GPV	- 38 -
Figure III. 5 Allure de la tension de bus continue V_{dc}	- 39 -
Figure III. 6 Allure de la puissance active	- 39 -
Figure III. 7 Allure de la puissance réactive	- 40 -
Figure III. 8 Allure du courant d'une phase du réseau	- 40 -
Figure III. 9 Représentation du spectre d'harmonique du courant de réseau.....	- 41 -
Figure III. 10 Allure des courants $i_{a,b,c}$	- 41 -
Figure III. 11 Zoom sur l'allure des courants i_{abc}	- 42 -
Figure III. 12 Allure du courant et de la tension d'une phase du réseau	- 42 -
Figure III. 13 Allure des puissances actives.....	- 43 -
Figure III. 14 Allure des puissances réactives.....	- 43 -
Figure III. 15 Allure de la tension de bus continu V_{dc}	- 44 -
Figure III. 16 Allure du courant d'une phase du réseau	- 44 -
Figure III. 17 Représentation du spectre d'harmonique du courant de réseau.....	- 45 -
Figure III. 18 Allure des courants i_{abc}	- 46 -
Figure III. 19 Zoom sur l'allure des courants i_{abc}	- 46 -
Figure III. 20 Allures du courant et de la tension d'une phase du réseau.....	- 47 -

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau I. 1 Les différents types des cellules avec leur rendement.	- 5 -
Tableau I. 2 Valeurs maximales des taux d'harmoniques acceptables	- 15 -
Tableau II. 1 Paramètres du panneau photovoltaïque SIEMENS SM 110-24[18].	- 25 -
Tableau III. 1 les paramètres de simulation	- 38 -

Liste des symboles

PV : Photovoltaïque.

DC : Courant continu.

AC : Courant alternatif.

MPPT : Maximum Power Point Tracking.

PPM : Point de puissance maximal.

P&O : Algorithme de perturbation et observation.

THD : Total Harmonic Distortion.

FAP : Filtre actif parallèle.

FAS : Filtre Actif Série.

FAH : Filtre Actif Hybride.

UPQC : Unified Power Quality Conditioner

STC : Conditions standards.

A : Facteur de qualité de la diode.

K : Constant de Boltzmann, qui est égale à $1.3806503 \times 10^{-23}$ J/K.

T : Température en degré Kelvin.

q : Charge de l'électron, qui égale à 1.6×10^{-19} C.

R_s : Résistance série (Ω).

R_{sh} : Résistance Shunt (parallèle) (Ω).

D : La diode.

G_{stc} : Niveau d'insolation dans les conditions standards de fonctionnement (W/m^2).

G : Niveau d'insolation dans les conditions quelconques de fonctionnement (W/m^2).

P_{opt} : Puissance optimale de panneau photovoltaïque (W).

ΔP_{PV} : Variation de la puissance par rapport à l'insolation et à la température (W).

ΔG : Variation de l'insolation (W/m^2).

T_{stc} : La température dans les conditions standards de fonctionnement ($^{\circ}C$).

T_c : La température dans les conditions quelconques de fonctionnement ($^{\circ}C$).

ΔT_c : Variation de la température ($^{\circ}C$).

α_{cc} : Coefficient d'incrémentation du courant (I_{cc}) ($mA/^{\circ}C$).

β_{co} : Coefficient d'incrémentation de la tension V_{co} ($mV/^{\circ}C$).

P_{PV} : Puissance photovoltaïque (W).

I_{PV} : Courant photovoltaïque (A).

I_{ph} : Courant photon (A).

I_d : Courant de la diode (A).

I_s : Courant de saturation de la diode (A).

I_{sh} : Courant de la résistance shunt (A).

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

I_{ppm} : Courant de point de puissance maximal (A).

I_c : Courant de condensateur (A).

I_L : Courant de l'inductance (A).

I_s : Courant de sortie du convertisseur (A).

I_{ond} : Courant de l'onduleur (A).

$i_{a,b,c f}$: Courant à la sortie de l'onduleur (A).

$I_{sa,b,c}$: Courant de réseau (A).

I_{ch} : Courant de la charge c (A).

ΔI_{PV} : Variation du courant par rapport à l'insolation et à la température (A).

V_{PV} : Tension photovoltaïque (V).

V_d : Tension aux bornes de diode (V).

V_{mpp} : Tension au point de puissance maximale (V).

V_{cc} : Tension de court-circuit (V).

V_{dc} : Tension du bus continue (V).

$V_{a,b,c}$: Tension de sortie de l'onduleur phase a (V).

$E_{sa,b,c}$: Tension de réseau phase a(V).

$V'_{sa,b,c}$: Tension au borne de filtre passif R-L coté onduleur (V).

V_M : Tension maximale (V).

V_{eff} : Tension efficace (V).

ΔV_{PV} : Variation de la tension par rapport à l'insolation et à la température (V).

C : Condensateur (F).

R_c : La résistance associée au filtre de charge (Ω).

L_c : L'inductance associée au filtre de charge (H).

R_{ch} : La résistance de charge (Ω).

L_{ch} : L'inductance de charge (H).

Introduction générale

Introduction générale

La production de l'énergie est très importante pour se développer et atteindre les besoins de l'être humain. De nos jours, avec la diminution du stock mondial d'hydrocarbures d'origine fossile (pétrole, gaz et charbon) et la pollution qui ne cesse d'envahir la nature, le recours aux énergies renouvelables prend des proportions importantes pour faire face à la demande croissante et continue d'énergie.

L'énergie solaire photovoltaïque est une source infinie, propre, une énergie du futur qui transforme les rayonnements solaires en électricité grâce à des panneaux photovoltaïques qui se composent de plusieurs cellules reliées entre elles. L'un des avantages de cette énergie est qu'elle ne cause ni bruit ni rejet.

L'injection de cette énergie au réseau après production fait appel à des convertisseurs d'électronique de puissance (onduleurs) qui se trouvent être une source importante de pollution harmonique. L'amélioration de la connexion au réseau des systèmes de production d'énergies renouvelables d'origine photovoltaïque est un sujet qui attire de plus en plus l'attention des chercheurs à travers le monde. Les solutions proposées concernent aussi bien les techniques de commande que la topologie des convertisseurs utilisés. Dans notre travail, nous étudions l'amélioration en termes du contenu harmonique (valeur THD) produite par l'emploi d'un onduleur trois niveaux comparativement à un deux niveaux. Le travail sera présenté comme suit :

Dans le premier chapitre, on présentera le principe de production de l'énergie solaire photovoltaïque, ainsi que les avantages et les inconvénients de cette source d'énergie. On exposera aussi les causes et les conséquences des perturbations harmoniques sur le réseau suivi des différentes solutions pour lutter contre les effets de ces harmoniques.

Le second chapitre traitera de la modélisation des différentes composantes de notre système photovoltaïque connecté au réseau. Notre système se compose d'un générateur photovoltaïque, un hacheur survolteur, un onduleur couplé au réseau à partir d'un filtre passif RL. On présentera aussi la commande MPPT qui est basée sur l'algorithme perturbation et observation (P&O).

Le troisième chapitre sera consacré à la simulation de notre système avec la commande MLI pour un onduleur deux niveaux puis trois niveaux. Les résultats de simulation seront présentés et discutés.

Nous terminerons notre travail par une conclusion générale qui résumera les principaux résultats obtenus, et présenterons des perspectives pour son amélioration.

CHAPITRE I

Généralités sur les systèmes PV connectés au réseau.

I.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons aborder quelques notions sur l'énergie photovoltaïque, son principe de fonctionnement, ses avantages et ses inconvénients.

Nous allons aussi discuter sur les problèmes des harmoniques, leurs origines et leurs effets sur le réseau, puis on proposera des solutions pour réduire la pollution harmonique pour avoir une bonne qualité d'énergie.

I.2 Les émissions du Soleil

L'énergie émise par le Soleil l'est d'abord sous la forme de rayonnements électromagnétiques dont l'ensemble forme le rayonnement solaire, qui constitue la seule source externe notable d'énergie pour l'atmosphère. Ce rayonnement solaire se propage à la vitesse de la lumière. Notre œil perçoit une partie seulement du rayonnement solaire, celle située dans le domaine dit visible, de longueurs d'onde comprises entre 0,40 et 0,70 μm (certains auteurs placent la limite du visible à 0,77 μm pour que les contributions énergétiques du visible et du proche infrarouge soient égales). Le Soleil émet cependant dans une large gamme de longueurs d'onde, allant (dans le sens des petites vers les grandes longueurs d'onde) des rayons gamma (longueurs d'onde inférieures à 10-12 m) aux grandes ondes radioélectriques (de longueur d'onde atteignant 1 000 mètres), en passant par les rayons X, le rayonnement ultraviolet, le rayonnement visible, le rayonnement infrarouge et le rayonnement hyperfréquences.

La plus grande partie de l'énergie solaire est cependant rayonnée dans les domaines ultraviolet, visible et proche infrarouge : 99,2 % de l'énergie solaire hors atmosphère se trouve entre 200 nm et 4 μm . Au sol, par suite de l'absorption du rayonnement solaire par la vapeur d'eau, le spectre est limité vers le haut à 2,5 μm environ [1].

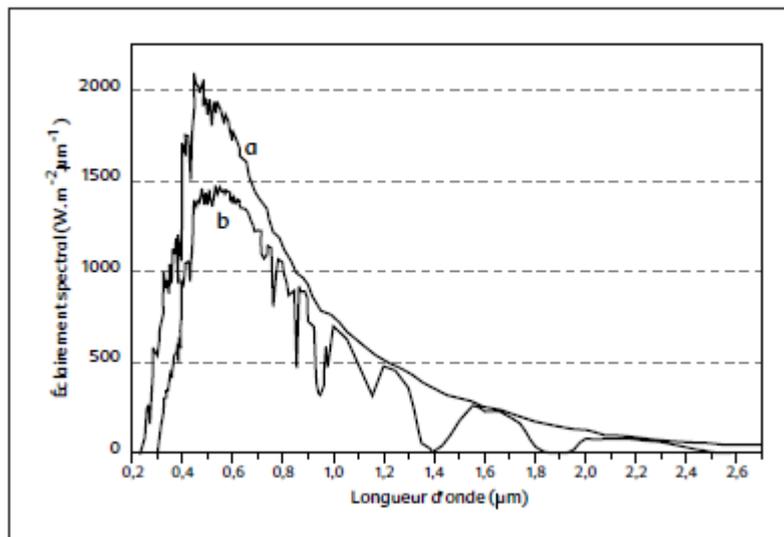


Figure I. 1 L'éclairement énergétique et la puissance reçue sous forme de **rayonnement par unité de surface** [1].

I.3 La cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque » découvert par E. Becquerel en 1839. Elles sont les plus petits éléments d'une installation photovoltaïque, réalisée à partir de matériaux semi-conducteurs, qui ont des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants.

Plusieurs types de semi-conducteurs sont utilisés dans cette conversion ; on cite le silicium (Si), le germanium (Ge), le sélénium (Se) ou les composés semi-conducteurs tels que l'arséniure de gallium (GaAs), ou le tellure de cadmium (CdTe). Les cellules solaires de type GaAs sont très coûteuses dans leur fabrication, elles sont utilisées uniquement dans les applications spatiales. Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques [3].

I.3.1 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Le fonctionnement de la cellule photovoltaïque est fondé sur les propriétés des semi-conducteurs lesquels, percutés par les photons, mettent en mouvement un flux d'électrons . Les photons sont des particules élémentaires qui transportent l'énergie solaire à 300 000 km/s et qu'Albert Einstein appelait dans les années 1920 les « grains de lumière ». Lorsqu'ils frappent un élément semi-conducteur comme le silicium , ils arrachent des électrons à ses atomes . Ces électrons se mettent en mouvement, de façon désordonnée, à la recherche d'autres « trous » où se repositionner.

Mais pour qu'il y ait un courant électrique, il faut que ces mouvements d'électrons aillent tous dans le même sens. Pour les y aider, on va associer deux types de silicium. La face exposée au soleil est « dopée » avec des atomes de phosphore qui comportent plus d'électrons que le silicium, l'autre face est dopée avec des atomes de bore qui comportent moins d'électrons. Cette double face devient une sorte de pile : le côté très chargé en électrons devient la borne négative (N), le côté avec moins d'électrons devient la borne positive (P). Entre les deux il se crée un champ électrique.

Quand les photons viennent exciter les électrons, ceux-ci vont migrer vers la zone N grâce au champ électrique, tandis que les « trous » vont vers la zone P. Ils sont récupérés par des contacts électriques déposés à la surface des deux zones avant d'aller dans le circuit extérieur sous forme d'énergie électrique. Un courant continu se crée. Une couche anti-reflet permet d'éviter que trop de photons se perdent en étant réfléchis par la surface.

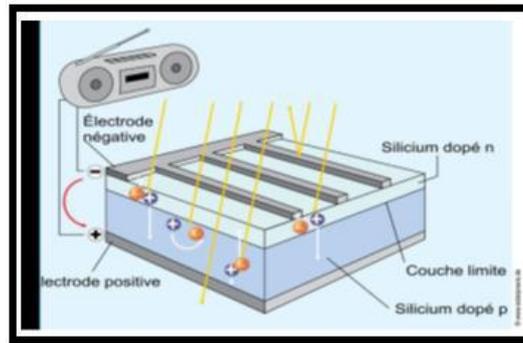


Figure I. 2 Structure d'une cellule photovoltaïque.

I.3.2 Types des cellules photovoltaïques :

Les cellules en Silicium Monocristallin : Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme. Les cellules monocristallines sont les plus commercialisées offrant un bon rendement électrique compris entre 10% et 17%, mais font appel à une méthode de production plus complexe et donc coûteuse.

Les cellules en Silicium Poly cristalline : Fabriqué en cristaux hétérogènes, leur prix est bas en raison de leur faible efficacité dû aux conditions de fabrication rapides et incontrôlées.

Les cellules amorphes : Elles ont un faible rendement, mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans des petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres.

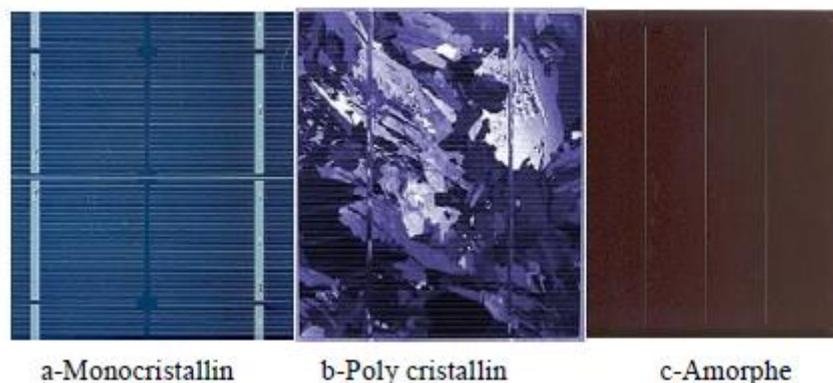


Figure I. 3 Images des différents types de cellule photovoltaïque.

Technologie de cellules	Rendement en Laboratoire	Rendement en production
Silicium amorphe (a-Si)	13 %	5 à 9 %
Silicium poly-cristallin (p-Si)	19.8 %	11 à 15 %
Silicium monocristallin (m-Si)	24.7 %	13 à 17 %

Tableau I. 1 Les différents types des cellules avec leur rendement.

I.3.3 Associations des cellules photovoltaïques

Association en série

Une association de cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule [4].

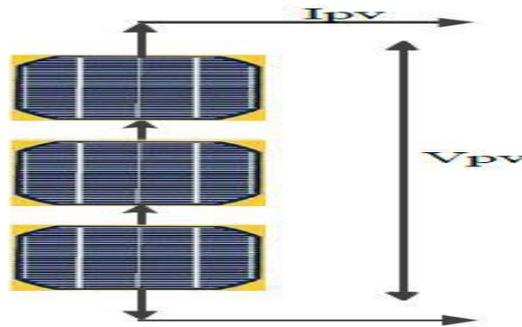


Figure I. 4 Schéma des cellules photovoltaïques connectées en série [5].

Association en parallèle

L'association des cellules photovoltaïques en parallèle permet d'avoir le courant voulu. La tension de la branche est égale à la tension de chaque cellule et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de cellules en parallèle. On trie aussi les cellules de même tension (l'appairage en tension) pour avoir un module robuste.

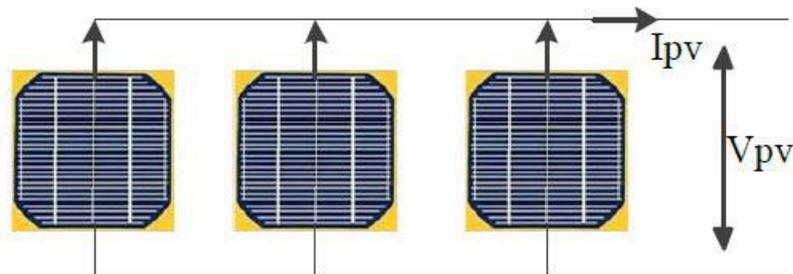


Figure I. 5 Schéma des cellules photovoltaïques connectées en parallèle [5].

I.3.4 Protection d'un module photovoltaïque

Lors de la conception d'une installation photovoltaïque, il faut assurer sa protection électrique afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leurs fonctionnements. Pour cela, deux types de protection sont classiquement utilisés dans les installations photovoltaïques :

- **La diode anti-retour** : elle empêche un courant négatif dans les GPV. Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit.

- **Les diodes by-pass** : elles peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène évitant l'échauffement de la cellule, ce qui est susceptible de la détruire par claquage. Il convient donc de limiter la tension inverse maximale susceptible de se développer aux bornes d'une cellule en plaçant une diode parallèle (by-pass) au niveau de chaque module. La diode parallèle limite la tension inverse par sa tension directe puisqu'elle devient passante [6].

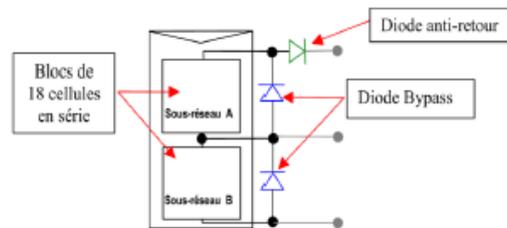


Figure I. 6 Disposition des différentes protections voir : la diode by-pass et anti-retour [7].

I.3.5 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

Avantages :

- Elle est gratuite et non polluante.
- Les systèmes photovoltaïques ne nécessitent que des inspections régulières et des réparations occasionnelles, qui sont extrêmement peu coûteuses par rapport aux systèmes à carburant conventionnels ;
- Les systèmes photovoltaïques sont toujours très fiables même dans des conditions difficiles ;
- Le système photovoltaïque peut fonctionner silencieusement avec un minimum de mouvement mécanique (La pollution sonore est faible).

Inconvénients :

- Chaque installation PV doit être économiquement évaluée et comparée aux alternatives existantes. Actuellement, le coût de construction des systèmes photovoltaïques est relativement élevé ;
- La technologie photovoltaïque est une technologie émergente. Le manque d'informations pertinentes limite le développement de ses marchés et de ses technologies ;
- Le rendement relativement bas des panneaux photovoltaïques.

I.4 Applications des systèmes photovoltaïques

I.4.1 Systèmes autonomes

Une installation photovoltaïque autonome est une installation qui fonctionne indépendamment du réseau électrique ou toutes autres sources d'énergie, l'énergie produite par les panneaux solaires photovoltaïques est utilisée immédiatement (pompage, ventilation) ou stockée dans des batteries pour

une utilisation différée (éclairage,..). Le courant continu produit alimente directement des appareils prévus à cet effet ou est transformé en 230 volts alternatifs [8].

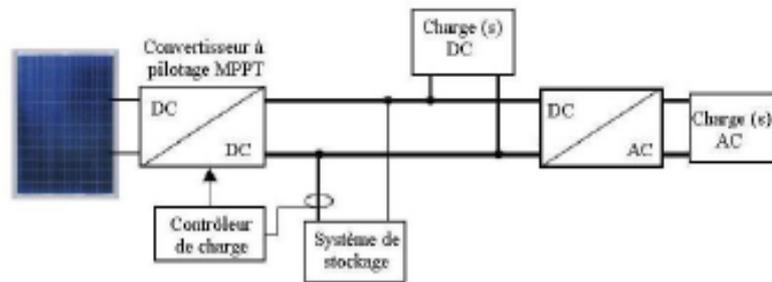


Figure I. 7 Installation photovoltaïque autonome [8].

I.4.2 Systèmes hybrides

Le système hybride de production de l'énergie dans sa vue la plus générale, est celui qui combine et exploite plusieurs sources disponibles facilement mobilisables.

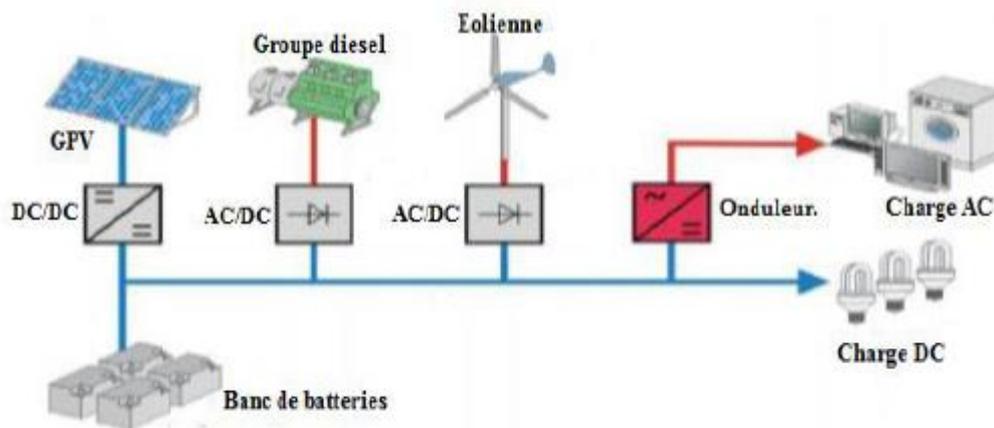


Figure I. 8 Système hybride.

I.4.3 Systèmes couplés au réseau

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. Ces installations se composent de modules photovoltaïques interconnectés, d'un (ou plusieurs) onduleur(s) raccordé au réseau électrique. L'onduleur convertit le courant continu généré par les modules photovoltaïques et produit un courant alternatif conforme au réseau électrique.

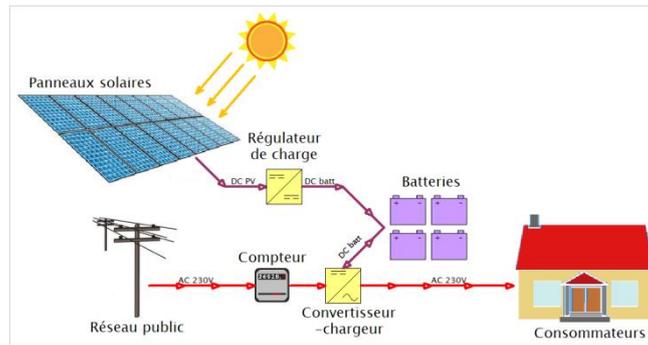


Figure I. 9 Systèmes PV couplés aux réseaux.

Cette connexion au réseau d'un système PV fera l'objet de notre étude dans ce mémoire. Elle comporte beaucoup d'avantages ; on peut citer :

- Aucune énergie électrique n'est perdue ;
- Ne nécessite pas de piles pour stocker l'énergie ;
- L'utilisateur peut consommer de l'électricité en cas de besoin, quelle que soit la quantité d'énergie générée par les panneaux solaires.

I.4.3.1 Topologies des systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique

Il existe différents types de connexion du générateur photovoltaïque au réseaux électrique, on peut citer :

- Connexion via onduleur DC-AC :

On trouve deux types d'onduleurs sur le marché :

- Les onduleurs source de courant (Current-Source Inverter (CSI)), qui sont utilisés pour des applications industrielles de moyenne tension et qui exigent une forme d'onde de la tension de haute qualité.
- Les onduleurs source de tension (Voltage-Source Inverter (VSI)), qui sont les plus répandus vu leurs performances.

L'onduleur PV peut avoir plusieurs topologies comme le montre la Figure I.10:

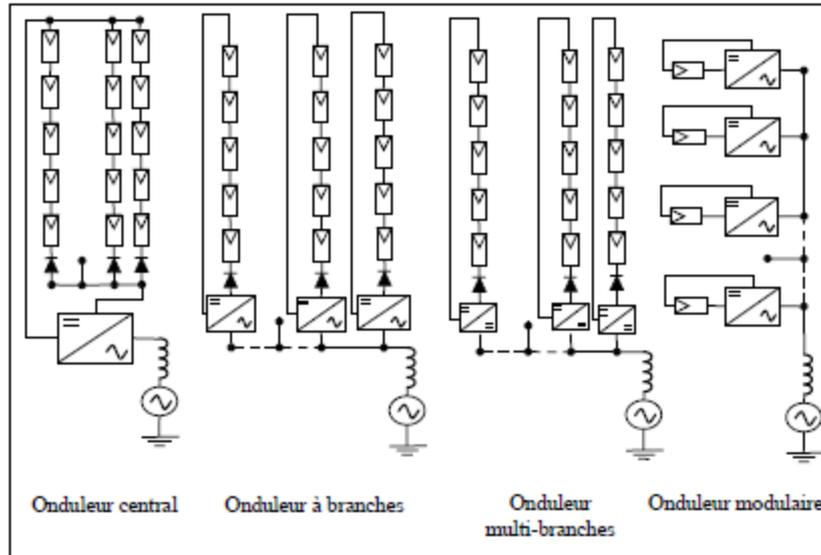


Figure I. 10 Topologies des onduleurs PV.

1. Onduleur intégré (modulaire), utilisé dans le cas des très petites configurations du champ (un module) dont la puissance est de l'ordre de 50-400 W.
2. Onduleurs à branches, utilisés dans des petites configurations de champ de 0.4-2 kW.
3. Onduleurs à multi-branches, destinés aux moyennes configurations de champ de 1.5-6 kW.
4. Onduleur mini-central, utilisé dans les installations dont la puissance dépasse 6 kW avec une topologie triphasée.
5. Onduleur central, de topologie triphasée conçus pour de grands champs PVs de puissance variant de 100 à 1000 kW. [9]

- Connexion via deux étages d'adaptations DC-DC et DC-AC :

Cette configuration fait appel à un convertisseur boost, dont le rôle est de convertir la tension continue du générateur photovoltaïque (tension d'entrée) vers une tension de sortie plus élevée qui sera ensuite convertie en tension sinusoïdale par un onduleur de tension triphasé. Les deux convertisseurs sont reliés par un bus continue comme le montre la figure ci-dessous :

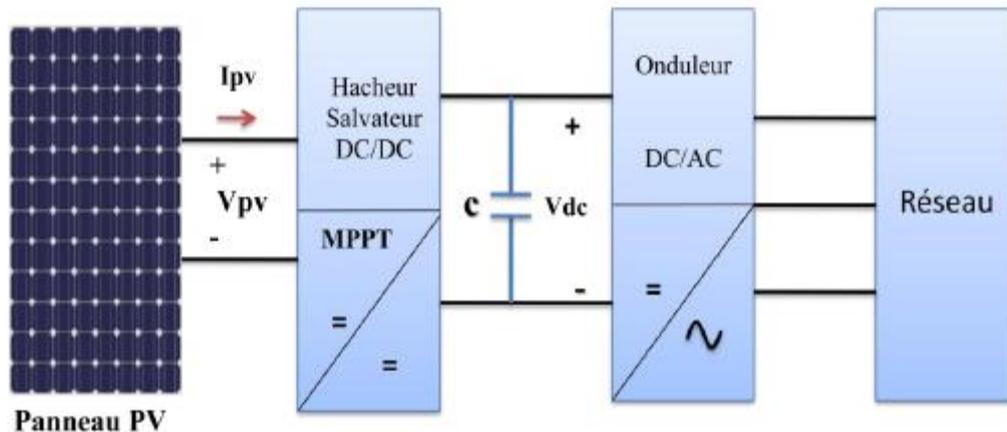


Figure I. 11 Système PV connecté au réseau électrique [10].

I.4.3.2 Classifications des Centrales Photovoltaïques Connectées au Réseau

Une première classification des (CPCR) en fonction de leur taille peut être faite de la manière suivante [11] :

Centrales de grande taille ($P_w \geq 500$ kW)

Ce sont des systèmes centralisés et sont la propriété de compagnies d'électricité. On peut également classer ces systèmes selon qu'ils soient munis de batteries de stockage ou non.

Centrales de taille moyenne ($P_w = 10$ à 100 kW)

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.

Centrales de petite taille ($P_w = 1$ à 10 kW)

Pour des applications sur les toits de maisons individuelles ou d'institutions publiques telles que les écoles, parkings, ... Elles se connectent au réseau basse tension.

I.5 Qualité de l'énergie électrique

La qualité de l'énergie électrique est considérée comme une combinaison de la qualité de la tension et de la qualité du courant.

Dans la pratique, l'énergie électrique distribuée se présente sous la forme d'un ensemble de tensions constituant un système alternatif triphasé, qui possède quatre caractéristiques principales [12] :

- Amplitude.
- Fréquence.
- Forme d'onde et symétrie.

La qualité du courant est relative à une dérive des courants de leur forme idéale, et se caractérise de la même manière que pour les tensions par quatre paramètres : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie.

Dans le cas idéal, les trois courants sont de même amplitude, de fréquence constante et de forme purement sinusoïdale. Le terme « qualité du courant » est rarement utilisé, car la qualité du courant est étroitement liée à la qualité de la tension et la nature des charges. Pour cette raison, « la qualité de l'énergie électrique » est souvent réduite à « la qualité de la tension »[13].

I.6 Perturbations dans les réseaux électriques [14]

La qualité de cette énergie dépend de celle de la tension aux points de raccordement. Toutefois, cette tension subit généralement des altérations durant son transport jusqu'à son arrivée chez le client, industriel ou particulier.

Les perturbations électriques affectant l'un des quatre paramètres cités précédemment peuvent se manifester par :

- Un creux ou une coupure de tension,
- Une fluctuation de tension.
- Un déséquilibre du système triphasé de tension.
- Une variation de la fréquence.
- La présence d'harmoniques et/ou d'inter harmoniques.

I.6.1 Perturbations harmoniques

Les perturbations harmoniques sont dues à l'insertion au réseau des charges non linéaires comme les équipements intégrant de l'électronique de puissance (variateurs, onduleurs, convertisseurs statiques, gradateurs de lumière, etc.). Les harmoniques provoquent des échauffements qui, à terme, diminuent la durée de vie des équipements. Ils peuvent également être à l'origine de troubles fonctionnels (synchronisation, commutation) et d'erreurs de mesure.

I.6.2 Harmoniques et inter harmoniques

- Les harmoniques sont les composantes sinusoïdales d'un signal de fréquences multiples de sa fréquence fondamentale. L'harmonique de fréquence kf_0 , où f_0 est la fréquence fondamentale et k est un nombre réel positif est dit de rang k .

Les principales sources d'harmoniques sont les dispositifs contenant des éléments qui commutent (les convertisseurs statiques), et les dispositifs à caractéristique tension- courant non linéaire (fours à arc, inductances saturées, transformateurs, machines tournantes, etc.)

Les harmoniques provoquent des échauffements qui, à terme, diminuent la durée de vie des équipements. Ils peuvent également être à l'origine de troubles fonctionnels (synchronisation, commutation) et d'erreurs de mesure.

- Inter-harmoniques ont d'ordinaire une amplitude relativement réduite, mais peuvent être gênants s'ils provoquent des résonances. Ils peuvent également avoir des effets très néfastes lorsque leur fréquence se situe dans les plages de fréquence réservées pour les signaux de commande.

I.6.3 Caractérisation des harmoniques [15]

- **Distorsion harmonique totale (THD)**

La distorsion harmonique totale (THD) est un indicateur de la distorsion d'un signal. Il est largement utilisé en génie électrique et dans la gestion des harmoniques en particulier.

Pour un signal Y, le THD est défini comme suit

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{h=H} \left(\frac{Y_h}{Y_1}\right)^2} = \frac{\sqrt{Y_2^2 + Y_3^2 + \dots + Y_H^2}}{Y_1} \tag{I.1}$$

Le THD est le rapport entre la valeur efficace de toutes les composantes harmoniques du signal Y, ramenée à la composante fondamentale Y₁.

H est généralement pris égal à 50, mais peut être limité dans la plupart des cas à 25.

A noter que THD peut être supérieur à 1 et est généralement exprimé en pourcentage.

- **THD en courant ou en tension**

Pour les harmoniques de courant la relation est :

$$THD_i = \sqrt{\sum_{h=2}^{h=H} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} \tag{I.2}$$

En tension :

$$THD_v = \sqrt{\sum_{h=2}^{h=H} \left(\frac{V_h}{V_1}\right)^2} \tag{I.3}$$

Le facteur de crête

Le facteur de crête est le rapport entre la valeur crête du courant ou de la tension (I_M ou U_M) et leurs valeurs efficaces ;

$$F_c = \frac{\hat{i}}{I_{eff}} \tag{I.4}$$

Dans le cas d'un signal sinusoïdal, non déformé, ce dernier correspond à $\sqrt{2}$. Lorsque le courant est déformé, le facteur de crête est supérieur à cette valeur.

Facteur de Puissance

C'est le rapport entre la puissance active "P" et la puissance apparente "S" :

$$F_p = \frac{P}{S} \quad (I.5)$$

➤ La puissance active et réactive :

$$P = 3.V.I. \cos \varphi \quad (I.6)$$

$$Q = 3.V.I. \sin \varphi \quad (I.7)$$

φ est le déphasage entre la tension et le courant.

➤ La puissance apparente :

$$S = V_{eff} \cdot I_{eff} \quad (I.8)$$

$$S = V_{eff} \cdot \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I^2 dt} \quad (I.9)$$

➤ La puissance déformée :

$$D = V_{eff} \sqrt{\sum_{h=2}^H I^2} \quad (I.10)$$

➤ La nouvelle puissance apparente :

$$S' = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (I.11)$$

et le nouveau facteur de puissance sera comme suite:

$$F'_p = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (I.12)$$

I.7 Normes de qualité

Afin de limiter les effets des perturbations harmoniques sur les réseaux électriques, des normes ont été mises en place. Les deux principaux organismes qui ont établi de telles normes sont la Commission Électrotechnique Internationale (CEI). Les normes qu'ils ont établies sont, de façon respective, la série CEI 61000 et l'IEEE Standard 519. De façon générale, ces normes identifient les principales sources de pollution harmonique, décrivent les effets de ces harmoniques sur les réseaux, décrivent des méthodes d'analyse et de mesure pour les harmoniques et fournissent diverses recommandations en vue de réduire la présence d'harmoniques sur les réseaux électriques [16].

	Rang h	BT	MT	THT
Harmoniques impairs non multiples de 3	5	6	5	2
	7	5	4	2
	11	3,5	3	1,5
	13	3	2,5	1,5
	$17 \leq h \leq 49$	$2,27 \frac{17}{h} - 0,27$	$1,9 \frac{17}{h} - 0,2$	$1,2 \frac{17}{h}$
Harmoniques impairs multiples de 3	3	5	4	2
	9	1,5	1,2	1
	15	0,4	0,3	0,3
	21	0,3	0,2	0,2
	$21 \leq h \leq 45$	0,2	0,2	0,2
Harmoniques pairs	2	2	1,8	1,4
	4	1	1	0,8
	6	0,5	0,5	0,4
	8	0,5	0,5	0,4
	$10 \leq h \leq 50$	$0,25 \frac{10}{h} + 0,25$	$0,25 \frac{10}{h} + 0,22$	$0,19 \frac{10}{h} + 0,16$
THD _U		8	6,5	3

Tableau I. 2 Valeurs maximales des taux d'harmoniques acceptables

I.8 Dispositifs de filtrage

Lors de la planification de l'installation de grands composants non linéaires, la décision doit être entre la conception des dispositifs non linéaires pour de faibles niveaux de distorsion de forme d'onde ou l'installation d'équipements de compensation d'harmoniques aux bornes de l'installation.

I.8.1 Filtrage passif

Ce filtrage consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance de valeur très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau. Parmi les dispositifs de filtrage les plus répandus, on distingue le filtre passif résonnant et le filtre passif amorti.

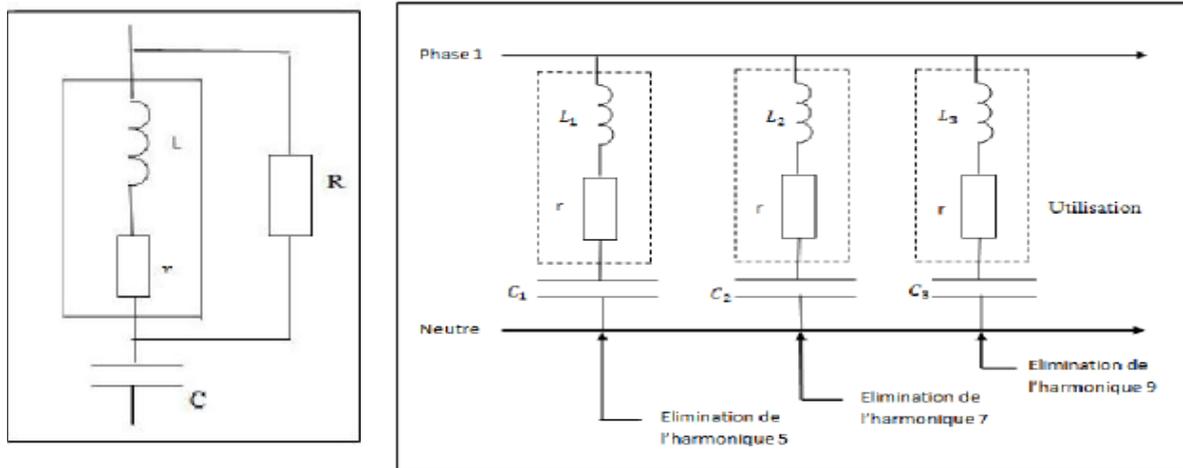


Figure I. 12 Structure d'un filtre amorti et un filtre résonant agissant sur plusieurs rangs harmoniques.

I.8.2 Filtrage actif [17]

L'apparition de nombreux composants semi-conducteurs (les thyristors, et les transistors) a permis d'envisager de nouvelles solutions de compensation des perturbations des réseaux électriques. Un filtre actif est constitué des composants qui sont des sources de tension et de courant qui éliminent les perturbations harmoniques en injectant en série ou en parallèle sur le réseau, des courants, des tensions, ou tous les deux à la fois, en opposition par rapport aux perturbations existantes.

I.8.2.1 Les filtres actifs parallèles (compensation de courant harmonique)

Un filtre actif peut être placé en parallèle avec les charges et son rôle est de compenser les courants harmoniques. Ce filtre injecte des courants qui s'opposent aux courants harmoniques (il élimine les courants harmoniques qui circulent dans les impédances du réseau), donc le courant à côté réseau est sinusoïdal.

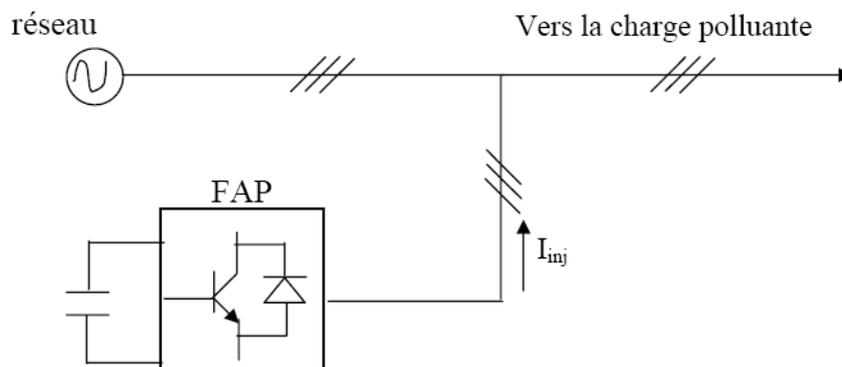


Figure I. 13 Configuration d'un filtre actif parallèle.

1.8.2.2 Les filtres actifs séries (compensation de tension harmonique)

Le filtre actif série se comporte, dans ce cas, comme le montre la figure (), comme une source de tension qui s’oppose aux tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmonique) venant de la source et également à celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l’impédance du réseau. Ainsi, la tension aux bornes de la charge à protéger est purement sinusoïdale.

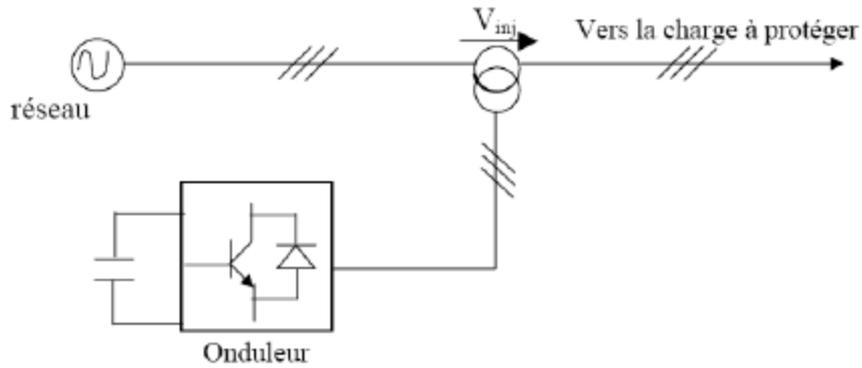


Figure I. 14 Filtre actif série.

Pour assurer un courant et une tension sinusoïdaux du réseau électrique à partir d’une tension et d’un courant perturbé, on peut profiter des avantages de deux filtres actifs (série, parallèle) en faisant associer ces deux derniers, comme le montre le schéma suivant :

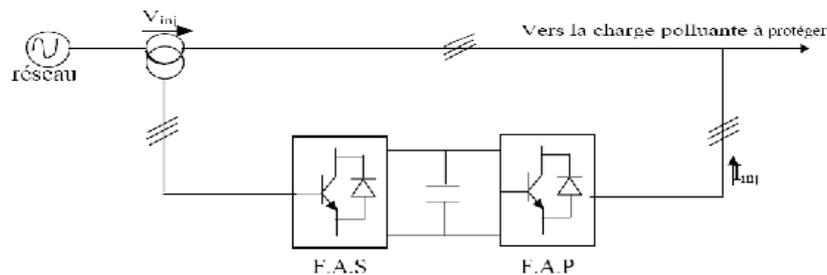


Figure I. 15 Association des filtres actifs série et parallèle.

1.8.2.3 Les filtrages hybrides

Le filtrage hybride ou mixte constitue l’association d’un filtre passif et d’un filtre actif, l’objectif des filtres mixtes est que le filtre passif prend en charge la compensation d’une grande partie des harmoniques. Par contre, le filtre actif maintient les performances de filtrage en fonction de l’évolution de la charge et du réseau.

- Filtre actif parallèle avec Filtre passif parallèle.
- Filtre actif série avec filtre passif parallèle.
- Filtre actif série en série avec filtre passif parallèle.

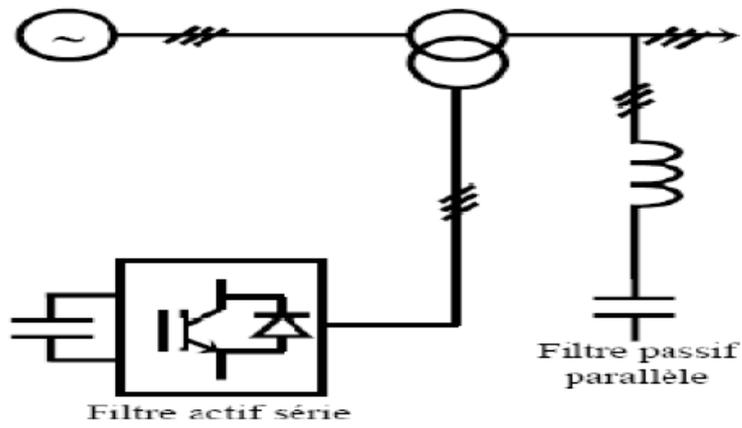


Figure I. 16 Filtre actif série avec filtre passif parallèle.

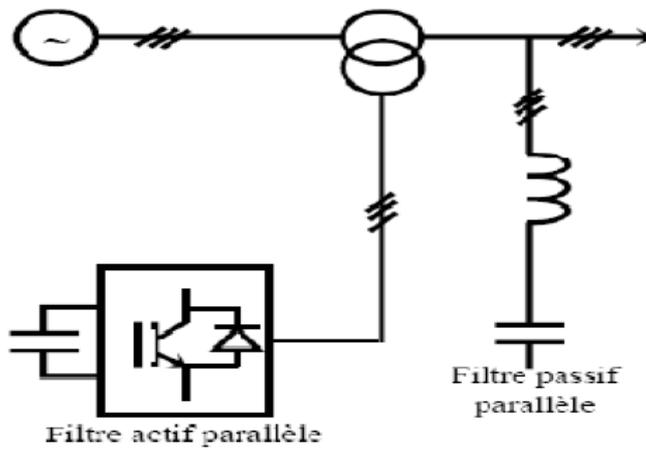


Figure I. 17 Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.

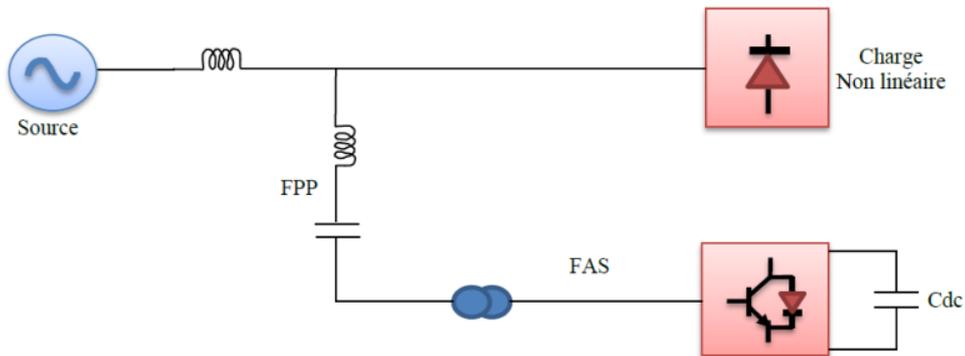


Figure I. 18 Filtre actif série en série avec un filtre passif parallèle.

I.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques généralités sur les panneaux photovoltaïques et leurs caractéristiques. Nous avons aussi présenté différents types de connexions des systèmes photovoltaïques au réseau électrique. La qualité de l'énergie électrique injectée au réseau requiert une importance capitale dans le projet de tels systèmes, une partie de ce chapitre a été consacré pour présenter quelques concepts qui y sont liés notamment les harmoniques et les voies et moyens permettant de les éliminer.

CHAPITRE II

Modélisation du système PV connecté au réseau

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, on va étudier et modéliser tous les éléments du système photovoltaïque connecté au réseau, et pour réaliser cette étude on doit passer par un ensemble d'équations caractérisant le fonctionnement de tous les éléments de notre système. Un modèle photovoltaïque sera aussi choisi et simulé pour plusieurs températures et divers ensoleillements.

Ensuite, on présentera les différents éléments qui composent le système photovoltaïque connecté au réseau qui sont le générateur photovoltaïque, le hacheur élévateur (boost) avec sa commande MPPT, l'onduleur, le filtre RL et une charge non linéaire de type redresseur à diodes.

II.2 Modélisation du générateur photovoltaïque

Il existe plusieurs types de générateurs photovoltaïques, chaque type diffère de l'autre par la structure et les paramètres qui permettent de calculer la tension et le courant du générateur photovoltaïque.

II.2.1 Modèle idéal

Le circuit équivalent simplifié d'une cellule solaire se compose d'une diode et d'une source de courant montées en parallèle. La source du courant produit le courant qui est directement proportionnel à l'éclairement solaire G .

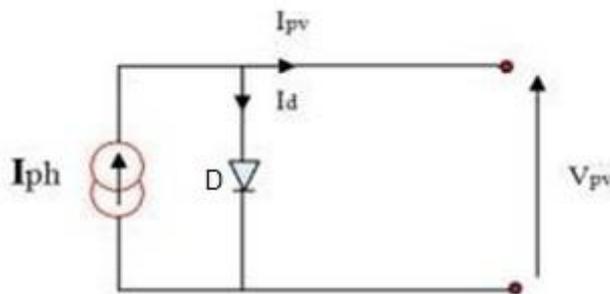


Figure II. 1 Modèle électrique idéal d'un module photovoltaïque.

L'équation de ce modèle est la suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (\text{II.1})$$

On a le générateur PV idéal :

$$V_{pv} = V_D \quad (\text{II.2})$$

La diode est un élément non linéaire, sa caractéristique I-V se met sous la forme mathématique suivante :

$$I_d = I_s \left[e^{\frac{q.V_{pv}}{A.K.T}} - 1 \right] \tag{II.3}$$

I_s : courant de saturation de la diode

K : Constant de Boltzmann, sa valeur est $K=1.3806503 \times 10^{-23}$ J/K

T : Température en Kelvin.

q : Charge de l'électron, qui égale à 1.6×10^{-19} C.

Le courant débité peut alors être calculée comme indiqué dans l'équation suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d = I_{ph} - I_s \left[e^{\frac{q.V_{pv}}{A.K.T}} - 1 \right] \tag{II.4}$$

II.2.2 Modèle à une diode avec résistance shunt

Le circuit équivalent de ce modèle prend en considération l'effet résistif du générateur. Le circuit se compose d'une source de courant (I_{ph}) et une diode (D). Les pertes sont modélisées par deux résistances ; une résistance shunt (R_{sh} avec une résistance série (R_s).

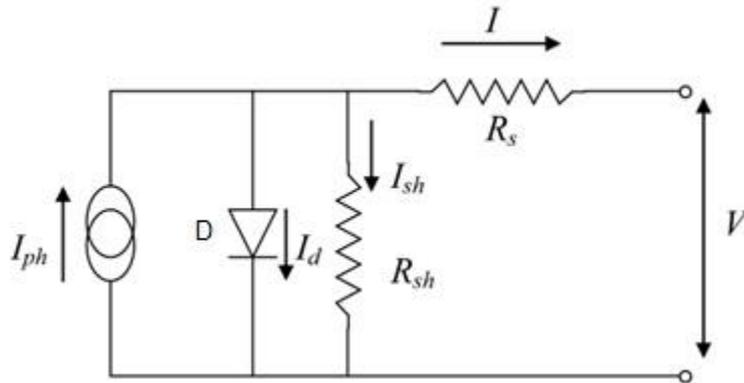


Figure II. 2 Modèle électrique à une diode avec résistance shunt.

Le courant à la sortie du panneau photovoltaïque est donné par la relation suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \tag{II.5}$$

I_{pv} : Le courant généré par le panneau photovoltaïque ;

I_{ph} : Photo-courant ;

I_d : Le courant dans la diode ;

I_{sh} : Le courant dans la résistance shunt.

II.2.3 Modèle à une diode

C'est le modèle électrique empirique le plus simple et le plus proche du générateur photovoltaïque. Il est utilisé vu la qualité des résultats obtenus. C'est le modèle à une diode, sans résistance shunt.

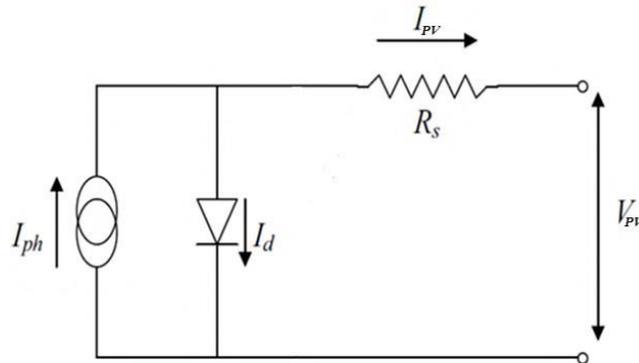


Figure II. 3 Modèle à une diode sans résistance shunt.

Les paramètres de ce modèle dépendent de la variation de la tension et de courant du panneau photovoltaïque par rapport aux conditions climatiques.

Le courant généré par le générateur photovoltaïque est donné comme suit :

$$I_{pv} = I_{cc} \{ 1 - K_1 [e^{K_2 V_{pv}^m} - 1] \} \tag{II.6}$$

Avec :

$$K_1 = 0.01175 \tag{II.7}$$

$$K_2 = \frac{K_4}{V_{co}^m} \tag{II.8}$$

$$K_3 = \ln \left(\frac{I_{cc}(1+K_1) - I_{ppm}}{K_1 I_{cc}} \right) \tag{II.9}$$

$$K_4 = \ln \left[\frac{1+K_1}{K_1} \right] \tag{II.10}$$

$$m = \frac{\ln \left(\frac{K_3}{K_4} \right)}{\ln \left(\frac{V_{ppm}}{V_{co}} \right)} \tag{II.11}$$

Avec :

I_{ppm} : courant au point de puissance maximale.

V_{ppm} : Tension au point de puissance maximale.

I_{cc} : courant de court-circuit.

V_{co} tension de circuit ouvert.

Remarque

L'équation (II.6) s'applique uniquement si pour un niveau d'ensoleillement G et de température T particulière ($G=1000 \text{ W/m}^2$, $T=25 \text{ °C}$), relatif aux conditions standards de fonctionnement. Lorsque la température et l'ensoleillement varient, on utilise les équations suivantes :

$$\Delta T_c = T_c + T_{stc} \tag{II.12}$$

$$\Delta V_{pv} = \alpha_{cc} \left(\frac{G}{G_{stc}} \right) \Delta T_c + \left(\frac{G}{G_{stc}} - 1 \right) I_{cc, stc} \tag{II.13}$$

$$\Delta V_{pv} = -\beta_{co} \Delta T_c - R_s \Delta I_{pv} \tag{II.14}$$

Avec :

G_{stc} et G : représentent respectivement, le niveau d'insolation dans les conditions standards de fonctionnement et dans des conditions quelconques ;

ΔG : Représente la variation de l'insolation ;

T_{stc} et T_c : Représentent respectivement, la température dans les conditions standards de fonctionnement et dans des conditions quelconques ;

ΔT_c : représente la variation de la température ;

ΔI_{pv} : représente la variation du courant par rapport à l'insolation et à la température ;

ΔV_{pv} : représente la variation de la tension par rapport à l'insolation et à la température.

α_{cc} : représente un coefficient d'incrémentation du courant I_{sc} quand la température de la surface augmente d'un degré Celsius ($A/°C$) (sous les conditions standard de fonctionnement).

β_{co} : Représente un coefficient d'incrémentation de la tension V_{co} quand la température de la surface augmente d'un degré Celsius ($V/°C$) (sous les conditions standard de fonctionnement).

On obtient donc les nouvelles expressions du courant et de la tension du générateur photovoltaïque qui sont données par :

$$I_{nouv} = I_{pv} + \Delta V_{pv} \tag{II.14}$$

$$V_{nouv} = V_{pv} + \Delta V_{pv} \tag{II.15}$$

Pour notre système, nous avons opté pour un modèle à cinq paramètres : ($V_{co}, I_{cc}, V_{opt}, I_{opt}, R_s$)

Les fabricants des panneaux photovoltaïques fournissent ces cinq derniers paramètres (pour un ensoleillement de 1000 W/m^2 et une température de 25 °C). Le panneau photovoltaïque choisi pour

notre simulation est de type SIEMENS SM 110-24, les paramètres de ce dernier sont indiqués dans le tableau (II.1).

Paramètres	Valeurs
Puissance maximale du panneau (P_{opt})	110 W
Courant au point de puissance maximale (I_{opt})	3.15 A
Tension au point de puissance maximale (V_{opt})	35 V
Courant de court-circuit (I_{cc})	3.45 A
Tension en circuit ouvert (V_{co})	43.5 V
Coefficient d'incrémentatation du courant (α_{cc})	1.4 mA /°C
Coefficient d'incrémentatation de la tension (β_{co})	-152Mv/°C

Tableau II. 1 Paramètres du panneau photovoltaïque SIEMENS SM 110-24[18].

II.3 Simulation du panneau photovoltaïque SIEMENS SM 110-24

En utilisant le programme Matlab/Simulink, on a réalisé et simulé le schéma bloc du panneau photovoltaïque pour différentes valeurs de température et éclairement et cela nous a permis de tracer les caractéristiques I_{pv} - V_{pv} et P_{pv} - I_{pv} .

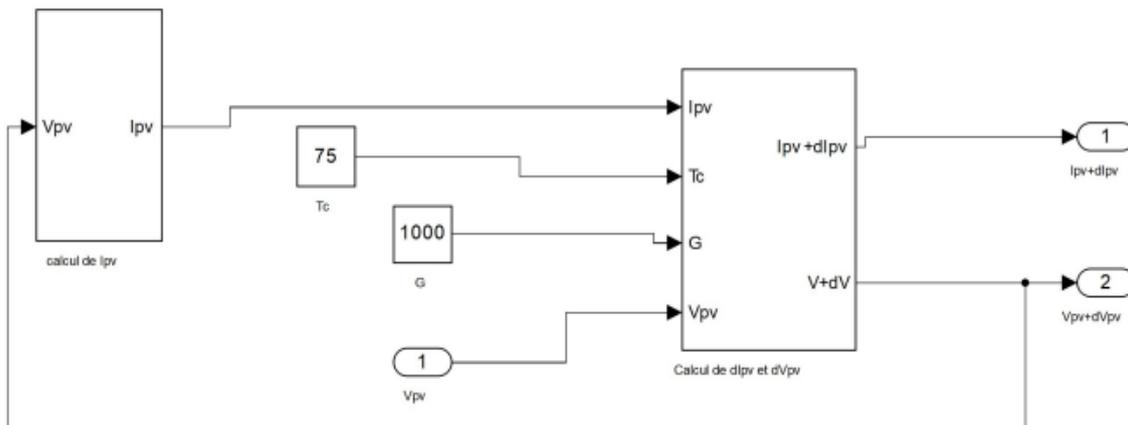


Figure II. 4 Schéma bloc d'une cellule photovoltaïque sous Matlab/Simulink.

II.3.1 Caractéristique (I_{pv} - V_{pv})(et (P_{pv} - V_{pv}) du panneau PV dans les conditions (STC)

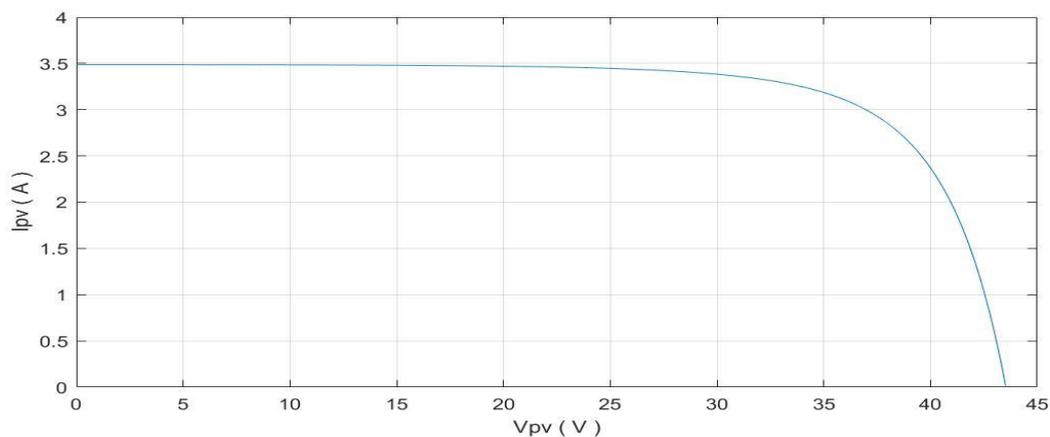


Figure II. 5 Caractéristique I_{pv} - V_{pv} d'un panneau PV dans les conditions STC.

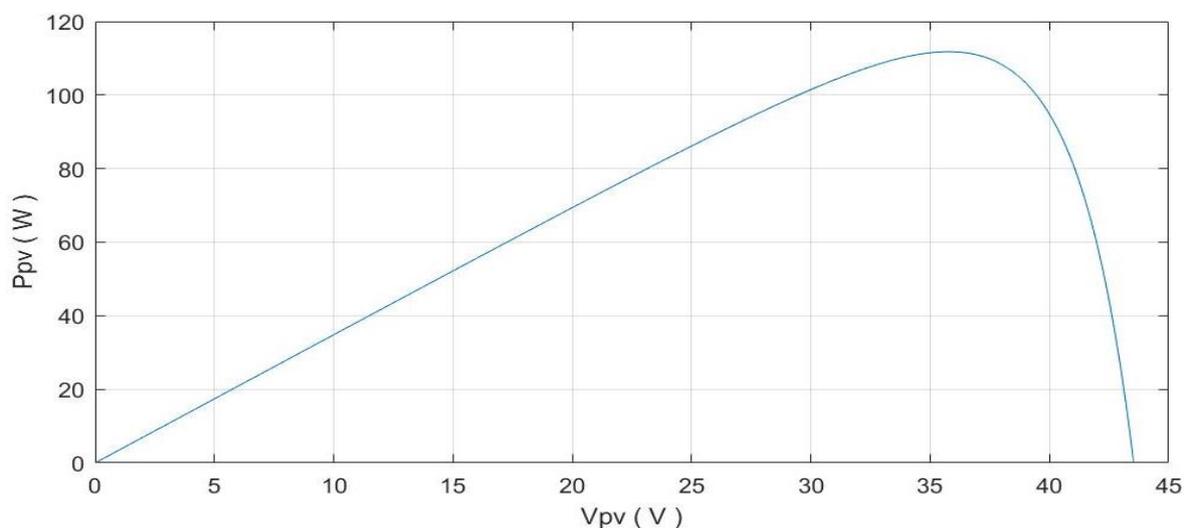


Figure II. 6 Caractéristique P_{pv} - V_{pv} d'un panneau PV dans les conditions STC.

II.3.2 Effet de l'éclairement et de la température

Les caractéristiques d'un panneau photovoltaïque dépendent de la variation de l'éclairement et de la température

II.3.3 Effet de l'éclairement

La température a été fixée à $T=25^{\circ}\text{C}$ et, pour différents éclairements, nous avons tracé les caractéristiques P_{pv} - I_{pv} et I_{pv} - V_{pv} comme montré sur les figures (II.7) et (II.8) :

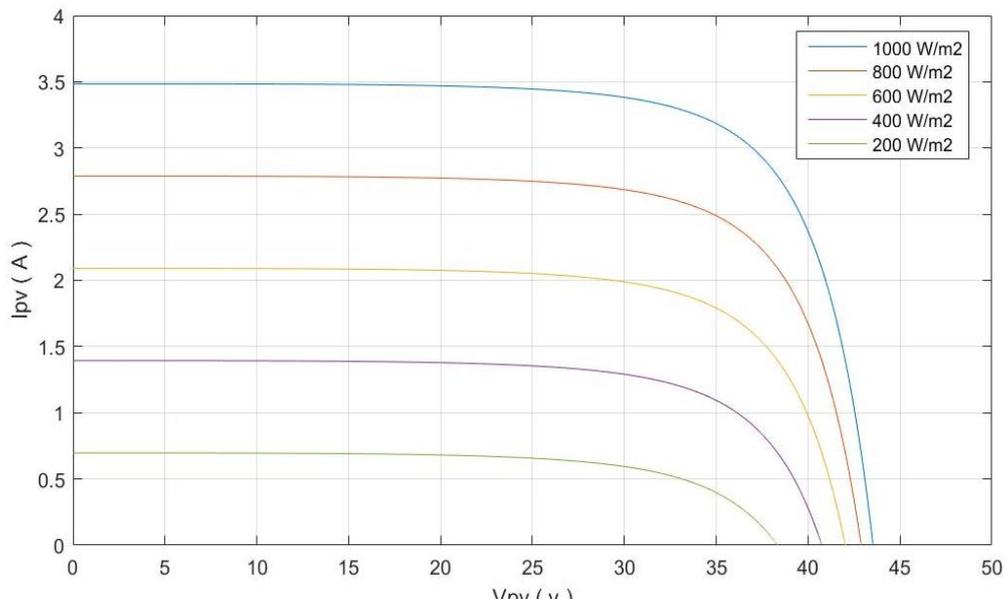


Figure II. 7 Effet de l’ensoleillement sur la caractéristique $I_{pv} - V_{pv}$.

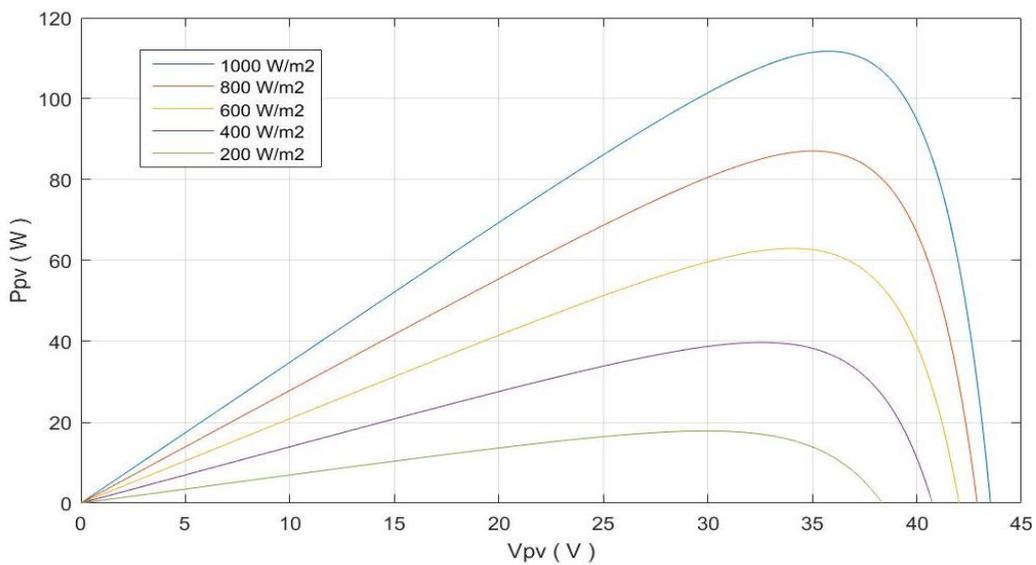


Figure II. 8 Effet de l’ensoleillement sur la caractéristique $P_{pv} - V_{pv}$.

Les figures (II.7) et (II.8) montrent la variation du courant dans le module photovoltaïque et la puissance en fonction de la tension. Au fur et à mesure que l’éclairement augmente, il fait augmenter le courant, par contre la tension varie très peu (Fig. II.7). L’éclairement influence sur la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque comme illustré par la figure II.8.

II.3.4 Effet de la température

Nous avons fixé l'éclairement à $G=1000\text{W/m}^2$ et nous avons tracé pour différentes températures les caractéristiques $P_{pv}-I_{pv}$ et $I_{pv}-V_{pv}$ comme le montre les figures (II.9) et (II.10) :

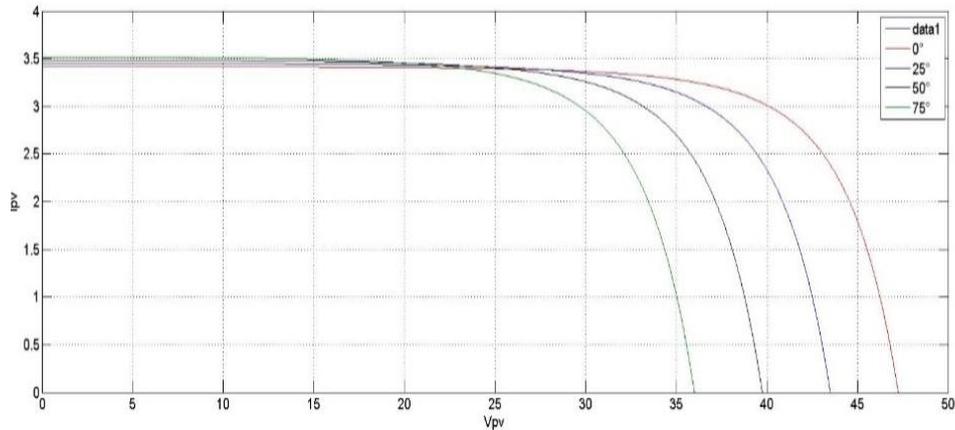


Figure II. 9 Effet de la température sur la caractéristique $I_{pv} - V_{pv}$.

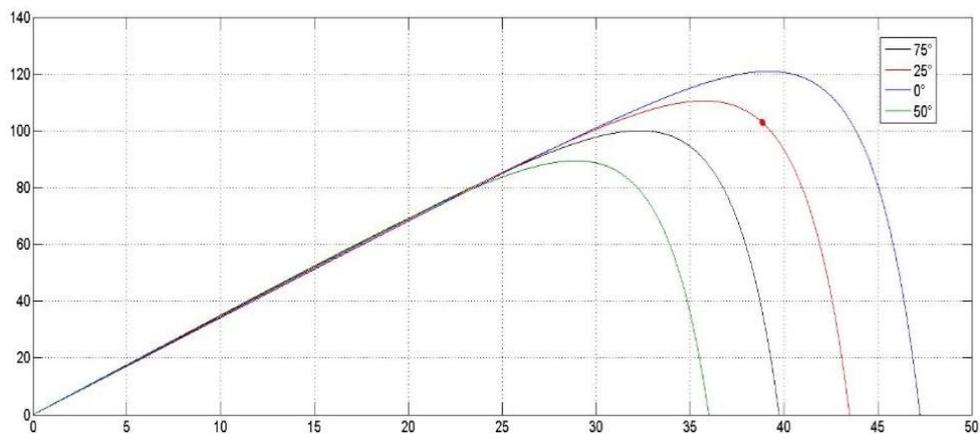


Figure II. 10 Effet de la température sur la caractéristique $P_{pv} - V_{pv}$.

A partir des figures (II. 9) et (II. 10) nous constatons que les tensions baissent et le point de puissance maximale aussi quand on augmente la température, quant au courant, il prend une légère augmentation.

II.4 Les convertisseurs DC-DC (Hacheurs)

Les hacheurs sont des convertisseurs d'énergie qui font transiter l'énergie électrique d'une source continue vers une autre source continue. Si la tension à l'entrée du convertisseur est supérieure à celle en sortie on dit que c'est un hacheur abaisseur (Buck), dans le cas contraire on dit que c'est un hacheur élévateur (Boost) [19].

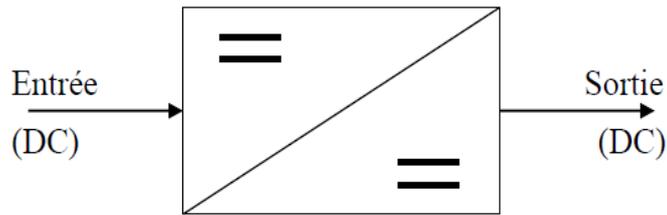


Figure II. 11 Symbole d'un convertisseur DC-DC.

Dans notre travail on va utiliser un hacheur boost.

II.4.1 Modélisation de le hacheur élévateur (Boost)

Un convertisseur Boost, ou hacheur parallèle, est une alimentation à découpage qui convertit une tension d'entrée continue en une tension de sortie plus enlevé. Son schéma équivalent est montré sur la figure II.12.

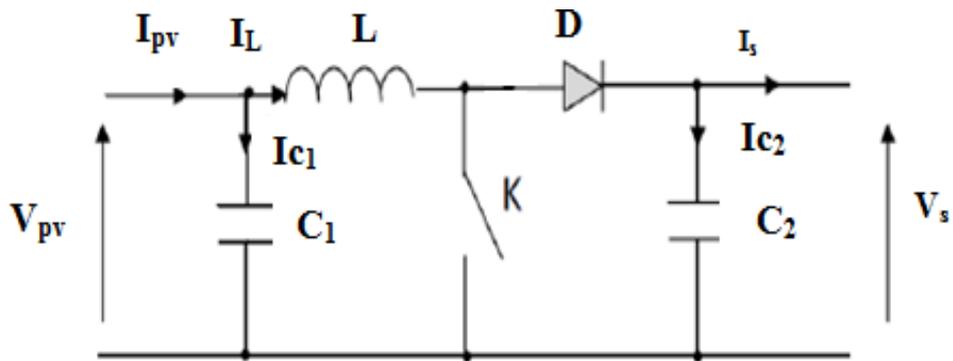


Figure II. 12 Schéma équivalent d'un hacheur survolteur.

Le fonctionnement de ce convertisseur est divisé en deux phases selon l'état de l'interrupteur K.

Phase 1 : ($0 < t < \alpha T$) : L'interrupteur K est fermé, on aura donc le schéma suivant :

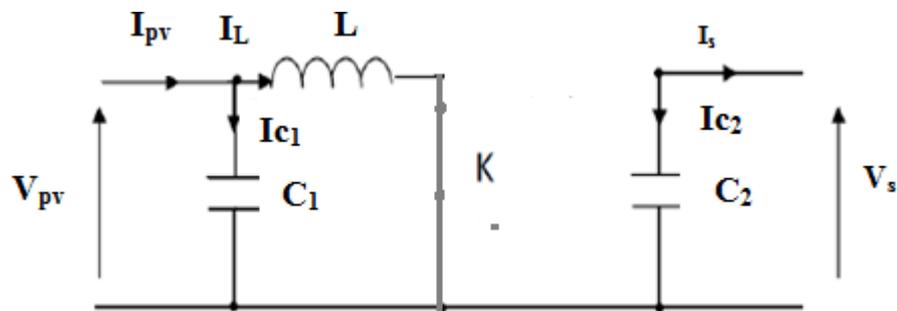


Figure II. 13 Schéma équivalent du hacher boost avec K fermé.

En appliquant la loi de Kirchhoff au circuit, on aura les équations suivantes :

$$I_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_{pv}(t)}{dt} = I_{pv}(t) - I_L(t) \tag{II.16}$$

$$I_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_s(t)}{dt} = -I_s(t) \tag{II.17}$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_{pv}(t) \tag{II.18}$$

Phase 2 : ($\alpha T < t < T$) : L'interrupteur K est ouvert, le circuit aura la forme suivante :

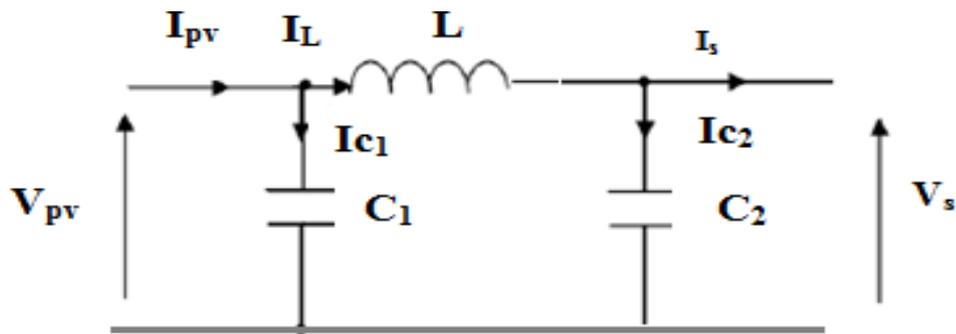


Figure II. 14 Schéma équivalent du hacheur boost avec K ouvert.

En appliquant la loi de Kirchhoff au circuit on aura les équations suivantes :

$$I_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_{pv}(t)}{dt} = I_{pv}(t) - I_L(t) \tag{II.19}$$

$$I_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_s(t)}{dt} = I_L(t) - I_s(t) \tag{II.20}$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_{pv}(t) - V_s(t) \tag{II.21}$$

II.5 Modélisation du bus continu

Le couplage entre le générateur photovoltaïque et l'onduleur est fait par l'intermédiaire d'un bus continu qui consiste en une capacité de couplage C.

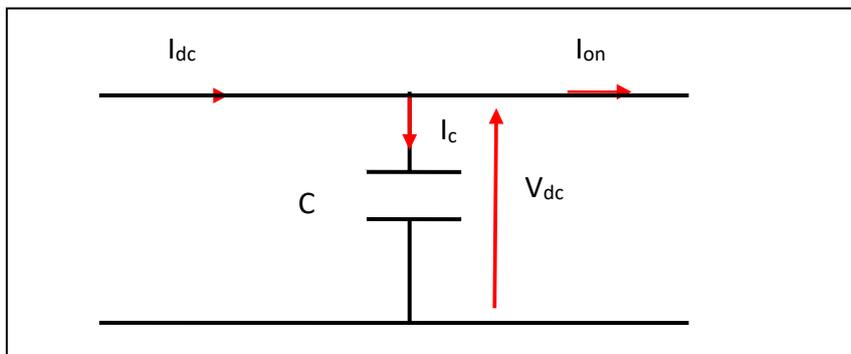


Figure II. 15 Schéma équivalent d'un bus continu.

En exploitant la figure (II.15) on peut écrire les équations suivantes :

$$I_c = I_{dc} - I_{on} \quad (\text{II.22})$$

La tension V_{dc} en fonction de I_c :

$$I_c = C \frac{dV_{dc}}{dt} \quad (\text{II.23})$$

Avec :

C : la capacité du condensateur.

II.6 Description de la commande MPPT

II.6.1 Introduction

De nombreuses techniques de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) ont été réalisées pour permettre au système d'atteindre le maximum de puissance du générateur photovoltaïque.

Pour notre simulation, on va utiliser l'algorithme de perturbation et observation (P&O).

II.6.2 Méthode de perturbation et observation (P&O)

Si on veut atteindre le point de puissance maximale en s'affranchissant de la connaissance des paramètres qui modifient sa position, on doit recourir aux techniques d'asservissement, en utilisant la plus rapide, celle de la perturbation et de l'observation (P&O). C'est l'algorithme de poursuite du point de puissance maximale (PPM) le plus utilisé du fait de sa simplicité, cet algorithme est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de la tension de référence (V_{ref}), ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur (DC-DC), puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie en vue d'une éventuelle correction de ce rapport cyclique. Si la valeur de la puissance actuelle $P(n)$ du générateur est supérieure à la valeur précédente $P(n-1)$, alors on garde la même direction de perturbation précédente sinon on inverse la perturbation du cycle précédent [20].

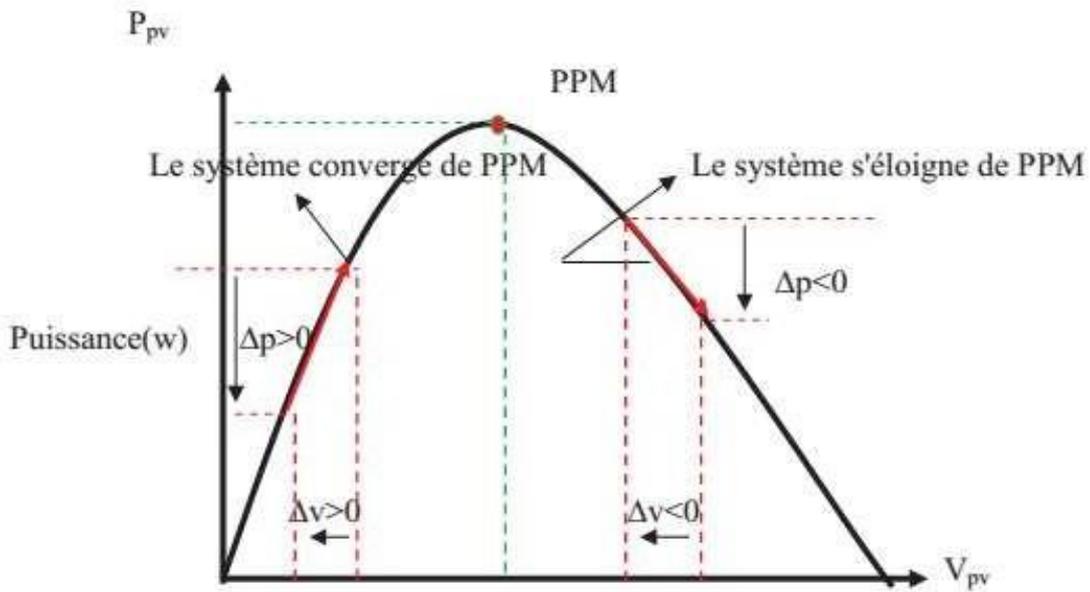


Figure II. 16 Schéma de convergence vers le PPM par P&O.

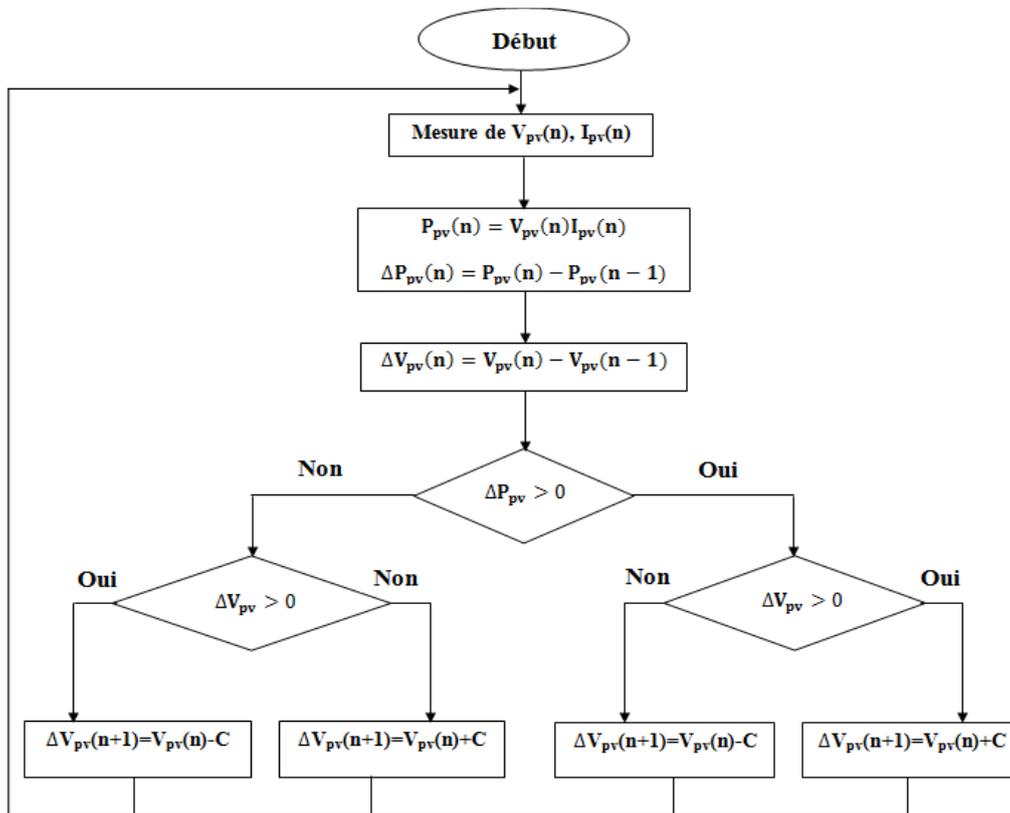


Figure II. 17 Organigramme de la méthode Perturbation et Observation.

II.6.3 Modélisation de l'onduleur triphasé à 2 niveaux

Un onduleur est un dispositif d'électronique de puissance permettant de délivrer des tensions et des courants alternatifs à partir d'une source d'énergie électrique continue. C'est la fonction inverse d'un redresseur.

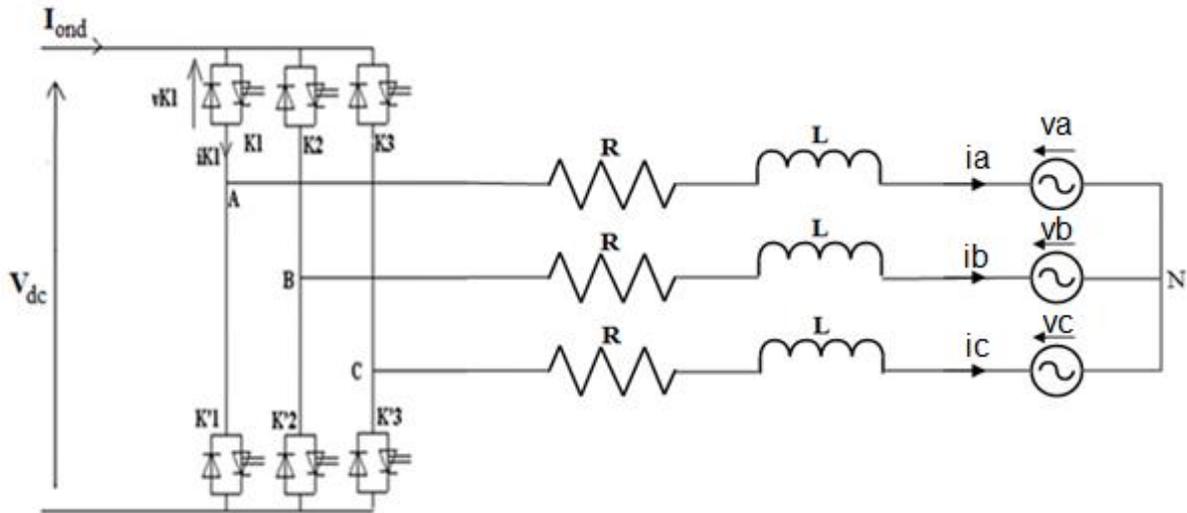


Figure II. 18 Circuit de l'onduleur relié au réseau électrique.

S_i est l'état de l'interrupteur K_i tel que $\begin{cases} S_i = 1 \text{ si } K_i \text{ fermé} \\ S_i = 0 \text{ si } K_i \text{ ouvert} \end{cases}$

Les tensions simples s'expriment en fonction des signaux S_i et de la tension du bus continu V_{dc} par :

$$v_a = \frac{V_{dc}}{3} \cdot (2 \cdot S_a - S_b - S_c) \tag{II.24}$$

$$v_b = \frac{V_{dc}}{3} \cdot (2 \cdot S_b - S_a - S_c) \tag{II.25}$$

$$v_c = \frac{V_{dc}}{3} \cdot (2 \cdot S_c - S_a - S_b) \tag{II.26}$$

Les équations précédentes peuvent s'écrire sous la forme matricielle suivant :0

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \tag{II.27}$$

Le courant modulé par l'onduleur est donné par l'équation suivante :

$$I_{ond} = C \frac{dV_{dc}}{dt} = S_a \cdot i_a + S_b \cdot i_b + S_c \cdot i_c \tag{II.28}$$

Tel que :

I_{ond} : Courant de l'onduleur.

S_a, S_b et S_c : Les fonctions logiques correspondantes à l'état des interrupteurs de l'onduleur.

V_{dc} : Tension du bus continue.

i_a, i_b et i_c : Les courants de sortie de l'onduleur.

II.6.4 Modélisation du réseau électrique

Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures énergétiques plus ou moins disponibles permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production vers les consommateurs d'électricité [23].

Le réseau électrique utilisé dans notre système est caractérisé par les équations suivantes :

$$e_a = E_M \sin(\omega t) \quad (\text{II.29})$$

$$e_b = E_M \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (\text{II.30})$$

$$e_c = E_M \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (\text{II.31})$$

Avec :

$$E_M = \sqrt{2} \cdot E_{eff} \quad (\text{II.32})$$

Tel que :

E_M : Valeur maximale de la tension. et E_{eff} : Valeur efficace de la tension.

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté la modélisation des éléments qui composent le système photovoltaïque connecté au réseau ainsi que la commande MPPT, et on a aussi simulé le fonctionnement de notre panneau photovoltaïque pour différents éclairagements et températures ou on a vu l'influence de ces deux paramètres.

Chapitre III

Commande, simulation et amélioration du système

III.1 Introduction

Dans les chapitres précédents, on a étudié les différents éléments du système photovoltaïque et on a expliqué leurs principes de fonctionnement et présenté leurs modélisations.

Dans ce chapitre, on présentera la commande adoptée et on étudiera le système global et ses performances en exploitant les résultats de la simulation avec le logiciel Matlab/Simulink.

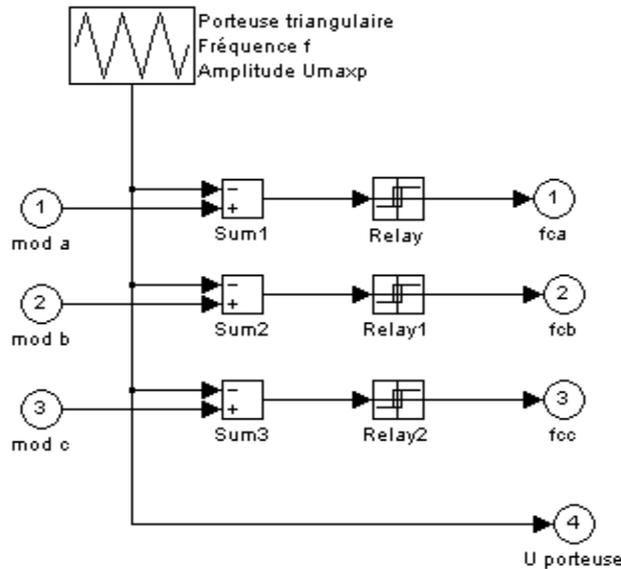


Figure III. 1 Schéma de principe de la technique MLI

III.2 La modulation sinus-triangle (MLI sinusoïdale)

Le principe de cette stratégie de commande, est de comparer le signal de référence ou modulante V_{ref} de forme sinusoïdale d'amplitude variable et de fréquence f_{ref} appelée référence, avec le signal de la porteuse de forme triangulaire. L'intersection de ces deux signaux donne les instants de commutation des interrupteurs.

III.3 Boucle de régulation du bus continu

La source d'énergie associée à l'onduleur est un condensateur. Pour que l'injection d'un courant de référence dans chacune des phases soit possible, la tension aux bornes de ce condensateur doit être constante et fixée à une valeur prédéterminée afin d'assurer le rôle d'une source de tension continue.

La figure montre le schéma de la régulation de bus continu.

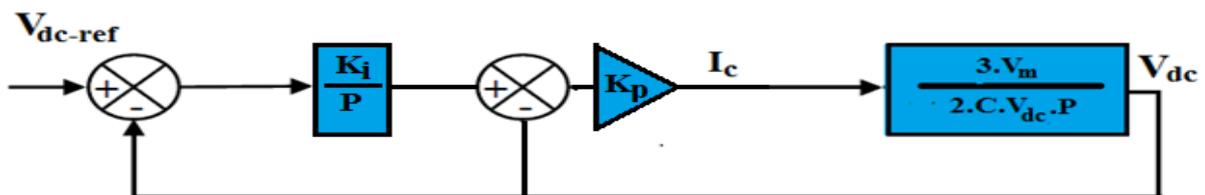


Figure III. 2 Régulation du bus-continue.

On pose :

$$K = \frac{2V_{dc}}{3V_m} \tag{III.1}$$

La fonction de transfert du système en boucle fermé s'écrit :

$$H(p) = \frac{K_p \cdot K_i / K}{p^2 + (K_p/k) \cdot p + (K_i \cdot K_p/k)} \tag{III.2}$$

Cette fonction de transfert représente un système de deuxième ordre. Sa forme canonique s'écrit :

$$H_p = \frac{K \cdot \omega_n^2}{p^2 + 2 \cdot \varepsilon \cdot \omega_n \cdot p + \omega_n^2} \tag{III.3}$$

Par identification on obtient :

$$\begin{cases} K_p = 2 \cdot k \cdot \omega_0 \cdot k \\ K_i = \frac{\omega_0}{2} \cdot \varepsilon \end{cases} \tag{III.4}$$

III.4 Simulation avec la commande MLI deux niveaux

Le système est composé d'un générateur photovoltaïque (dix panneaux de type SIEMENS SM 110 de puissance maximale $P_{PPM} = 1100W$) connecté au réseau via les deux convertisseurs (C-C) et (C-A) et le filtre de liaison (R_s, L_s). Le réseau est considéré comme une charge RLE.

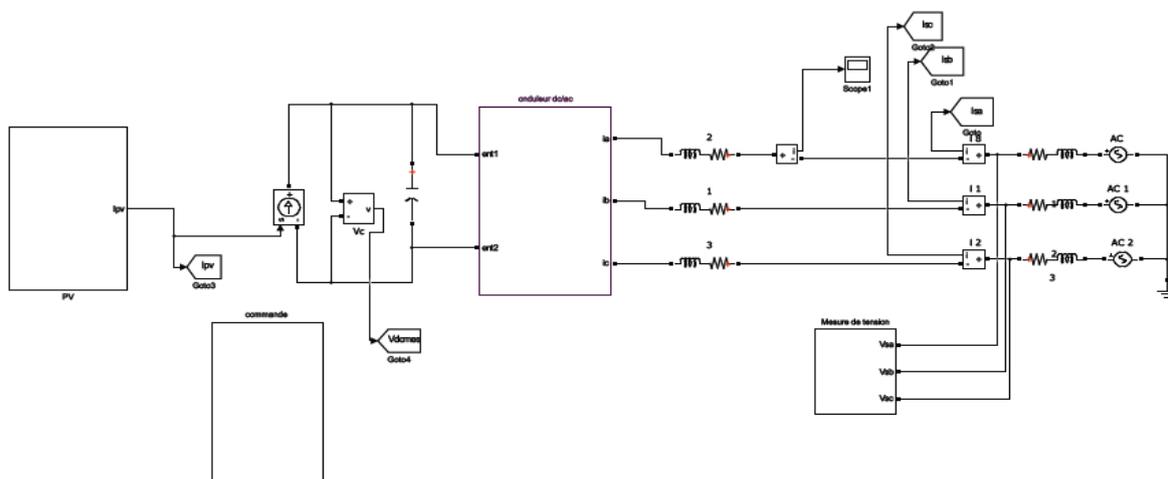


Figure III. 3 Schéma de simulation global d'un système photovoltaïque connecté au réseau.

La simulation a été réalisée en exploitant les modules SimPowerSystems et Simulink de Matlab, et en les paramétrant avec les mêmes valeurs caractérisant les composants réels. Le tableau III.1 résume les paramètres de la simulation :

Systeme	Désignations	Valeurs
Source d'alimentation	La tension efficace	$V_S = 87 \text{ V}$
	le courant	$I_m = 8 \text{ A}$
	La fréquence	$F = 50 \text{ Hz}$
	Le filtre R-L coté réseau	$R_S = 0.1 \Omega$ $L_S = 1 \text{ mH}$
F.A.P	Le filtre R-L associe au convertisseur	$R_f = 0.01 \Omega$ $L_f = 5 \text{ e}^{-3} \text{ H}$
	La capacité du bus continu	$C = 1100 \mu\text{F}$
	La tension de référence du bus continu	$V_{dc-ref} = 212 \text{ V}$

Tableau III. 1 les paramètres de simulation

III.4.1 Résultats de simulation pour un onduleur MLI deux niveaux

Pour étudier la réponse du système, on applique un ensoleillement constant et une température fixe de 25°.

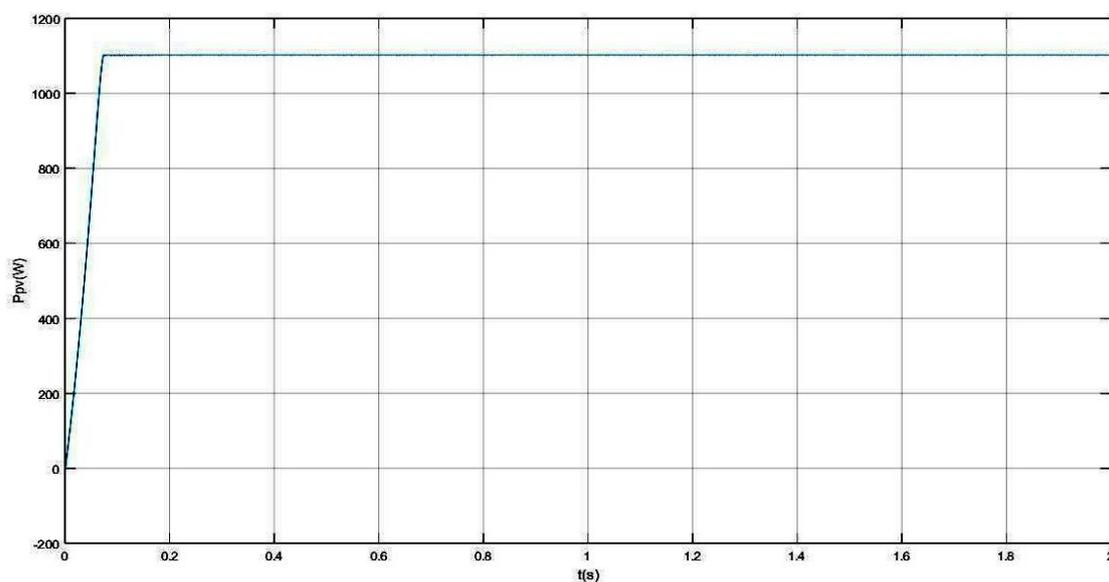


Figure III. 4 Allure de la puissance en sortie du GPV

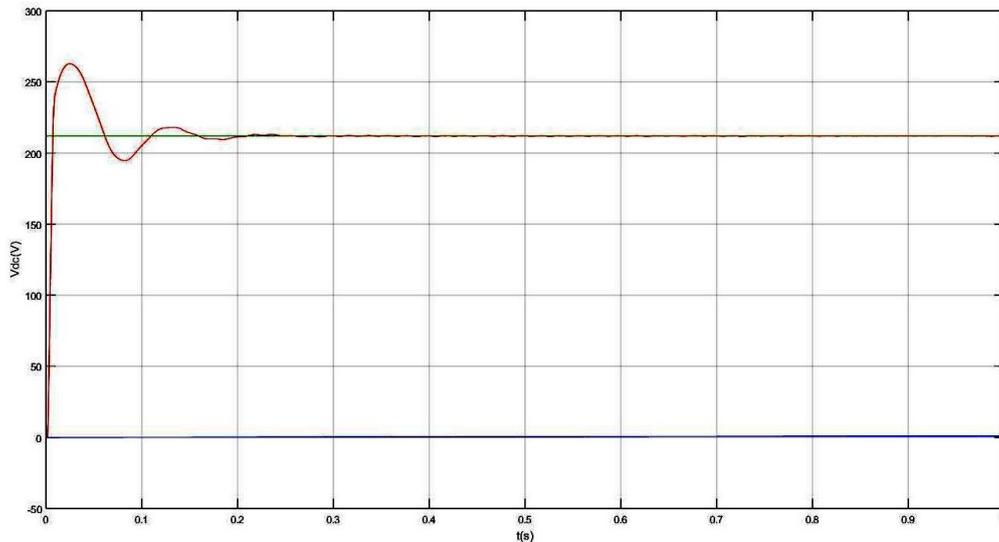


Figure III. 5 Allure de la tension de bus continue V_{dc}

Les figures III.4 et III.5 représentent respectivement les allures de puissance à la sortie de générateur photovoltaïque et de tension V_{dc} du bus continu. On voit bien que la puissance du panneau photovoltaïque monte jusqu'à atteindre sa valeur maximale (1100W). La tension du bus continue est bien régulée à sa valeur de référence.

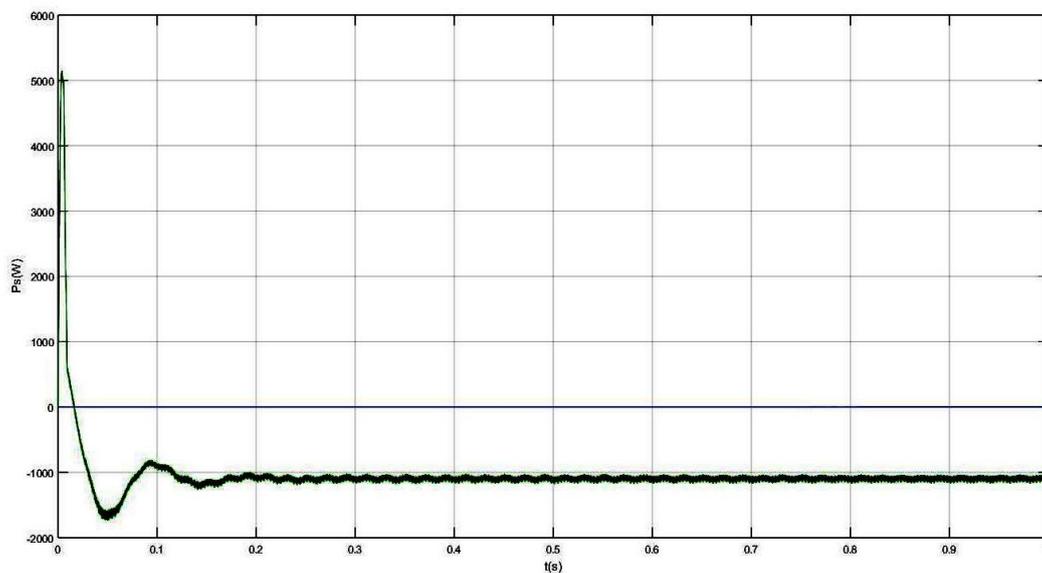


Figure III. 6 Allure de la puissance active

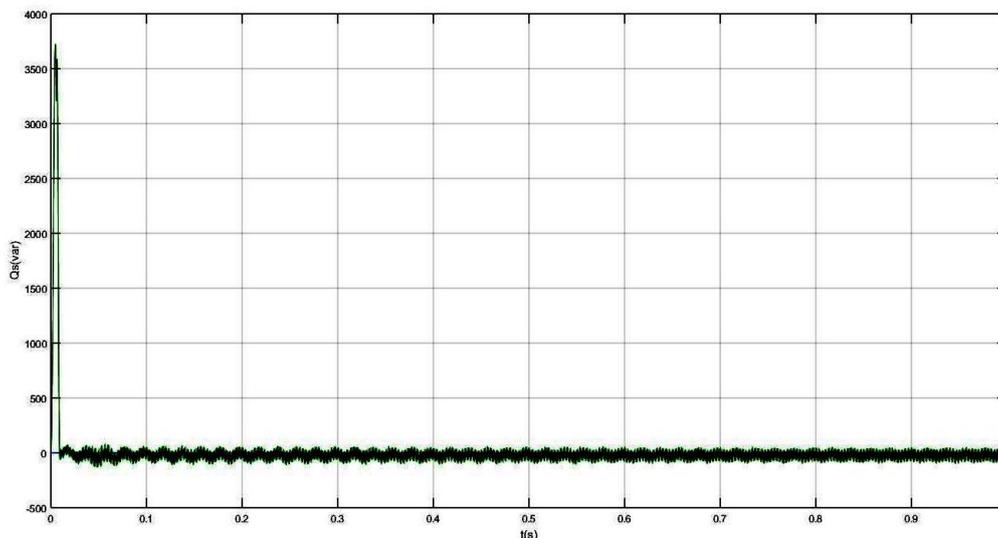


Figure III. 7 Allure de la puissance réactive

Les figures III.6 et III.7 représente respectivement les allures des puissances active et réactive du réseau (charge RLE). La puissance active du réseau est de -1000, parce que c'est le GPV qui fournit de la puissance et il compense le réseau. Tandis que la puissance réactive est nul ce qui veut dire qu'il y a un facteur de puissance unitaire.

Les figures III.9 et III.7 représente respectivement l'allure de courant de phase du réseau et le spectre d'harmonique du courant de phase. Le courant a une forme sinusoïdale de fréquence 50 Hz, et le taux de distorsion harmonique (THD) est de 2.01%.

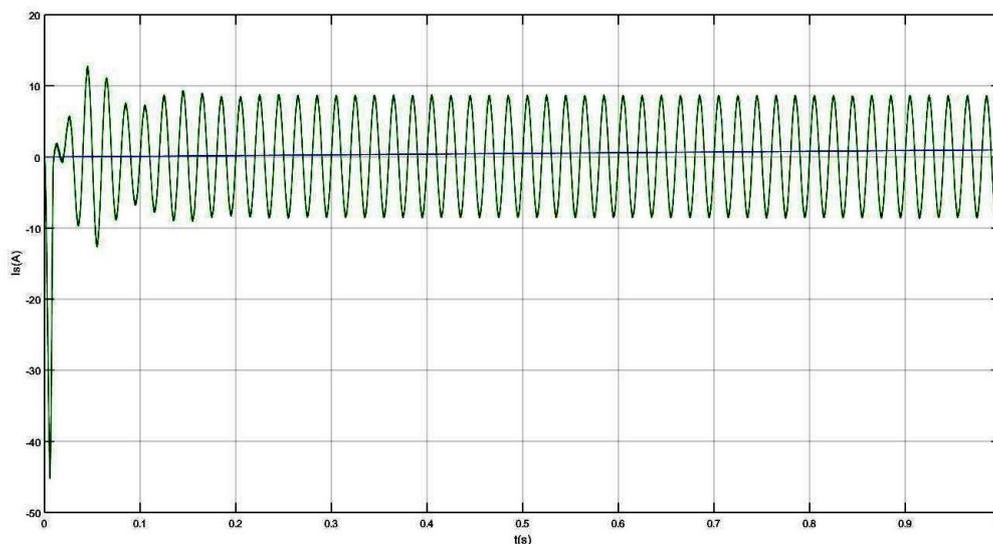


Figure III. 8 Allure du courant d'une phase du réseau

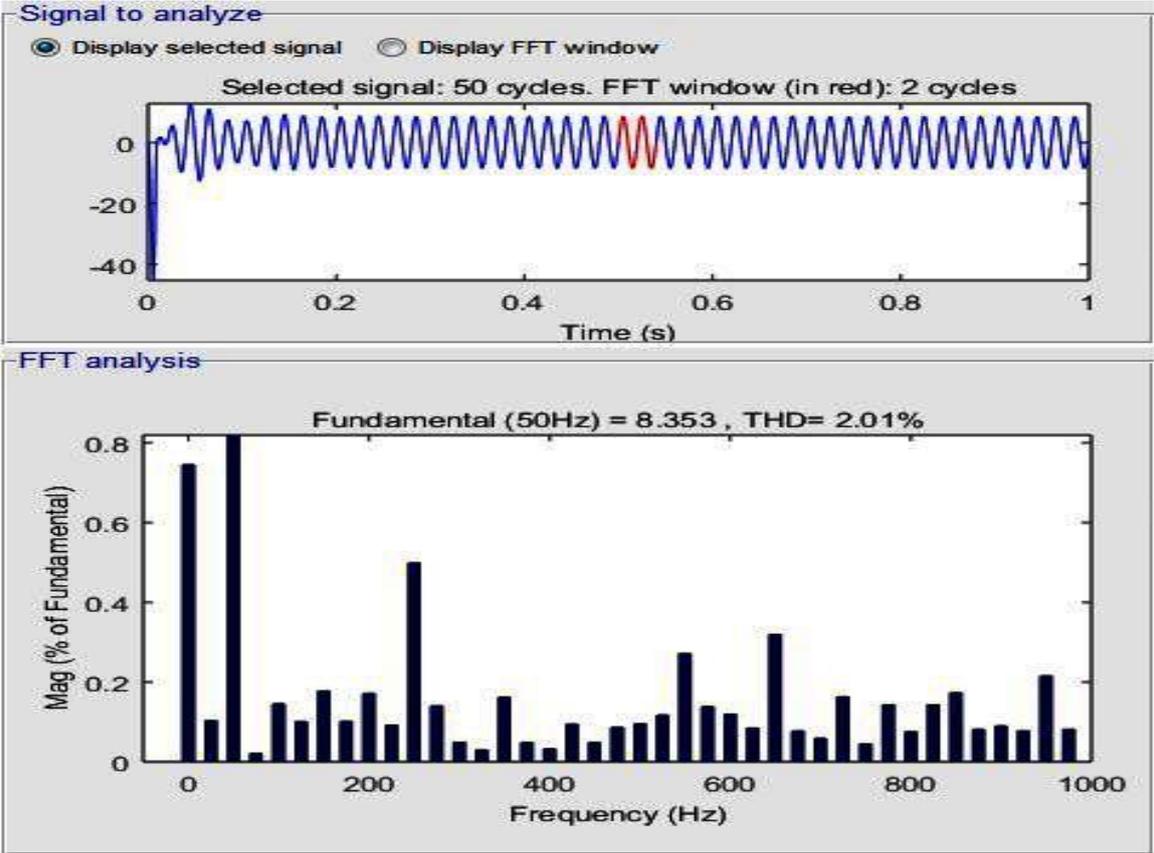


Figure III. 9 Représentation du spectre d’harmonique du courant de réseau

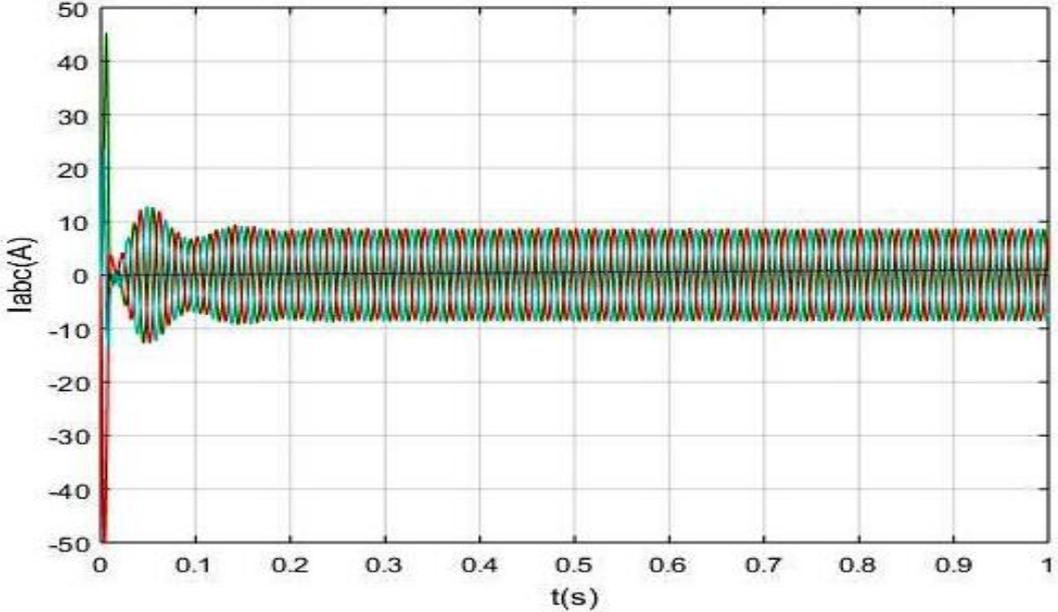


Figure III. 10 Allure des courants $i_{a,b,c}$

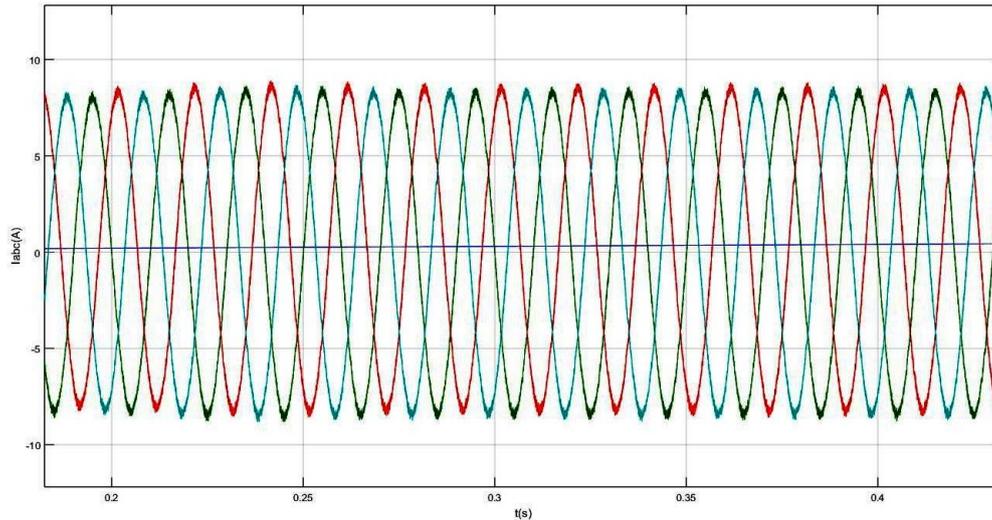


Figure III. 11 Zoom sur l'allure des courants i_{abc}

Les figures III.10 et III.11 représentent les allures des courants i_{abc} et leurs zooms, ils ont une forme sinusoïdale et de fréquence 50 Hz. La figure III.12 représente l'allure de la tension et courant d'une phase de réseau, et on voit bien que le courant est parfaitement en phase avec la tension.

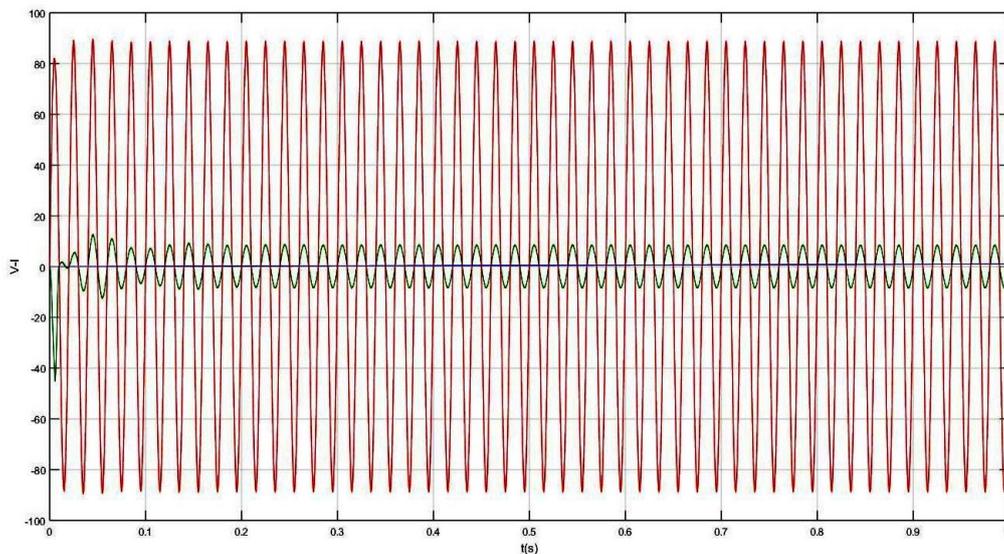


Figure III. 12 Allure du courant et de la tension d'une phase du réseau

III.5 Amélioration de la connexion réseau

L'amélioration de la connexion au réseau concernera uniquement l'aspect qualité d'énergie matérialisée par la valeur du THD. La solution que nous adoptons consiste en le passage d'un onduleur deux niveaux à un onduleur trois niveaux.

Pour cette étude, on applique les mêmes paramètres d'ensoleillement et de température qu'avec le convertisseur deux niveaux étudié ci-avant ($G=1000\text{W/m}^2$, $T=25^\circ$).

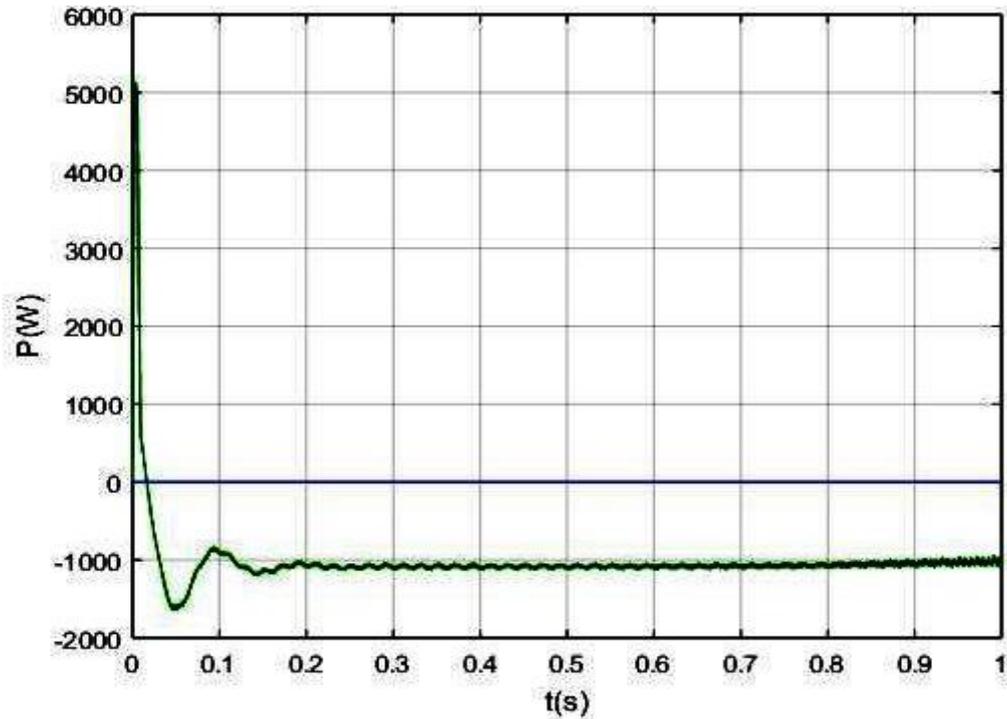


Figure III. 13 Allure des puissances actives

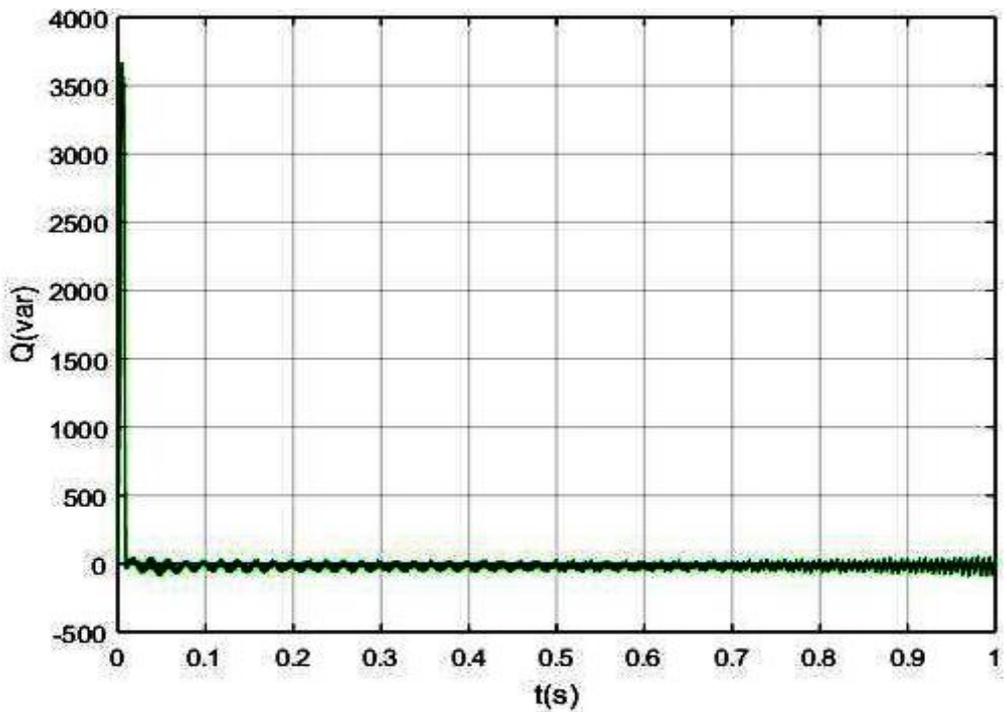


Figure III. 14 Allure des puissances réactives

Les figures III.13 et III.14 représentent respectivement les puissance active et réactive du réseau. On constate qu'il n'y a pas de différence avec celles obtenues avec l'onduleur deux niveaux. La figure III.15 représente l'allure de la tension de bus continu, on voit qu'elle est régulée à sa valeur de référence et présente une allure similaire à celle trouvée précédemment.

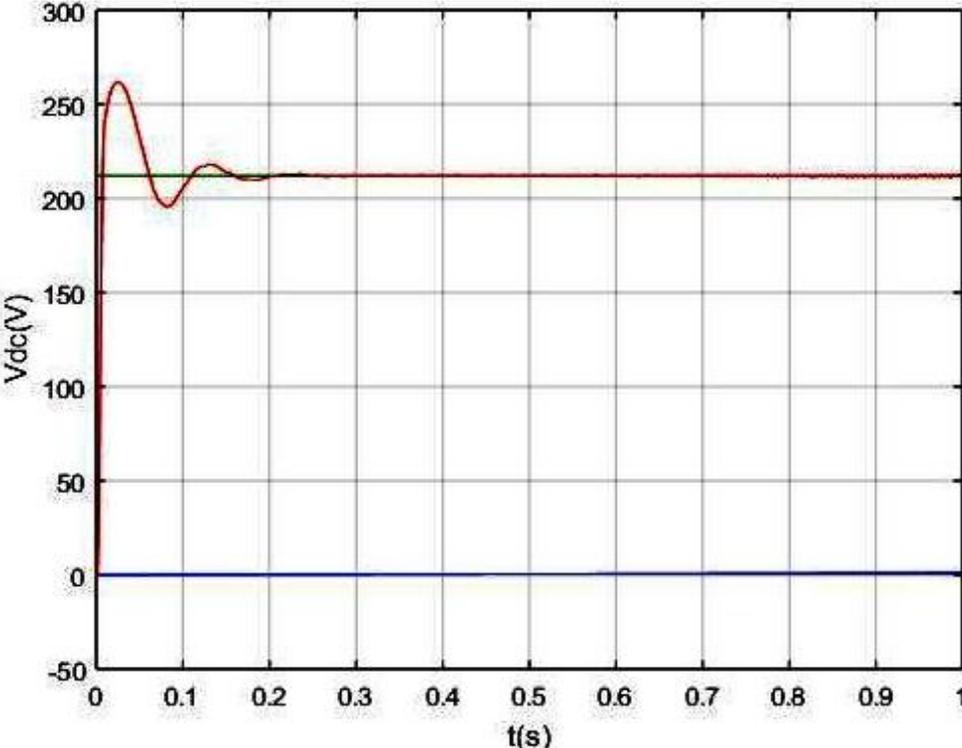


Figure III. 15 Allure de la tension de bus continu V_{dc}

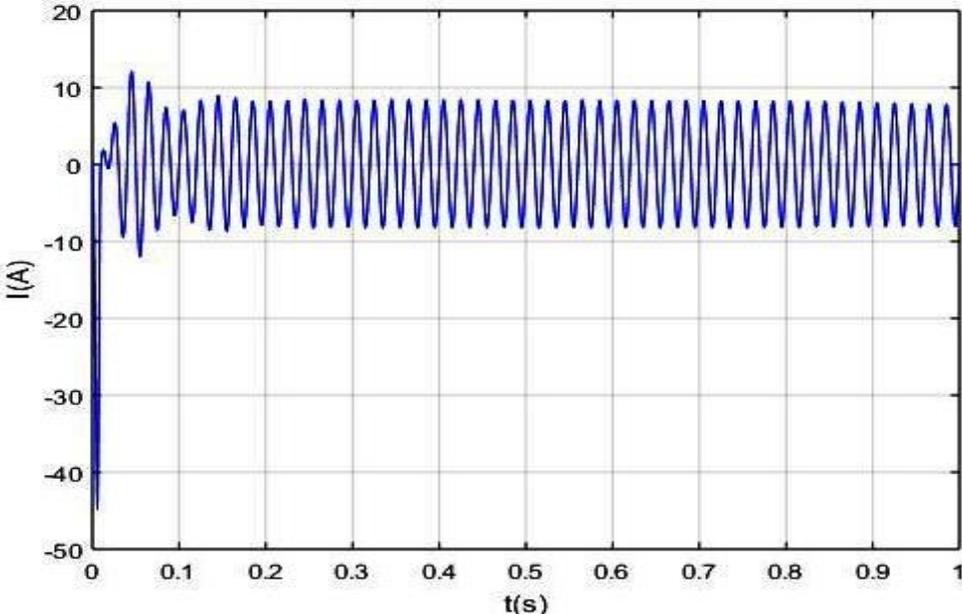


Figure III. 16 Allure du courant d'une phase du réseau

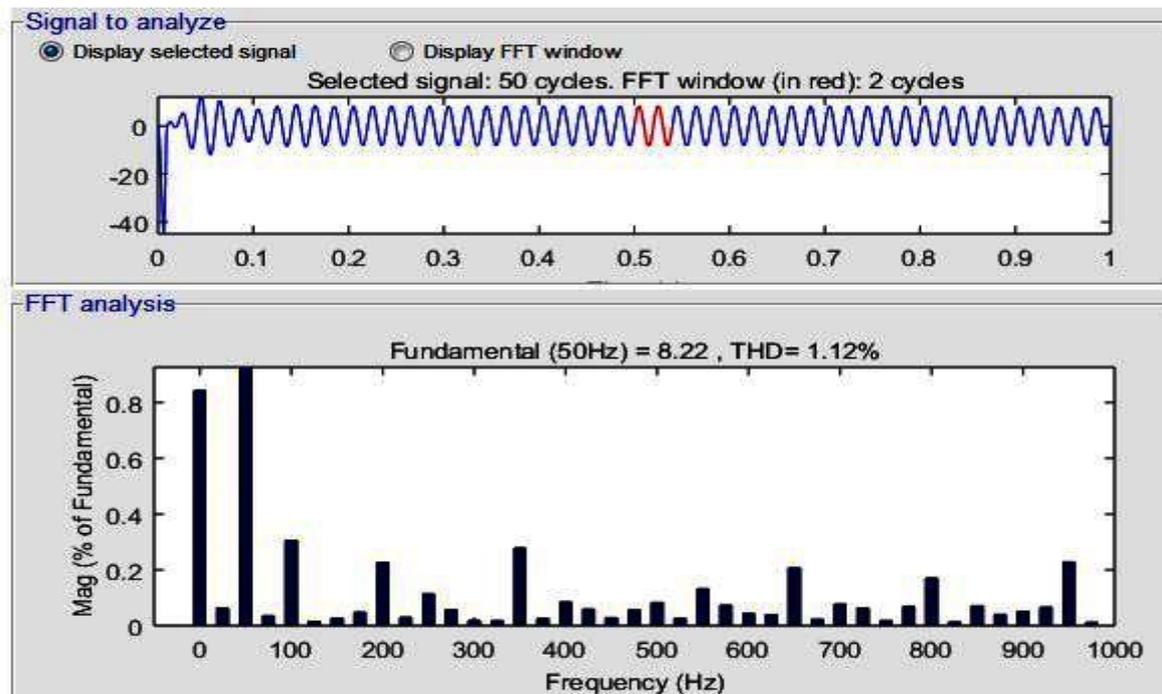


Figure III. 17 Représentation du spectre d'harmonique du courant de réseau

Les figures III.16 et III.17 représentent respectivement l'allure du courant d'une phase et le spectre harmonique correspondant. Aucune différence notable n'est constatée entre les allures du courant obtenues avec les onduleurs deux et trois niveaux. On constate, par contre, que le taux de distorsion harmonique a diminué par rapport à sa valeur précédente (de 2.01% à 1.12%) et cela est l'amélioration recherchée dans notre travail.

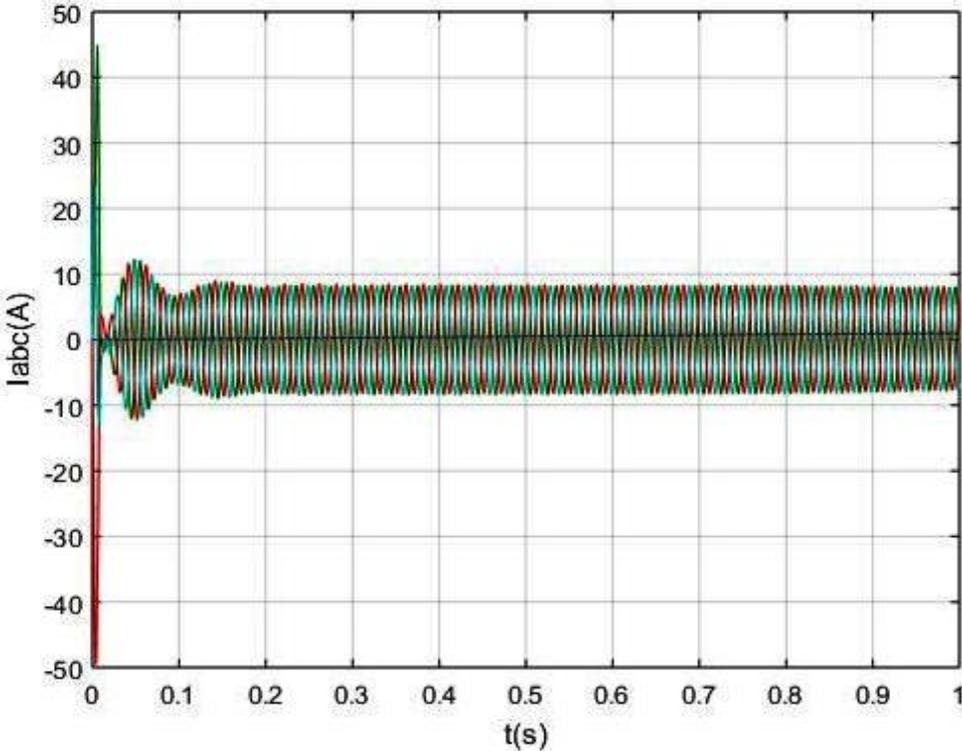


Figure III. 18 Allure des courants i_{abc}

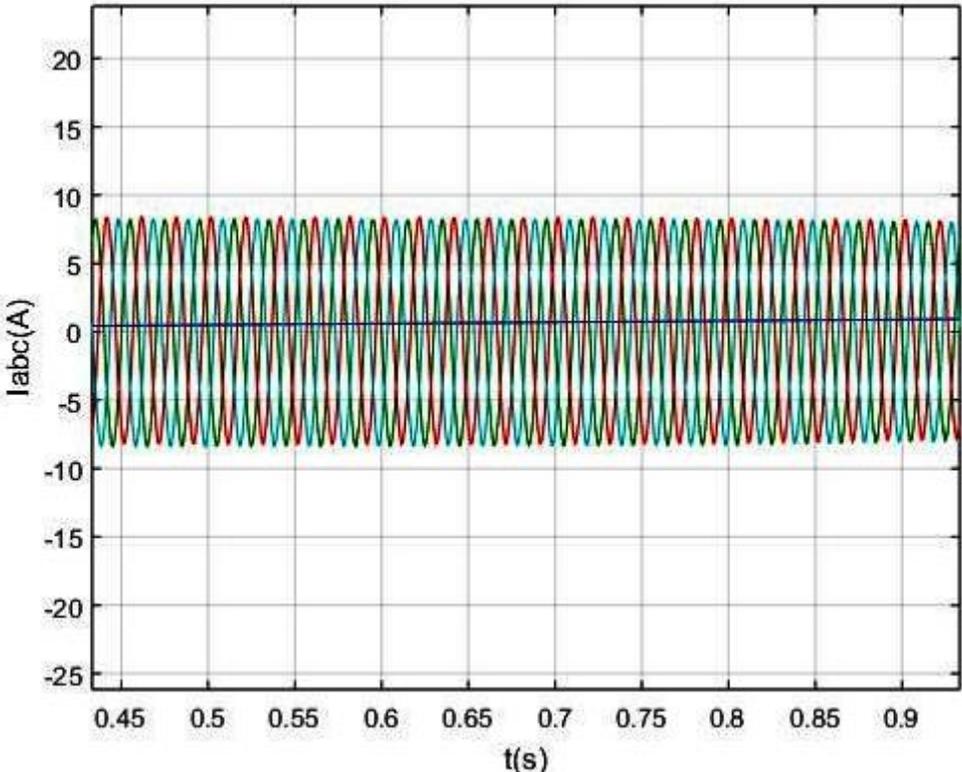


Figure III. 19 Zoom sur l'allure des courants i_{abc}

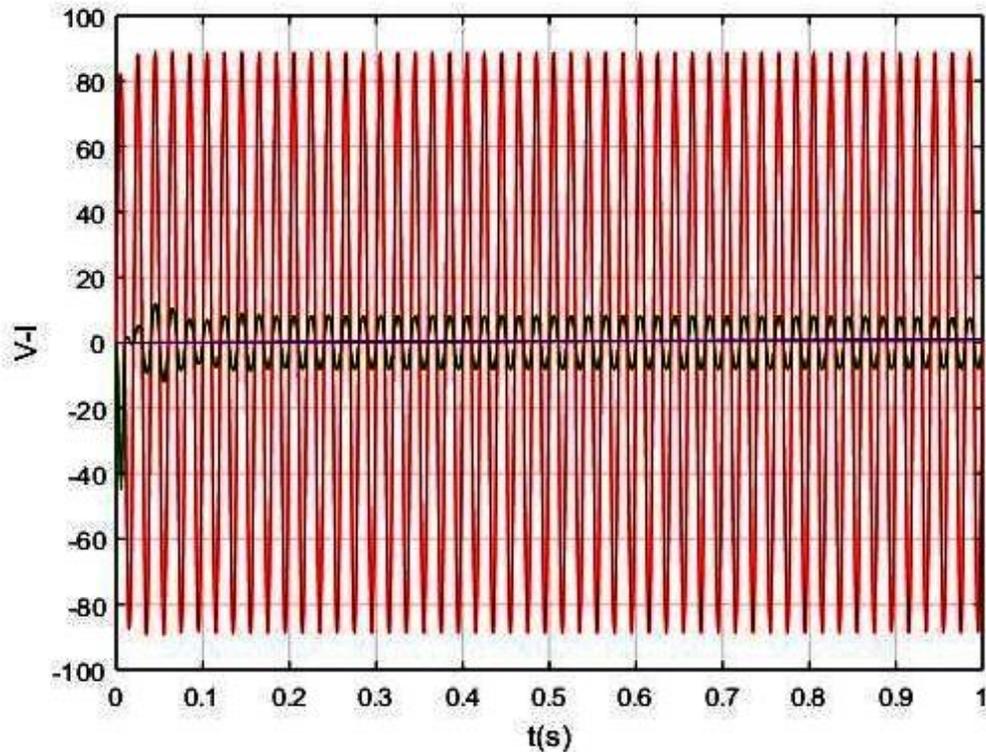


Figure III. 20 Allures du courant et de la tension d'une phase du réseau

Les figures III.18 et III.19 représentent les allures des courants i_{abc} et leurs zooms, ils ont une forme sinusoïdale et de fréquence 50 Hz. La figure III.20 représente l'allure de la tension et courant d'une phase de réseau, on constate que le courant est parfaitement en phase avec la tension et qu'il n'y a pas de différence avec les résultats obtenus sur l'onduleur de deux niveaux.

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de simulation par Matlab Simulink d'un GPV connecté au réseau via un onduleur deux niveaux puis trois niveaux. Le but recherché était l'amélioration de la qualité de l'énergie injectée au réseau par la diminution du taux de distorsion harmonique (THD).

Les résultats obtenus sont très satisfaisants et montrent clairement que l'objectif tracé est atteint. En effet, par le passage d'une connexion par onduleur deux niveaux à une autre à trois niveaux, on a pu améliorer significativement la valeur du THD, ce qui dénote d'une amélioration de la qualité de l'énergie injectée.

Conclusion générale

Conclusion Générale

Notre mémoire est destiné à l'amélioration des performances de la connexion au réseau d'un système photovoltaïque. Il s'agit plus précisément d'améliorer la qualité de l'énergie électrique injectée au réseau matérialisé par la valeur du THD. Pour cela, nous avons étudié une solution en agissant sur la topologie du convertisseur en utilisant une structure classique (à deux niveaux) puis une structure innovante (à trois niveaux)

Dans le premier chapitre, nous avons rassemblé des généralités sur la conversion photovoltaïque en particulier le mécanisme de transformation des rayonnements solaires en électricité à l'aide des cellules photovoltaïques. Nous avons aussi présenté les conséquences des perturbations harmoniques sur le réseau électrique, et les solutions classiques permettant de les éliminer.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté la modélisation des différents éléments qui composent notre système, en commençant par le générateur photovoltaïque (GPV) puis on a simulé le panneau photovoltaïque pour un ensoleillement variable et une température fixe puis un ensoleillement fixe et une température variable afin de voir l'influence de ces derniers sur le rendement de notre panneau photovoltaïque. Nous avons également présenté la commande MPPT qui est basée sur l'algorithme (P&O).

Dans le dernier chapitre, nous avons présenté les résultats de simulation par Matlab Simulink du système global en considérant une connexion par onduleur deux niveaux, dans un premier temps, puis une connexion par un onduleur trois niveaux. Les performances obtenues sont très satisfaisantes et sont globalement similaires dans les deux cas. On a constaté, par contre, que le taux de distorsion harmonique obtenu pour la connexion par onduleur trois niveaux est nettement meilleur (1.12% au lieu de 2.01% obtenu pour un onduleur deux niveaux) et cela est l'amélioration recherchée dans notre travail.

Références bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1]. Pierre Bessemoulin et Jean Oliviéri septembre 2000 « le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette » La Météorologie 8e série - n° 31.
- [2]. Mm. Hamouche Née Serir cours " Energies renouvelables " master 1.
- [3]. Ayache Khedidja « Modélisation et simulation d'un générateur photovoltaïque couplé à un réseau électrique » mémoire de magister université de Souk-Ahras, 2014.
- [4]. Missoum Mohammed, « Contribution de l'énergie photovoltaïque dans la performance énergétique de l'habitat à haute qualité énergétique en Algérie », mémoire de magistère, université Hassiba ben Bouali de Chlef, 11 décembre 2011.
- [5]. F. Salama « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique », mémoire de magister, université de Sétif 2011.
- [6]. Dr. Belaid Lalouni Sofia « Cours energie solaire photovoltaïque » université de Bejaia, <http://elearning.univ-bejaia.dz/>, 2015.
- [7]. Imessaoudene Saïd et Laced Chafie « Détection et localisation de défauts dans un système photovoltaïque » mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de master en électrotechnique.
- [8]. H. Belmili, M. Ayad, E.M. Berkouk et M. Haddad « Optimisation de dimensionnement des installations photovoltaïques autonomes - exemples d'applications, éclairage et pompage au fil du soleil » revue des énergies renouvelables CICME'08 Sousse (2008) 27 – 39
- [9] N. Aouchiche, « Conception d'une commande MPPT optimale à base d'intelligence artificielle d'un système photovoltaïque » thèse de doctorat.
- [10]. Mr Rabhi Lamine et Mr Tabane Younes « Commande d'un système photovoltaïque Connecté au Réseau Electrique » mémoire de fin d'étude.
- [11]. F. Heroguel, « les cellules photovoltaïques » Ecole Normale Supérieure, Lyon epreuve de projet, 2007.

- [12] V.Ignatova « Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique: application aux creux de tension et à la pollution harmonique », thèse de doctorat, université Joseph-Fourier, Grenoble 1, 2006.
- [13].Assila Mohammed Salah « Commande directe de puissance prédictive d'un filtre actif parallèle triphasé», mémoire de fin d'étude.
- [14] Djaffar Ould Abdeslam « Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension », thèse de doctorat, université de Haute-Alsace ´ U.F.R. des sciences et techniques.
- [15].Pr. B. MAOUCHE « Cours compatibilité électromagnétique » master 2 en électrotechnique.
- [16]. steeve beaulieu « étude et mise au point d'un filtre actif d'harmoniques en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique», mémoire de la maîtrise en ingénierie.
- [17]. Mr. Rabahallah « Diagnostic d'un réseau électrique industriel en termes de perturbations harmoniques : application à l'ENIEM », mémoire de fin d'étude.
- [18]. BELAID. S « Cours énergie solaire photovoltaïque» département de génie électrique, faculté de technologie ; destiné aux étudiant master 2 ER université de Bejaia 2015.
- [19]. <https://www.cours-gratuit.com/cours-electronique-de-puissance/cours-hacheur>.
- [20] [21]. S. Petibon, «Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques». thèse de doctorat de l'université de Toulouse, Janvier 2009.
- [22]. B. Fléche, D. delagnes, «énergie solaire photovoltaïque», STI ELT juin 2007.