

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique  
Université Abderrahmane Mira  
Faculté de la Technologie



Département d'Automatique, Télécommunication et d'Electronique

## Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Automatique  
Spécialité : Automatique et informatique industrielle

### Thème

Gestion d'énergie d'un système photovoltaïque connecté au réseau

**Préparé par :**

- AIT BESSAI Nesrine
- MAZOUZI Ali

**Dirigé par :**

Pr. BELKAID Abdelhakim

**Examiné par :**

Dr. AISSOU Said

Dr. BELLAHSENE Noura

Année universitaire : 2023/2024

# Remerciements

Avant tout, je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers ALLAH, le tout-puissant, pour nous avoir donné le courage et la volonté nécessaires pour accomplir ce travail.

Je tiens à remercier chaleureusement notre encadrant, Mr. Belkaid Abdelhakim, pour son soutien inestimable tout au long de ce travail. Sa disponibilité, ses conseils précieux et son partage généreux de connaissances et de compétences ont été d'une aide précieuse.

Mes respectueux remerciements vont à l'ensemble des membres du jury, Mr. Aissou Said et Mme. Bellahssene Noura, pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail et pour leurs précieuses contributions qui ont grandement enrichi ce mémoire.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce projet. Leur aide et leur soutien ont été essentiels pour atteindre ce point.

## Dédicace

Avant tout, je remercie Dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.

Je dédie ce modeste travail à notre précieuse famille et à nos parents bien-aimés. Leur amour inconditionnel, leur soutien indéfectible et leurs sacrifices ont été notre phare dans l'obscurité, guidant notre chemin vers la réussite. Leur foi inébranlable en nous a été notre ancre, nous inspirant et nous motivant à chaque étape de ce voyage.

À nos chers amis, qui ont partagé nos rires et nos larmes, qui ont été à nos côtés dans les moments de joie et de peine, cette œuvre est pour vous. Votre amitié, votre encouragement et votre amour ont rendu ce parcours non seulement possible, mais aussi mémorable.

## Table des matières

Liste des figures.....	V
Introduction générale.....	1

### Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

I.1	Introduction .....	2
I.2	Historique.....	2
I.3	L'énergie solaire photovoltaïque .....	3
I.4	Différents types de système photovoltaïque .....	3
I.5	Eléments et fonctionnement d'un système photovoltaïque.....	5
I.6	Cellule photovoltaïque .....	6
I.6.1	Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque .....	6
I.6.2	Type des cellules photovoltaïques.....	6
I.6.3	Groupement des cellules photovoltaïques .....	8
I.7	Module photovoltaïque .....	9
I.7.1	Caractéristiques d'un module .....	10
I.8	Panneaux photovoltaïques .....	10
I.9	Convertisseurs statiques .....	11
I.9.1	Onduleur.....	11
I.9.2	Hacheur .....	12
I.10	Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque .....	14
I.11	Conclusion .....	14

### Chapitre II : Modélisation des éléments D'un système photovoltaïque

II.1	Introduction .....	15
II.2	Modélisation d'une cellule photovoltaïque.....	15
II.2.1	Cas d'une cellule simplifiée .....	15
II.2.2	Cas d'une cellule à une diode .....	16
II.3	Modélisation d'un hacheur survolteur (BOOST).....	17
II.4	La commande MPPT .....	20
II.4.1	Le principe de fonctionnement.....	20
II.4.2	Les algorithmes MPPT .....	21
II.5	Convertisseur DC-AC (onduleur) .....	24
II.5.1	Modélisation de l'onduleur triphasé.....	25
II.5.2	Commande de l'onduleur (Commande MLI).....	26
II.6	Conclusion .....	27

### Chapitre III: Simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau

III.1	Introduction .....	28
III.2	Le Système de Compensation Photovoltaïque proposée.....	28
III.3	Simulation des différentes composantes de système.....	28
III.3.1	Simulation du générateur PV .....	28
III.3.2	Simulation du générateur à éclairement variable .....	29
III.3.3	système photovoltaïque avec hacheur commandé en MPPT .....	30
III.3.4	Simulation de l'onduleur .....	32
III.4	Simulation de côté réseau.....	34
III.4.1	Schéma de simulation du réseau.....	34
III.4.2	Le filtre LC .....	34
III.4.3	Simulation de réseau .....	35
III.5	Conclusion .....	39
Conclusion générale.....		41
Bibliographie .....		42

## Liste des figures

Figure I 1: Système photovoltaïque sans stockage électrochimique .....	4
Figure I 2: Système photovoltaïque avec stockage électrochimique .....	4
Figure I 3: Système d'alimentation autonome .....	5
Figure I 4: Cellule photovoltaïque en silicium monocristallin .....	7
Figure I 5: Cellule photovoltaïque en silicium poly cristallin .....	7
Figure I 6: Cellule photovoltaïque en silicium amorphe .....	8
Figure I 7: Courbe $I=F(V)$ d'une association série de cellules photovoltaïques .....	9
Figure I 8: Courbe $I=F(V)$ d'une association parallèle de cellules photovoltaïques .....	9
Figure I 9: Module photovoltaïque ( .....	10
Figure I 10: Cellule, Module, Panneau et Champ photovoltaïque .....	11
Figure I 11: Circuit électrique du hacheur Buck .....	12
Figure I 12: Circuit électrique du hacheur Boost .....	13
Figure I 13: Circuit électrique du hacheur Buck-Boost ( .....	13
Figure II 1 Modèle de cellule photovoltaïque simplifiée .....	15
Figure II 2: Modèle de la cellule photovoltaïque à une diode .....	16
Figure II 3: Circuit électrique de hacheur Boost .....	18
Figure II 4: Circuit équivalent d'un hacheur Boost avec interrupteur fermé .....	18
Figure II 5: Circuit équivalent d'un hacheur Boost avec interrupteur ouvert .....	19
Figure II 6: Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge .....	21
Figure II 7: Principe de fonctionnement d'une commande MPPT .....	21
Figure II 8: Caractéristique de fonctionnement de la méthode IC .....	23
Figure II 9: Algorithme de la commande IC .....	24
Figure II 10: Circuit équivalent d'un onduleur triphasé .....	25
Figure II 11: La modulation de largeur d'impulsion .....	27
Figure III 1: Caractéristique de générateur PV .....	28
Figure III 2: Le courant en fonction de la tension .....	29
Figure III 3: La puissance en fonction de la tension .....	30
Figure III 4: Le hacheur Boost .....	30
Figure III 5: La tension de sortie du hacheur Boost .....	32
Figure III 6: Schéma de l'onduleur .....	33
Figure III 7: La simulation de la commande MLI .....	33
Figure III 8: Schéma global de la simulation de système .....	35
Figure III 9: Caractéristique de réseau .....	36
Figure III 10: La tension de réseau .....	37
Figure III 11: Le courant de réseau .....	39

# Introduction générale

## **Introduction**

Au cours des dernières années, la hausse des prix du pétrole a incité les pays consommateurs à se tourner vers les énergies renouvelables, qui présentent de nombreux avantages. Ces énergies propres peuvent être exploitées de diverses manières. De même, elles peuvent être combinées dans un système hybride comme les panneaux solaire et les éoliennes.

L'énergie solaire est largement reconnue comme une source d'énergie très écologique, particulièrement adaptée aux bâtiments et aux toits en raison de sa propreté et de sa disponibilité constante. Pour optimiser leur efficacité, il est essentiel de maximiser leur rendement à moindre coût en gérant efficacement la puissance générée et en minimisant les pertes.

## **Présentation du mémoire :**

Dans notre travail nous avons étudié l'amélioration de la gestion d'un système photovoltaïque avec stockage connecté au réseau

**Le premier chapitre**, représente un aperçu sur l'énergie photovoltaïque et les différents systèmes photovoltaïques en général. Leur principe de fonctionnement et les différentes cellules qui constituent le module photovoltaïque, et les avantages et les inconvénients de ce type d'énergie. Ainsi que les convertisseurs tels que le hacheur et l'onduleur.

**Le deuxième chapitre** est consacré à la modélisation d'un système PV qui a pour but d'étudier théoriquement le comportement de certains paramètres et de les optimiser en respectant une contrainte donnée. On a aussi expliqué le principe de conversion PV.

La modélisation de chaque composant du système photovoltaïque complet sera élaborée à partir de modèles de la littérature (champ PV, convertisseurs, stockage batteries) ; cette modélisation est une étape essentielle permet d'introduire un certain nombre de modèles puis évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation ainsi les paramètres constitutants.

**Le dernier chapitre** sera consacré pour la simulation sous MATLAB Simulink du système PV et la gestion de puissance.



# Chapitre I

Généralités sur les systèmes photovoltaïques

## Chapitre I: Généralités sur les systèmes photovoltaïques

### I.1 Introduction

La consommation mondiale en matière d'énergie est assurée essentiellement par les énergies non renouvelables. Ces énergies essentiellement fossiles sont épuisables, par conséquent, les énergies renouvelables (éolienne, solaire photovoltaïque et thermique, biomasse, géothermie, etc.) connaissent actuellement un fort développement dans le monde. Vu son caractère écologique, elle apparaît comme une source importante telle que la qualité d'énergie solaire qui arrive à la surface de la terre durant une journée est dix fois plus grande que celle consommée.

Dans ce chapitre, nous présentons des généralités sur le système photovoltaïque, on commence par l'historique d'énergie solaire photovoltaïque ensuite les systèmes photovoltaïques existant, et les convertisseurs statiques, enfin les avantages et inconvénients de ce système.

### I.2 Historique

L'histoire de l'énergie solaire photovoltaïque remonte au 19<sup>ème</sup> siècle, avec des découvertes et des avancées clés qui ont conduit à la technologie dont nous disposons aujourd'hui

- En 1839, le physicien français Alexandre Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque en observant que la conductance de certains matériaux augmente lorsqu'ils sont exposés à la lumière. Cela a jeté les bases du développement des cellules solaires.
- En 1873, Willoughby Smith découvre l'effet photovoltaïque du sélénium.
- En 1876, William G. Adams et son élève Richard E. Day découvrent que l'éclairage d'une jonction entre le sélénium et le platine avait également un effet photovoltaïque.
- En 1883, Charles Fritts a construit les premières cellules solaires utilisant des plaquettes de sélénium, atteignant un rendement de 1%. Ce furent les premiers panneaux solaires fonctionnels.
- En 1888, Edward Weston reçut le premier brevet américain pour une cellule solaire.
- En 1905, Albert Einstein a publié un article sur l'effet photoélectrique, qui expliquait le mécanisme à l'origine de l'effet photovoltaïque et lui a valu le prix Nobel en 1921.
- En 1954, les chercheurs des Bell Labs ont développé la première cellule photovoltaïque au silicium pratique, atteignant un rendement de 4 %, qui a ensuite été amélioré à 11 %. Cela a marqué la naissance de la technologie photovoltaïque moderne.
- En 1958, les premières cellules photovoltaïques furent utilisées dans l'espace sur le satellite américain Vanguard.
- En 1963, Sharp Corporation a produit le premier module photovoltaïque utilisable à partir de cellules solaires au silicium, permettant ainsi une production de masse.
- Dans les années 1970, la recherche a réduit le coût des panneaux solaires de 80 %, permettant

## Chapitre I: Généralités sur les systèmes photovoltaïques

ainsi une adoption plus large, principalement pour des applications hors réseau.

- En 1977, le ministère américain de l'Énergie a créé le Laboratoire national des énergies renouvelables (NREL) pour mener des recherches et des développements photovoltaïques.
- Depuis lors, la technologie solaire photovoltaïque a continué de progresser, avec une efficacité croissante et des coûts décroissants, ce qui en fait aujourd'hui une source d'énergie renouvelable viable. L'histoire du photovoltaïque témoigne du long chemin parcouru depuis la découverte initiale de l'effet photovoltaïque jusqu'aux applications pratiques que nous observons aujourd'hui.[1]

### I.3 L'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque est issue du rayonnement solaire capté par la Terre, lequel se compose d'ondes électromagnétiques émises par la surface du Soleil, résultant des réactions de fusion nucléaire convertissant l'hydrogène en hélium dans son noyau. À chaque seconde, environ 3,89 millions de joules (MJ) d'énergie nucléaire sont libérés par le Soleil, puis rapidement transformés en énergie thermique. Ce flux d'énergie est ensuite transporté vers la surface terrestre et diffusé sous forme de rayonnement électromagnétique. La quantité d'énergie émise par le Soleil est estimée à environ 64 mégawatts par mètre carré ( $MW/m^2$ ). Après un trajet de plus de 150 millions de kilomètres, seule une petite partie de cette énergie (environ  $1,7 MW/m^2$ ) parvient au sommet de l'atmosphère terrestre sans être absorbée dans l'espace. Cette quantité désignée sous le terme de "constante solaire", est reçue par la Terre. Toutefois, son utilisation est limitée en raison de la réflexion de l'onde solaire, entraînant ainsi une perte d'énergie. [2]

### I.4 Différents types de système photovoltaïque

Il existe trois types de systèmes photovoltaïques :

#### I.4.1.1 Système photovoltaïque connecté au réseau

Le générateur photovoltaïque connecté au réseau l'aide d'un convertisseur courant continu – courant alternatif (CC-CA) et l'onduleur qui remplace les batteries qui transforme le courant continu sortant des panneaux en courant alternatif (convertisseur CC-CA). Ce système permet d'éviter les problèmes de stockage et de transport de l'électricité [3]

#### I.4.1.2 Système photovoltaïque connecté au réseau sans stockage électrochimique

Dans ce cas, le système est directement relié au réseau électrique interne du site et ne fonctionnera que lorsque l'éclairement solaire sera suffisant pour son démarrage [3]

## Chapitre I: Généralités sur les systèmes photovoltaïques

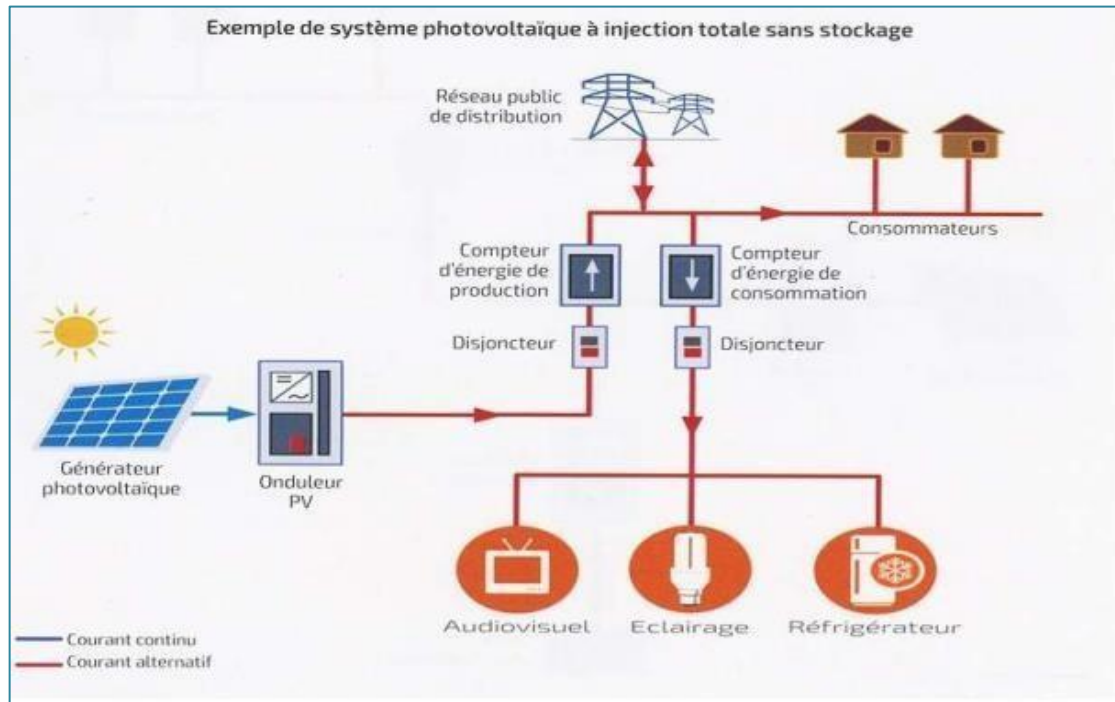


Figure I 1: Système photovoltaïque sans stockage électrochimique [3]

### I.4.1.3 Système photovoltaïque connecté au réseau avec stockage électrochimique

Dans ce cas, le système est directement raccordé à l'installation, tandis que le stockage d'énergie par accumulateurs est intégré à la centrale de production. Ce stockage électrochimique est essentiel pour garantir le bon fonctionnement. [3]

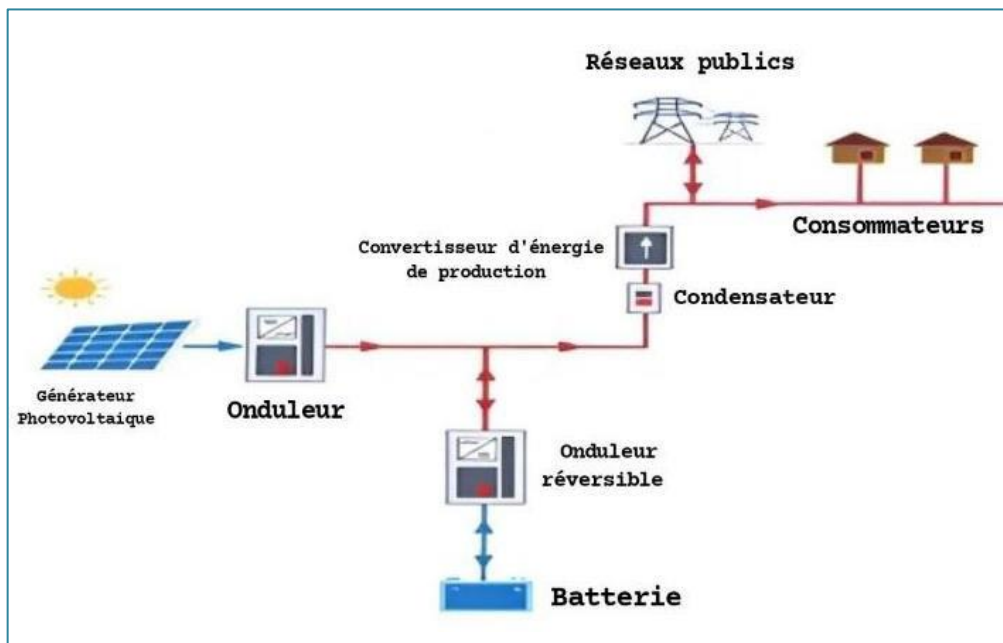


Figure I 2: Système photovoltaïque avec stockage électrochimique [3]

### I.4.1.4 Système photovoltaïque autonomes

## Chapitre I: Généralités sur les systèmes photovoltaïques

Un système photovoltaïque autonome fonctionne de manière indépendante, sans connexion à d'autres sources d'énergie, et fournit de l'électricité directement au consommateur sans être relié au réseau électrique principal. Habituellement, ce type de système nécessite des batteries de stockage d'énergie. Il est utilisé pour alimenter des consommateurs dans des zones isolées ainsi que pour des applications telles que le pompage d'eau et l'éclairage. [4]

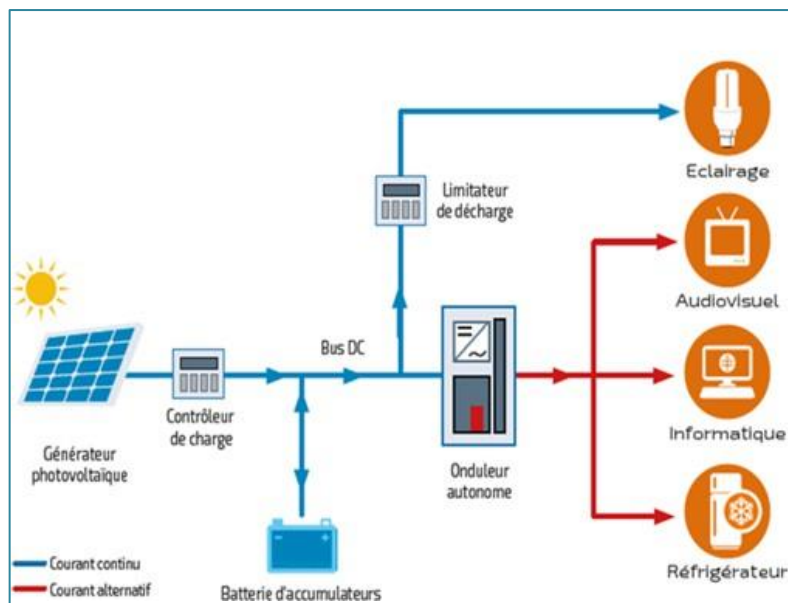


Figure I 3: Système d'alimentation autonome [4]

### I.4.1.5 Système photovoltaïque hybride :

Un système photovoltaïque hybride est une combinaison de plusieurs sources d'énergie renouvelables et de stockage associées. Ce type de système permet d'optimiser l'utilisation combinée de plusieurs sources d'énergie, notamment l'énergie photovoltaïque et éolienne, ainsi que des moyens de stockage de l'énergie. Les systèmes hybrides sont particulièrement adaptés pour les applications nécessitant une alimentation continue d'une puissance élevée et peuvent inclure des accumulateurs pour stocker l'énergie produite lorsqu'elle n'est pas consommée immédiatement. [5]

## I.5 Eléments et fonctionnement d'un système photovoltaïque

Un système photovoltaïque se compose d'un ensemble de dispositifs visant à fournir de l'énergie électrique. Ces éléments sont les suivants :

Le champ photovoltaïque, composé de modules interconnectés en série et en parallèle, qui captent les rayonnements solaires pour produire un courant continu à basse tension.

Un accumulateur (batterie, super condensateur, etc.) qui stocke l'énergie produite par le système

## **Chapitre I: Généralités sur les systèmes photovoltaïques**

photovoltaïque, permettant ainsi l'utilisation d'électricité pendant les périodes sans ensoleillement.

Un régulateur électronique, chargé de surveiller l'état de charge des accumulateurs et de les protéger contre les surcharges et les décharges profondes.

Un convertisseur à commande MPPT, qui assure que le système fonctionne à sa puissance maximale.

Un onduleur, qui convertit la tension continue d'entrée en tension alternative de sortie (DC-AC).

La charge, représentant l'utilisation finale de l'électricité (consommateur) [6]

### **I.6 Cellule photovoltaïque**

Les cellules photovoltaïques sont des dispositifs optoélectroniques qui, lorsqu'ils sont exposés à la lumière, génèrent de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Cet effet se produit lorsque des photons sont absorbés par un matériau semi-conducteur, induisant ainsi une tension électrique. Ce processus repose sur les propriétés d'absorption des matériaux semi-conducteurs vis-à-vis du rayonnement lumineux. Le choix des matériaux utilisés pour fabriquer ces cellules dépend des caractéristiques physiques de certains de leurs électrons, qui peuvent être libérés de leurs atomes lorsqu'ils sont excités par des photons solaires ayant une énergie spécifique en fonction de leurs longueurs d'onde. Une fois libérées, ces charges électriques se déplacent à travers le matériau, générant ainsi un courant électrique continu. Ce flux de charges crée une force électromotrice aux bornes du semi-conducteur, phénomène connu sous le nom d'effet photovoltaïque. [7]

#### **I.6.1 Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :**

Le fonctionnement des cellules solaires repose sur la conversion directe de l'énergie lumineuse du soleil en électricité à travers la génération et le transport de charges électriques positives et négatives dans un matériau semi-conducteur sous l'effet de la lumière. Ce matériau est composé de deux parties, l'une dopée de type n avec un excès d'électrons, et l'autre dopée de type p avec un déficit en électrons. Lorsque ces deux parties sont mises en contact, les électrons en excès dans le matériau de type n diffusent vers le matériau de type p. Lorsque ces zones sont juxtaposées, un champ électrique intense se forme à leur interface. Étant donné que les électrons sont chargés négativement et les trous sont chargés positivement, ils sont déplacés dans des directions opposées sous l'influence de ce champ électrique. Cette séparation des électrons et des trous à la jonction entre les régions de type p et n permet de récupérer de l'énergie électrique exploitable dans un circuit externe.[8]

#### **I.6.2 Type des cellules photovoltaïques :**

Les cellules photovoltaïques sont des dispositifs permettant de transformer l'énergie lumineuse en électricité. Elles se déclinent en divers types, chacun caractérisé par son propre rendement et coût. Malgré ces variations, le rendement global des cellules reste relativement assez faible, oscillant entre 8 et 23 % de l'énergie qu'ils reçoivent. Actuellement, trois principaux types de

## Chapitre I: Généralités sur les systèmes photovoltaïques

Cellules sont :[9]

### I.6.2.1 Les cellules monocristallines :

Sont des photopiles fabriquées à partir de silicium cristallisé en une seule structure cristalline. Bien qu'elles offrent un meilleur rendement de 12 à 16 %, leur processus de fabrication est complexe et énergivore, ce qui entraîne des coûts plus élevés.[10]



Figure I 4:Cellule photovoltaïque en silicium monocristallin [10]

### I.6.2.2 Les cellules poly cristallines :

Le silicium poly cristallines est devenu aujourd'hui la technologie la plus utilisée elles sont fabriquées à partir d'un bloc de silicium cristallisé sous forme de cristaux multiples, leur coût de fabrication moins élevé, cependant leur rendement moyen est plus faible. [10]



Figure I 5:Cellule photovoltaïque en silicium poly cristallin [10]

## Chapitre I: Généralités sur les systèmes photovoltaïques

### I.6.2.3 Les cellules amorphes :

Ont un faible rendement (6 à 10 %), mais ne nécessitent que de très faible épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres [10]



Figure I 6: Cellule photovoltaïque en silicium amorphe [10]

### I.6.3 Groupement des cellules photovoltaïques

#### I.6.3.1 Regroupement en série :

L'association en série offre l'avantage d'augmenter la tension de sortie d'un générateur photovoltaïque en reliant plusieurs cellules en série. Dans ce schéma, le même courant traverse les cellules, et la caractéristique résultante du montage en série est déterminée par l'addition des tensions élémentaires de chaque cellule.[11]

La tension de sortie, exprimée généralement par  $U_s$ , est définie par la formule suivante :

$$U_s = n \cdot U_c.$$

Avec:

$U_c$  : tension fournie par une cellule. Pour ce regroupement, le courant est commun à toutes les cellules



## Chapitre I: Généralités sur les systèmes photovoltaïques

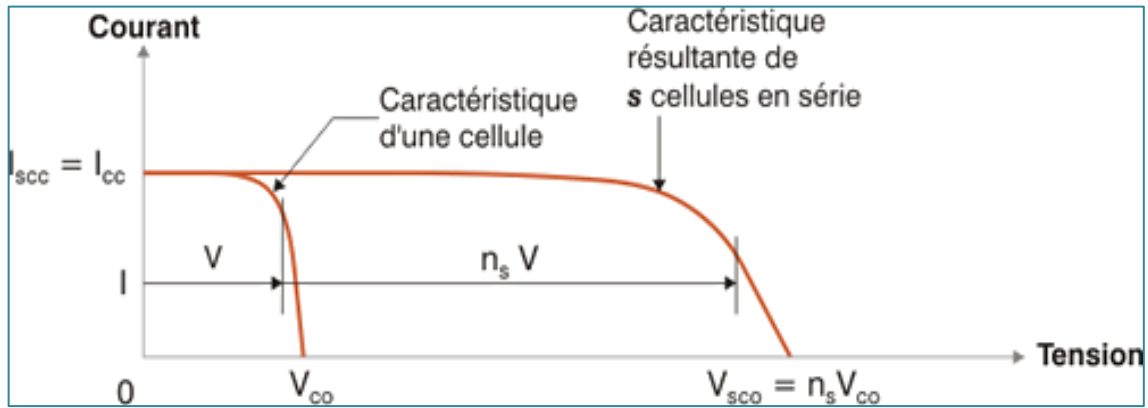


Figure I 7: Courbe  $I = F(V)$  d'une association série de cellules photovoltaïques [12]

### I.6.3.2 Regroupement en parallèle :

En combinant plusieurs modules photovoltaïques identiques en parallèle, la tension de la branche est équivalente à la tension de chaque module individuel. Cependant, les courants de ces modules s'additionnent, augmentant ainsi le courant total en sortie et formant ainsi un champ photovoltaïque avec une tension constante. [11]

Ça caractéristique est représenté dans la figure ci-dessous :

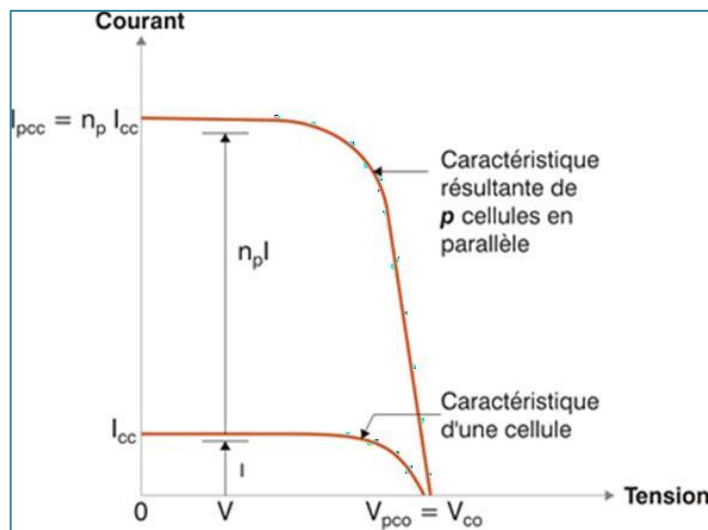


Figure I 8: Courbe  $I = F(V)$  d'une association parallèle de cellules photovoltaïques. [12]

## I.7 Module photovoltaïque

L'association des cellules constitue un module photovoltaïque qui permet d'augmenter la production de puissance. Ces modules peuvent être interconnectés en série ou en parallèle. Lorsqu'ils sont connectés en série, la tension est augmentée pour un courant donné, tandis que la connexion en parallèle augmente le courant tout en maintenant la même tension. De plus, ces cellules sont

## Chapitre I: Généralités sur les systèmes photovoltaïques

préservées de l'humidité grâce à une encapsulation dans un polymère EVA (éthylène, vinyle, acétate) et sont protégées sur leur surface avant par une couche de verre. [13]

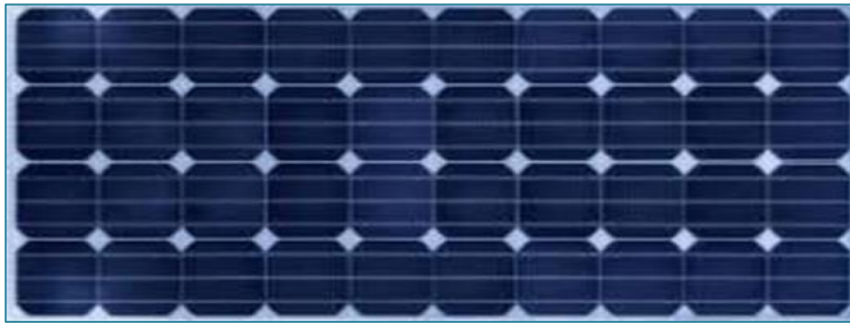


Figure I 9:Module photovoltaïque [14]

### I.7.1 Caractéristiques d'un module

- La puissance de crête  $P_c$  : La puissance-crête (WC) d'un module photovoltaïque est la puissance électrique maximale qu'il peut fournir, dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m<sup>2</sup>).
- Tension à vide  $V_{oc}$  : Tension aux bornes du module à vide, pour un éclairement "plein soleil"
- Courant de court-circuit  $I_{cc}$  : Courant débité par un module en court-circuit c'est la plus grande valeur de courant généré par un module pour une tension nulle  $V_{pv}= 0$
- Point de fonctionnement optimum ( $U_m, I_m$ ) : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil,  $P_m = U_m * I_m$ .
- Rendement : 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 maximale que peut avoir la cellule :  $V_{oc} * I_{cc}$  [15]

### I.8 Panneaux photovoltaïques :

Un panneau photovoltaïque ou module photovoltaïque, est créé en mettant en parallèle et/ou en série plusieurs cellules photovoltaïques (PV). Ces modules sont fixés sur une structure métallique conçue pour supporter l'exposition au rayonnement solaire selon un angle d'inclinaison spécifique.

Ils sont interconnectés pour former des panneaux et des ensembles (champs) afin de répondre à divers besoins en énergie, comme illustré dans la figure ce dessous.[16]

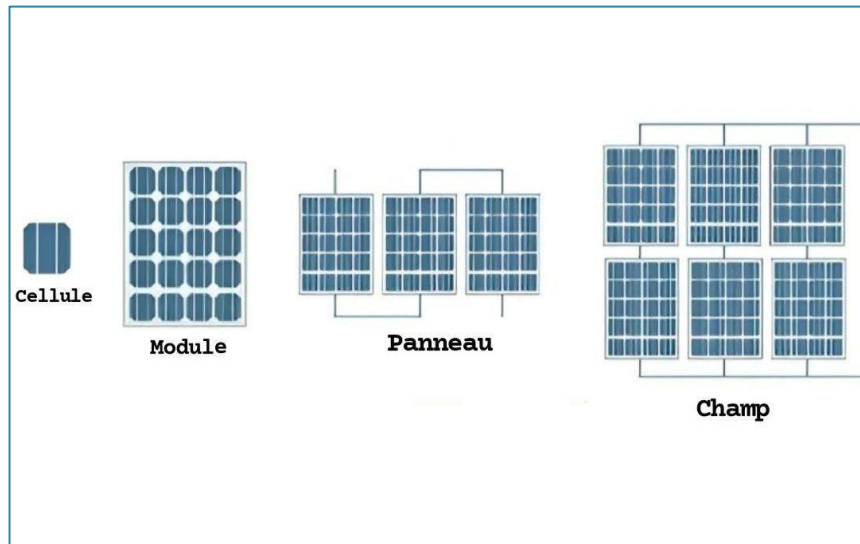


Figure I 10:Cellule, Module, Panneau et Champ photovoltaïque

### I.9 Convertisseurs statiques

Les convertisseurs statiques jouent un rôle essentiel dans l'adaptation de la tension fournie par les panneaux solaires ou les batteries pour répondre aux besoins des récepteurs fonctionnant sous des formes de tension différentes. Pour répondre à ces besoins, il existe deux types de convertisseurs spécifiques pour les panneaux solaires :

1. **Les hacheurs (DC/DC)** : ces convertisseurs permettent de transformer la tension DC d'origine en une tension DC différente, adaptée aux besoins spécifiques des récepteurs.
2. **Les onduleurs (DC/AC)** : ces convertisseurs permettent de convertir la tension DC en une tension alternative, ce qui permet d'alimenter des récepteurs fonctionnant sous une forme de tension alternative.[17]

#### I.9.1 Onduleur

Les onduleurs sont utilisés pour générer une tension alternative, soit à une fréquence fixe, soit variable, afin d'alimenter certains équipements de manière autonome, sans nécessiter de connexion au réseau électrique principal. Leur coût élevé ainsi que la variabilité de l'ensoleillement et du couple résistant des pompes ont historiquement limité l'utilisation des moteurs à courant alternatif dans le pompage solaire. Leur fonction principale est de convertir une tension continue fixe en une tension alternative monophasée ou triphasée, respectivement un courant. Différents types d'onduleurs sont disponibles :

- Les onduleurs à onde sinusoïdale modifiée, qui produisent une onde similaire à une onde sinusoïdale, mais avec des variations distinctes.

## Chapitre I: Généralités sur les systèmes photovoltaïques

- Les onduleurs à modulation de largeur d'impulsion (MLI), qui ajustent la largeur des impulsions pour obtenir la tension désirée.
- Les onduleurs à onde sinusoïdale, qui génèrent une onde de forme sinusoïdale [18]

### I.9.2 Hacheur

Les hacheurs sont des dispositifs de conversion de type continu-continu, permettant d'ajuster une tension continue à partir d'une tension continue fixe. Ils sont employés pour réguler la vitesse des moteurs à courant continu et dans les alimentations à découpage.

Ces convertisseurs peuvent prendre différentes configurations, telles que les élévateurs de tension (Boost), les abaisseurs de tension (Buck), ou les abaisseurs-élévateurs (Buck-Boost). [19]

#### I.9.2.1 Convertisseur Buck (hacheur série)

Le hacheur série représente un convertisseur DC-DC directement fonctionnel. Il utilise une source d'alimentation en tension continue en entrée et produit une charge en sortie de type source de courant (abaisseur de tension). Les éléments clés de ce dispositif, tels que l'inductance (L), le commutateur (S), la diode (D) et le condensateur (C), sont identifiés dans la figure (I.12). Le condensateur se charge par le biais du commutateur (S) et maintient la tension à ses bornes jusqu'à ce que le commutateur (S) s'ouvre. À ce moment-là, il libère son énergie à travers la diode vers la charge (R) pour un cycle de fonctionnement [20]

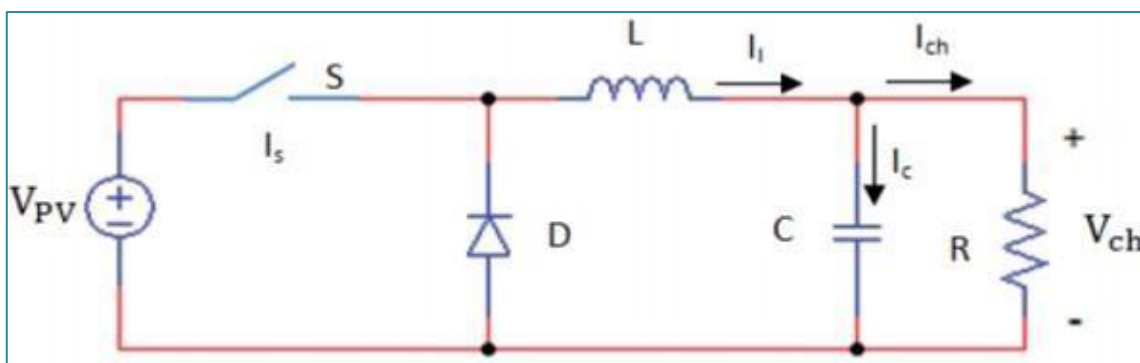


Figure I 11: Circuit électrique du hacheur Buck [20]

#### I.9.2.2 Convertisseur Boost (hacheur parallèle)

Le hacheur parallèle c'est un convertisseur direct DC-DC «Boost » permet de convertir une tension d'entrée continue en une autre tension continue aussi en sortie mais de valeur supérieure à celle de l'entrée (élévateur de tension). [20]

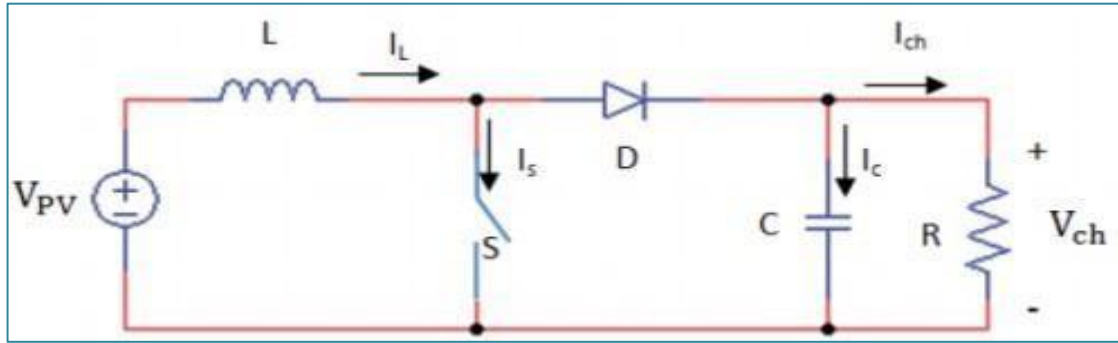


Figure I 12:Circuit électrique du hacheur Boost [20]

Son fonctionnement est comme suit :

Pendant la première phase ( $\alpha T$ ), le commutateur (S) est en position fermée, ce qui entraîne une croissance progressive du courant dans l'inductance. Au fil du temps, l'inductance accumule de l'énergie jusqu'à la fin de cette première période. Lorsque l'interrupteur (S) est ouvert, l'inductance (L) réagit en s'opposant à la diminution du courant ( $I_L$ ), ce qui engendre une tension supplémentaire ajoutée à la tension de la source. Cette tension combinée est ensuite appliquée à la charge (R) via la diode (D). [20]

### I.9.2.3 Convertisseur Buck-Boost :

Un convertisseur Buck-Boost est un dispositif d'alimentation à découpage utilisé pour convertir une tension continue en une autre tension continue, soit de valeur inférieure, soit de valeur supérieure. Notamment, la polarité de la tension de sortie est opposée à celle de la tension d'entrée. [20]

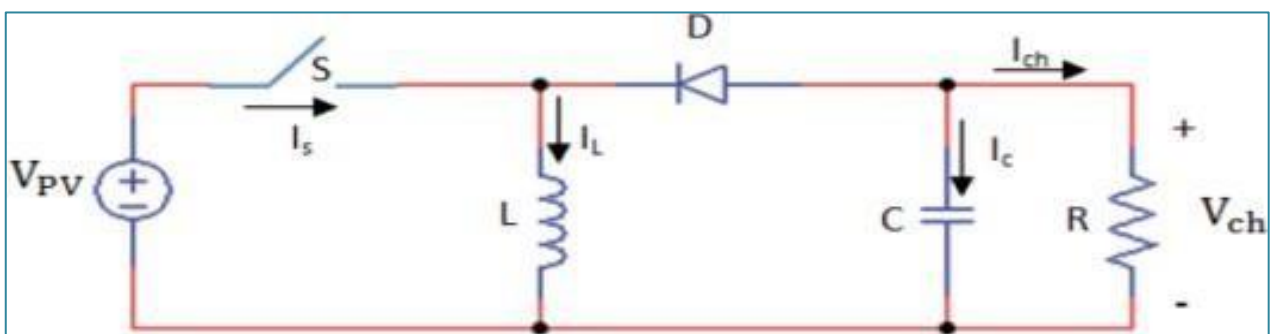


Figure I 13:Circuit électrique du hacheur Buck-Boost [20]

La polarité de la tension de sortie est inverse à celle de la tension d'entrée. Lorsque le commutateur (S) est en position (on), le courant dans l'inductance augmente, accumulant de l'énergie. En revanche, lorsque le commutateur (S) passe en position (off), la tension à travers l'inductance (L) est inversée, ce qui entraîne le transfert de l'énergie stockée vers la charge (R) via la diode (D). [20]

### I.10 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

#### a) Les avantages de l'énergie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque offre divers avantages, parmi lesquels nous pouvons citer les éléments suivants :

- L'énergie solaire est une source renouvelable
- Les cellules photovoltaïques sont composées de silicium, un matériau non toxique et abondant (le deuxième matériau le plus présent sur Terre).
- L'énergie solaire photovoltaïque fournit de l'électricité aux zones rurales les plus éloignées.
- La vente du surplus de production permet de rentabiliser les investissements voire de générer des revenus.
- L'énergie photovoltaïque est entièrement adaptable et peut ainsi répondre à une variété de besoins. [21]

#### b) Inconvénients de l'énergie photovoltaïque

Tout comme d'autres systèmes, l'énergie photovoltaïque présente certains inconvénients, parmi lesquels on peut citer les éléments suivants :

- La durée de vie d'une installation photovoltaïque n'est pas infinie mais généralement de l'ordre de 20 à 30 ans, et le rendement des cellules diminue avec le temps.
- Les modules photovoltaïques ne fonctionnent pas en l'absence d'énergie solaire.
- Le rendement réel de conversion des modules est limité (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%).
- Dans le cas d'une installation photovoltaïque autonome ne revendant pas son surplus d'électricité au réseau, l'inclusion de batteries est nécessaire, ce qui représente un coût élevé.
- Les panneaux photovoltaïques ont un coût d'investissement significatif offrir une longue durée de vie [21]

### I.11 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons abordé de manière générale le système photovoltaïque en examinant en détail ses composants. Dans la suite, nous allons procéder à la modélisation du module photovoltaïque, du hacheur survolteur et de l'onduleur, puis nous réaliserons une simulation du système global à l'aide de Matlab Simulink.

# Chapitre II

Modélisation des éléments d'un système photovoltaïque

## Chapitre II: Modélisation des éléments d'un système photovoltaïque

### II.1 Introduction

Après avoir examiné les divers composants de l'installation photovoltaïque, nous entamons sa modélisation. Cette étape nécessite l'élaboration d'un ensemble d'équations caractérisant chaque élément du système. Ce chapitre se consacrera donc à la représentation mathématique des divers éléments de l'installation photovoltaïque.

### II.2 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

Il existe plusieurs modèles électriques qui caractérisent le fonctionnement des cellules photovoltaïques. Tous ces modèles considèrent la cellule PV comme un générateur de courant idéal. En général, on distingue trois modèles différents en fonction de la modélisation électrique des comportements physiques de la cellule. [22]

#### II.2.1 Cas d'une cellule simplifiée

Afin de modéliser plus précisément le comportement de la cellule solaire, un modèle électrique équivalent est proposé. Ce modèle, illustré sur la figure II.10, comprend une source de courant  $I_{ph}$  en parallèle avec une diode. Une résistance série  $R_s$  est également intégrée pour prendre en compte les pertes ohmiques au sein de la cellule

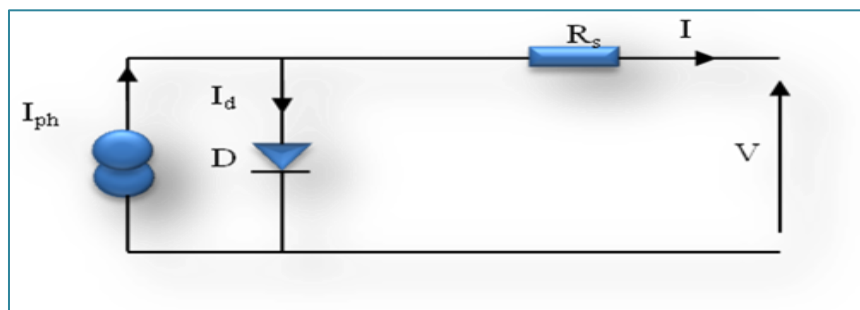


Figure II 1 Modèle de cellule photovoltaïque simplifiée [22]

Les équations retenues de ce modèle sont :

En appliquant la loi des nœuds :

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



## Chapitre II: Modélisation des éléments d'un système photovoltaïque

Avec

$I_{ph}$  : constant pour un éclairage donné

$$I_d = I_s \left( \exp\left(\frac{V + I R_s}{A V_t}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.2})$$

Avec :

A : Facteur d'idéalité de la diode

Le courant fourni par ce modèle est donc donné par :

$$I = I_{ph} - I_s \left( \exp\left(\frac{V + I R_s}{A V_t}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.3})$$

### II.2.2 Cas d'une cellule à une diode

C'est un modèle similaire au modèle simplifié. Comme le montre la figure II.2, il comprend une source de courant et une diode en parallèle avec une résistance en série. Cependant, dans ce modèle, une résistance shunt  $R_{sh}$  est ajoutée, ce qui a une grande influence sur le courant généré par le modèle et le rend proche du courant d'une cellule réelle. La résistance shunt modélise les pertes autour de la jonction dues aux impuretés et aux coins de la cellule [22]

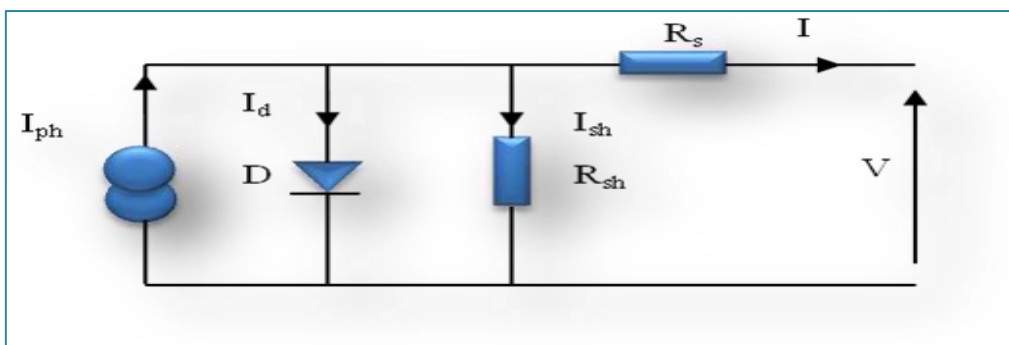


Figure II 2: Modèle de la cellule photovoltaïque à une diode [22]

En appliquant la loi de Kirchhoff, le courant sera obtenu par l'équation suivante :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (\text{II.4})$$

## Chapitre II: Modélisation des éléments d'un système photovoltaïque

Avec :

- I : est le courant délivré par la cellule (A)
- $I_{ph}$  : est le photo courant (A)
- $I_d$ : est le courant de seuil de la diode(A)
- $I_{sh}$ :est le courant qui parcourt la résistance  $R_{sh}$ (A)

Le courant qui circule dans la résistance parallèle  $R_{sh}$ , est donné par l'équation suivante :

$$I_{sh} = \left( \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \right) \quad (II.5)$$

Avec:

- $R_s$  :est un résistance série( $\Omega$ )
- $R_{sh}$ :est un résistance parallèle( $\Omega$ )
- V :la tension à la sortie du panneau(V)

Donc le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque se met sous la forme mathématique suivante :

$$I = I_{ph} - I_s \left( \exp\left(\frac{V + IR_s}{A V_t}\right) - 1 \right) - \left( \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \right) \quad (II.6)$$

### II.3 Modélisation d'un hacheur survolteur (BOOST)

Le convertisseur boost est l'un des convertisseurs statiques couramment utilisés. Il s'agit d'un hacheur parallèle conçu pour élever la tension continue d'une valeur basse à une valeur élevée. Ce type de convertisseur est choisi lorsqu'il est nécessaire d'augmenter la tension disponible à partir d'une source continue. Le circuit représentant le convertisseur boost, également appelé élévateur de tension, est illustré comme :

[23]

## Chapitre II: Modélisation des éléments d'un système photovoltaïque

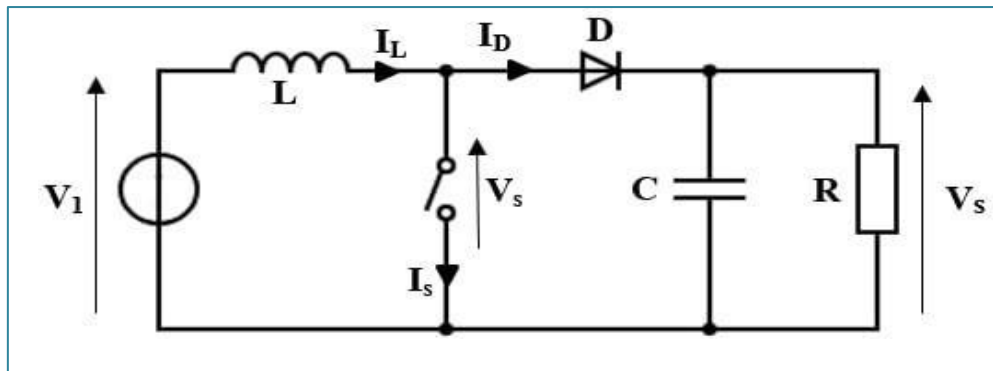


Figure II 3:Circuit électrique de hacheur Boost

Lorsque l'interrupteur S est fermé et la diode D est bloquée durant l'intervalle  $(0 < t < \alpha T)$ , le circuit équivalent est le suivant :

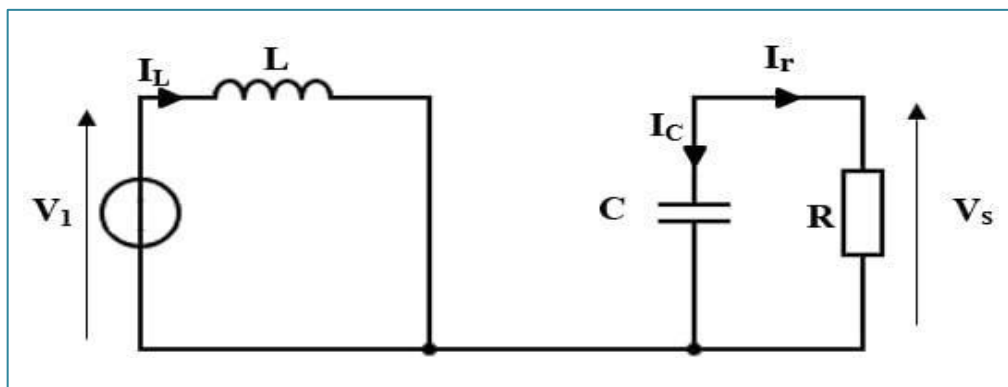


Figure II 4:Circuit équivalent d'un hacheur Boost avec interrupteur fermé

On a:

$$V_e = L \frac{di}{dt} \quad (\text{II.7})$$

$$I_L = I_{\min} + \frac{V_e}{L} t \quad (\text{II.8})$$

$$I_{\max} = I_{\min} + \frac{V_e}{L} \alpha T \quad (\text{II.9})$$

- $I_{\min}$  : Valeur minimale du courant dans l'inductance au temps  $t=0$ .
- $I_{\max}$  : Valeur maximale du courant dans l'inductance au temps  $t=\alpha T$ .

L'expression de l'ondulation du courant dans l'inducteur,  $\Delta i_L = I_{\max} - I_{\min}$ , peut être formulée à travers l'équation suivante, qui représente précisément cette variation de courant dans l'inducteur.

## Chapitre II: Modélisation des éléments d'un système photovoltaïque

$$\Delta i_L = \frac{\alpha V_e}{L} T \quad (\text{II.10})$$

Avec :

- F : fréquence de commutation.
- L : valeur de l'inductance (H).
- $V_e$  : tension aux bornes du générateur (V).
- T : période de commutation du signal du commutateur  $T = 1/f_p$  en secondes (s).
- $\alpha$  : rapport cyclique du signal de commutation  $\alpha = t_{on}/T$ .
- $i_L$  : courant d'inductance.

Lorsque S est ouvert et D est fermé pendant l'intervalle ( $\alpha T < t < T$ ), le circuit électrique devient comme indiqué sur la figure (II.5) :

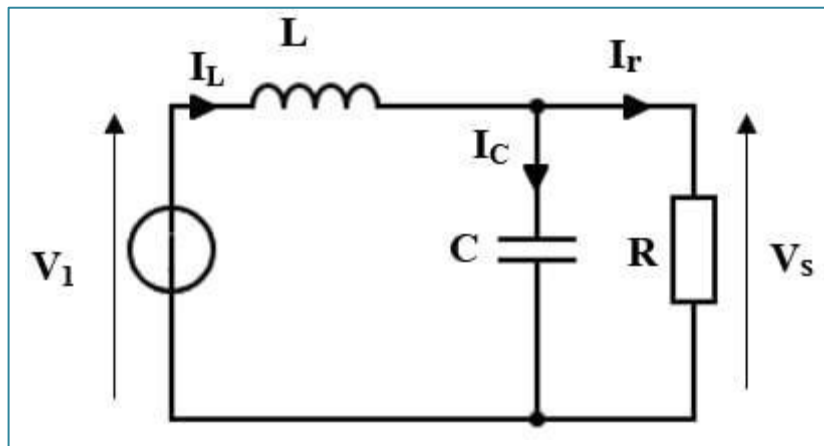


Figure II 5: Circuit équivalent d'un hacheur Boost avec interrupteur ouvert

On a donc :

$$L \frac{di_L}{dt} = V_e - V_s \quad (\text{II.11})$$

$$i_L = I_{\max} + \frac{V_e - V_s}{L} (t - \alpha T) \quad (\text{II.12})$$

$$I_{\min} = I_{\max} + \frac{V_e - V_s}{L} (t - \alpha T) T \quad (\text{II.13})$$

## Chapitre II: Modélisation des éléments d'un système photovoltaïque

L'égalité des deux équations d'ondulation du courant (II.15) et (II.16) donne la valeur moyenne de la tension de sortie  $V_s$  :

$$V_s = \frac{1}{1-\alpha} V_e \quad (\text{II.14})$$

de sortie du convertisseur Boost ne dépend que de la tension d'entrée et du rapport cyclique  $\alpha$ , qui est toujours compris entre 0 et 1. Cela signifie que le convertisseur Boost est toujours capable d'élever la tension, sans être influencé par les caractéristiques de la charge finale.

En utilisant le principe de conservation de l'énergie entre l'entrée et la sortie du convertisseur, nous pouvons calculer la valeur moyenne du courant circulant dans l'inductance comme suit :

$$I_L = \frac{1}{1-\alpha} I_s \quad (\text{II.15}) \quad [23]$$

### II.4 La commande MPPT

La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) est un élément essentiel des systèmes photovoltaïques (PV) qui vise à optimiser la production d'énergie en recherchant en permanence le point de fonctionnement optimal du générateur PV. Ce point de fonctionnement dépend des conditions météorologiques et de la charge. Son principe de régulation repose sur l'ajustement automatique du rapport cyclique  $\alpha$  à une valeur appropriée afin de maximiser la puissance de sortie du panneau PV.

Diverses publications sur des commandes assurant un fonctionnement de type MPPT apparaissent régulièrement dans la littérature depuis 1968, date de publication de la première loi de commande de ce type, adaptée à une source d'énergie renouvelable de type PV. [24]

#### II.4.1 Le principe de fonctionnement :

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 statique place le système au point de fonctionnement maximum (VPPM et IPPM). La chaîne de conversion photovoltaïque sera optimisée à travers un

## Chapitre II: Modélisation des éléments d'un système photovoltaïque

Convertisseur statique (CS) commandé par une MPPT II peut être représenté par le schéma de la figure suivant : [25]

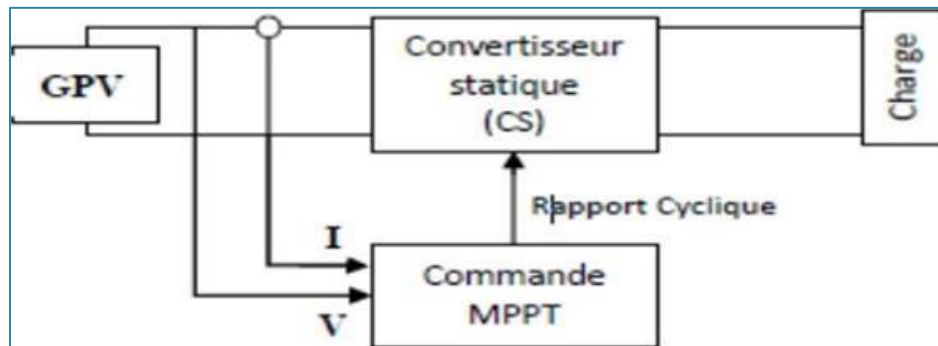


Figure II 6: Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge.[26]

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 par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le MPP. [27]

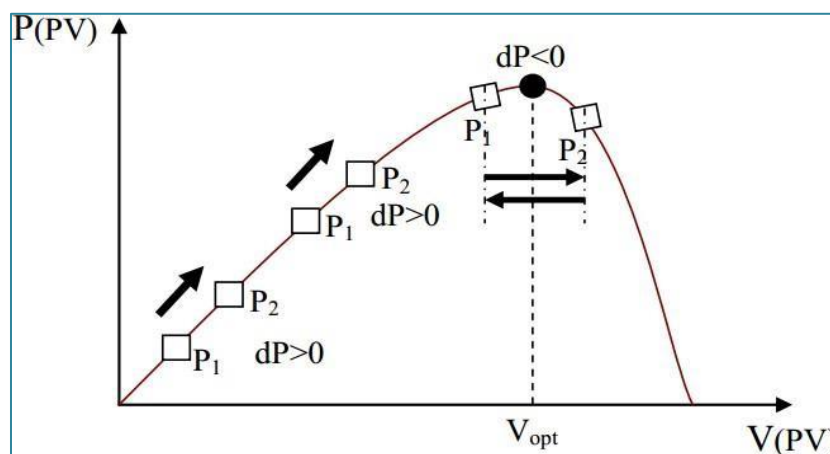


Figure II 7: Principe de fonctionnement d'une commande MPPT. [29]

### II.4.2 Les algorithmes MPPT :

Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPT plus ou moins

## Chapitre II: Modélisation des éléments d'un système photovoltaïque

performantes basées sur les propriétés du GPV. Une synthèse des principaux modes de recherche du PPM existants dans ce chapitre nous a permis de bien identifier l'existant et les points qu'il restait à améliorer. Ceci a constitué la base théorique pour nos travaux concernant les simulations dans le chapitre suivant.

### II.4.2.1 la commande incrémentale de conductance

L'algorithme d'incrémental de conductance (IC) est une méthode classique de suivi du point de puissance maximale (MPPT) qui se base sur deux capteurs pour mesurer la tension de fonctionnement  $V$  et le courant  $I$  du module photovoltaïque (PV). Son objectif est de déterminer la conductance du module PV et d'analyser son impact sur le point de fonctionnement par rapport au point de puissance maximale (PPM). La conductance du module photovoltaïque est ainsi définie comme le rapport entre le courant et la tension du module PV, comme présenté ci-dessous :

$$G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad (\text{II.16})$$

Et une variation incrément de conductance peut être définie par :

$$dG = \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (\text{II.17})$$

Cette méthode nous permettra de déterminer la position du point de fonctionnement par rapport au PPM en analysant le signe de la dérivée de la puissance du module photovoltaïque par rapport à la tension  $V$ .

Quand la dérivée de la puissance est nulle, cela indique que le point de fonctionnement se situe sur le PPM. Une dérivée positive signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du maximum, tandis qu'une dérivée négative indique que le point d'opération est à droite du maximum. Les conditions suivantes peuvent être déduites de la caractéristique puissance-tension du GPV : [28]

## Chapitre II: Modélisation des éléments d'un système photovoltaïque

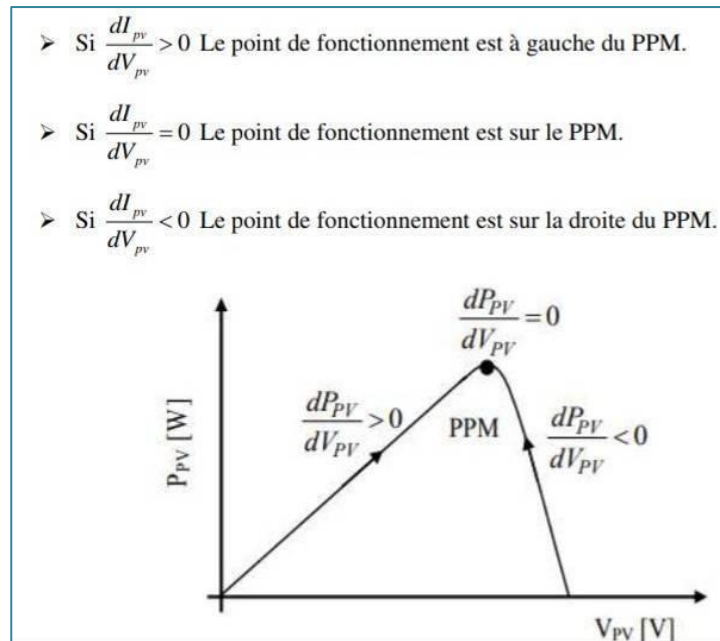


Figure II 8: Caractéristique de fonctionnement de la méthode IC

La relation entre la conductance et la dérivée de la puissance est établie par la relation suivante :

$$\frac{dp_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{d[I_{pv} * V_{pv}]}{dV_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} * \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} * \frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} \quad (II.18)$$

Cette relation nous permet de définir de nouvelles conditions pour déterminer la position du point de fonctionnement par rapport au PPM.

$$\text{Si } \frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} > -\frac{I_{pv}}{V_{pv}} \text{ le point de fonctionnement est à gauche du PPM}$$

$$\text{Si } \frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} = -\frac{I_{pv}}{V_{pv}} \text{ le point de fonctionnement est sur le PPM.}$$

$$\text{Si } \frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} < -\frac{I_{pv}}{V_{pv}} \text{ le point de fonctionnement est à droite du PPM}$$



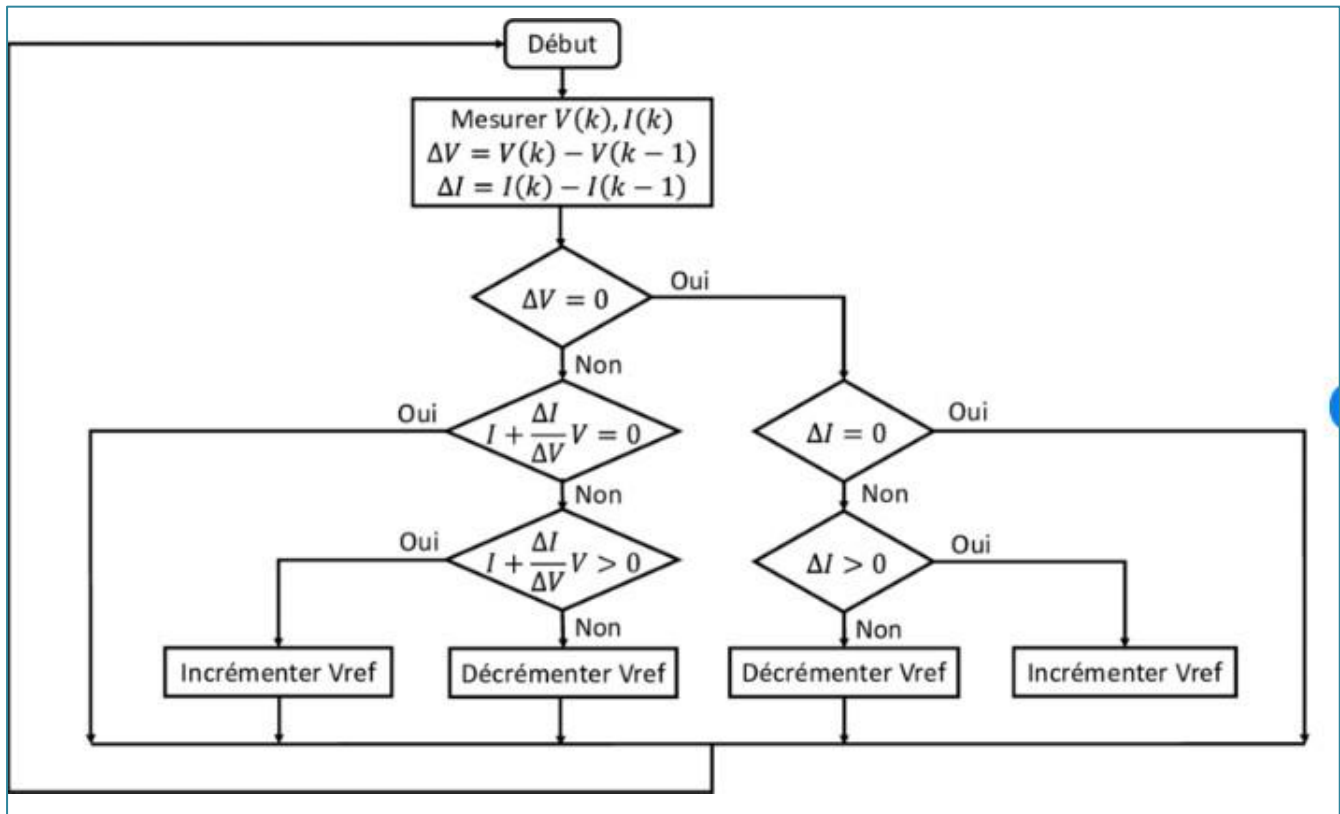


Figure II 9:Algorithme de la commande IC [29]

## II.5 Convertisseur DC-AC (onduleur) :

Il s'agit d'un dispositif conçu pour la conversion du courant continu produit par un générateur photovoltaïque en courant alternatif. Ce processus est réalisé au moyen de transistors de puissance ou de thyristors. L'onde de sortie est généralement sous forme de carré, ce qui permet une adaptation à certains types de charges, bien que cela entraîne des pertes considérables en cas de faible puissance. Les onduleurs sont couramment utilisés dans le domaine de l'électrotechnique pour deux fonctions principales :

- Fournir des tensions ou courants alternatifs avec des fréquences et amplitudes variables.
- Fournir une ou plusieurs tensions alternatives avec des fréquences et amplitudes fixes.[30]

## Chapitre II: Modélisation des éléments d'un système photovoltaïque

### II.5.1 Modélisation de l'onduleur triphasé

Ce modèle d'onduleur est souvent privilégié pour des utilisations nécessitant une grande capacité de puissance. Il est constitué de trois onduleurs monophasés en demi-pont (ou en pont), disposés en parallèle, générant ainsi trois tensions de sortie déphasées de 120 degrés les unes par rapport aux autres.

La figure(II.6) illustre la topologie d'un onduleur triphasé a six interrupteurs de puissance .Le décalage entre les signaux de commande est de 60°. [31]

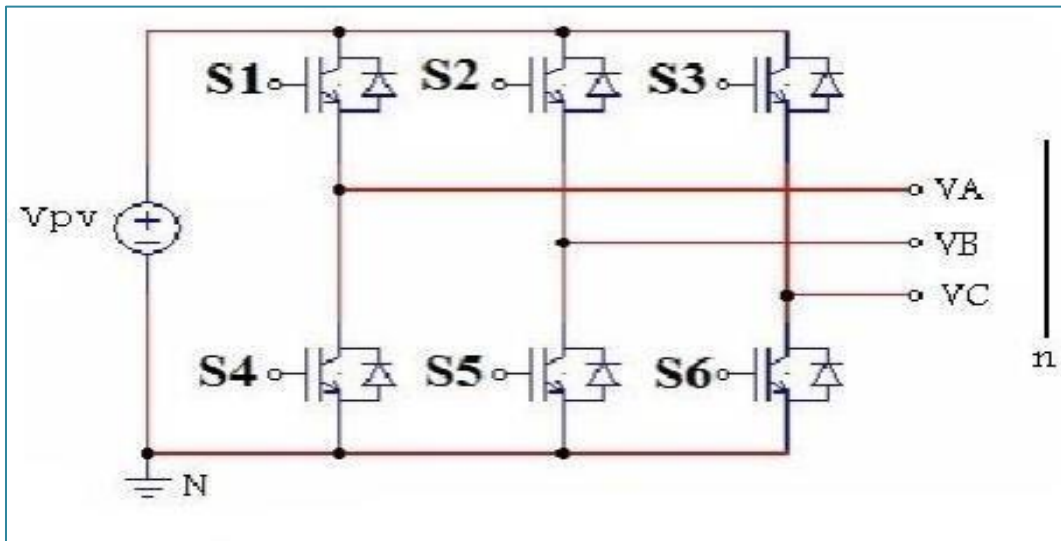


Figure II 10:Circuit équivalent d'un onduleur triphasé [31]

Dans le schéma de l'onduleur triphasé (figure II.5), les états des interrupteurs d'un même bras sont complémentaires. En utilisant ces états des interrupteurs, nous pouvons déterminer les tensions de branche de sortie de l'onduleur mesurées par rapport à la borne négative de la tension du côté continu comme suit :

$$V_{AN} = S1 * V_{PV}$$

$$V_{BN} = S2 * V_{PV} \quad (II.19)$$

$$V_{CN} = S3 * V_{PV}$$

Où  $S_1, S_2, S_3$  désignent les états des interrupteurs des phases A, B, C respectivement. Les tensions composées sont:

$$V_{AB} = V_{AN} + V_{NB} = V_{AN} - V_{BN} = (S1 - S2) V_{PV}$$

$$V_{BC} = V_{BN} + V_{NC} = V_{BN} - V_{CN} = (S2 - S3) V_{PV} \quad (II.20)$$

$$V_{CA} = V_{CN} + V_{NA} = V_{CN} - V_{AN} = (S3 - S1) V_{PV}$$

## Chapitre II: Modélisation des éléments d'un système photovoltaïque

Les tensions simples sont :

$$\begin{aligned}V_{AN} &= \left(\frac{2}{3}\right)V_{AN} - \frac{1}{3}(V_{BN} + V_{CN}) \\V_{BN} &= \left(\frac{2}{3}\right)V_{BN} - \frac{1}{3}(V_{AN} + V_{CN}) \\V_{CN} &= \left(\frac{2}{3}\right)V_{CN} - \frac{1}{3}(V_{AN} + V_{BN})\end{aligned}\tag{II.21}$$

:

### II.5.2 Commande de l'onduleur (Commande MLI)

La commande de l'onduleur (Commande MLI) vise à générer des ordres d'ouverture et de fermeture des interrupteurs pour ajuster la tension créée par l'onduleur de manière à ce qu'elle soit le plus proche possible de la tension de référence.

Pour obtenir des tensions sinusoïdales à la sortie de l'onduleur, on emploie une méthode appelée modulation de largeur d'impulsion (MLI ou PWM en anglais), où des signaux de commande à largeur variable sont appliqués aux interrupteurs à une fréquence constante. Cette approche consiste à comparer un signal sinusoïdal de référence de tension, avec une amplitude  $V_r$  et une fréquence  $V_f$ , à un signal triangulaire (appelé porteuse) de fréquence  $f_p$  et d'amplitude  $V_p$ . Le taux de modulation est défini comme le rapport entre l'amplitude de la tension de référence et la valeur crête de l'onde de modulation. Ensuite, le résultat de cette comparaison est utilisé pour contrôler les transistors de puissance qui gèrent chaque phase de l'onduleur. Chaque phase est commandée par un ensemble similaire, mais décalé de 120 degrés par rapport aux autres. Ce principe de commande est illustré dans la figure (II.11)

## Chapitre II: Modélisation des éléments d'un système photovoltaïque

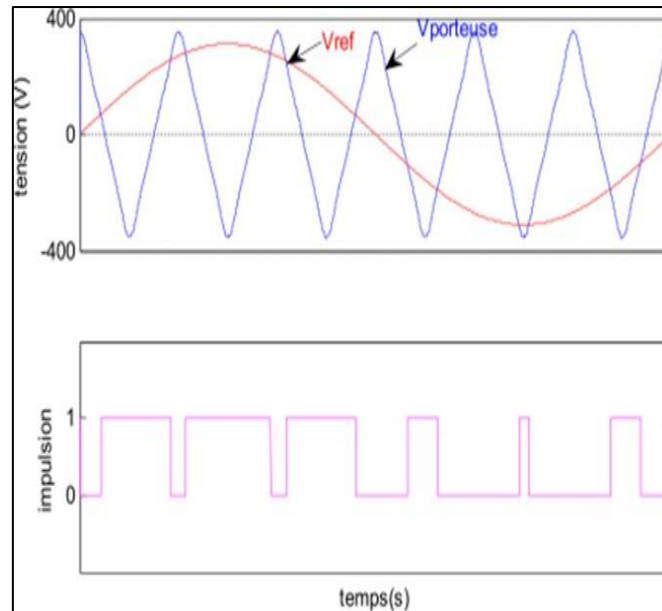


Figure II 11: La modulation de largeur d'impulsion

La méthode de modulation de largeur d'impulsion (MLI) est définie par :

- L'indice de modulation  $m$  qui représente le rapport entre la fréquence de la porteuse et celle de la référence (modulante)  $m = \frac{f_p}{f_r}$
- L'indice d'amplitude  $r$  qui représente le rapport entre l'amplitude de la référence et celle de la porteuse  $r = \frac{v_p}{v_r}$  [32]

### II.6 Conclusion

L'étude des systèmes photovoltaïques requiert initialement la création d'un modèle équivalent des composants essentiels tels que les générateurs photovoltaïques, les convertisseurs statiques. Une compréhension approfondie de leurs caractéristiques électriques est essentielle pour l'analyse en simulation. Ces modèles permettent de prédire le comportement du système et d'observer des phénomènes qui peuvent souvent être difficilement mesurés en conditions réelles.

Dans ce chapitre, nous avons développé le modèle de chacun de ces composants. Nous avons débuté par le générateur photovoltaïque, suivi de le hacheur boost utilisé pour optimiser le système afin d'extraire la puissance maximale du panneau solaire. . Enfin, l'onduleur de tension convertit l'énergie continue en énergie alternative, prête à être consommée par des charges alternatives ou injectée dans le réseau

# Chapitre III

Simulation du système photovoltaïque connecté au réseau

## Chapitre III: Simulation d'un système photovoltaïque connecte au réseau

### III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons effectuer la simulation d'un générateur PV raccordé au réseau. . Les courbes de la tension, du courant et de la puissance seront présentées à chaque étage du système depuis le générateur passant par l'hacheur boost vers l'onduleur et finalement arrivant au réseau électrique

### III.2 Le Système de Compensation Photovoltaïque proposée

Le système PV proposé contient un générateur photovoltaïque, un convertisseur survolteur « boost », une commande MPPT « incrémentale de conductance », l'onduleur de tension (DC-AC) commandé par MLI, un filtre RLC et le réseau électrique

### III.3 Simulation des différentes composantes de système

#### III.3.1 Simulation du générateur PV

Le module photovoltaïque est choisi pour la simulation. Il contient 60 cellules solaires du silicium multi cristallines,

Les caractéristiques physiques et électriques de ce panneau photovoltaïque sont données par la figure suivante

Eclairement standard $G$	1000W/m <sup>2</sup>
Température standard $T$	25°C
Puissance maximale $P_{max}$	213.5W
Tension à $P_{max}$ ou tension optimale $V_{opt}$	29V
Courant à $P_{max}$ ou courant optimale $I_{opt}$	7.35A
Courant de court-circuit $I_{SC}$	7.84A
Tension à circuit ouvert $V_{C0}$	36.3V
Nombre des cellules en séries	10
Coefficient de la température de $I_{SC}$	0.102A/°C
Coefficient de température de $V_{C0}$	-0.36099V/°C
Courant de saturation $I_0$	2.9273e-10
Résistance série $R_s$	0.39381ohms
Résistance shunt $R_{shunt}$	313.0553ohms

Figure III 1:Caractéristique de générateur PV

## Chapitre III: Simulation d'un système photovoltaïque connecte au réseau

### III.3.2 Simulation du générateur à éclairement variable :

Afin d'observer l'influence des conditions externes, de l'éclairement  $G$  sur les caractéristiques ( $I_{pv} = f(V_{pv})$ ) et ( $P_{pv} = f(V_{pv})$ ) nous avons adopté la méthode suivante :

Pour visualiser l'influence de l'éclairement, on fixe la température ambiante ( $T = 25^\circ\text{C}$ ) et on fait varier l'éclairement dans une gamme suffisante.

**Caractéristique** ( $I_{pv} = f(V_{pv})$ ) et ( $P_{pv} = f(V_{pv})$ )

**L'influence de l'éclairement sur la caractéristique** ( $I_{pv} = f(V_{pv})$ )

On remarque que le courant de court-circuit diminue fortement et une faible diminution de la tension de court-circuit avec la diminution de l'éclairement

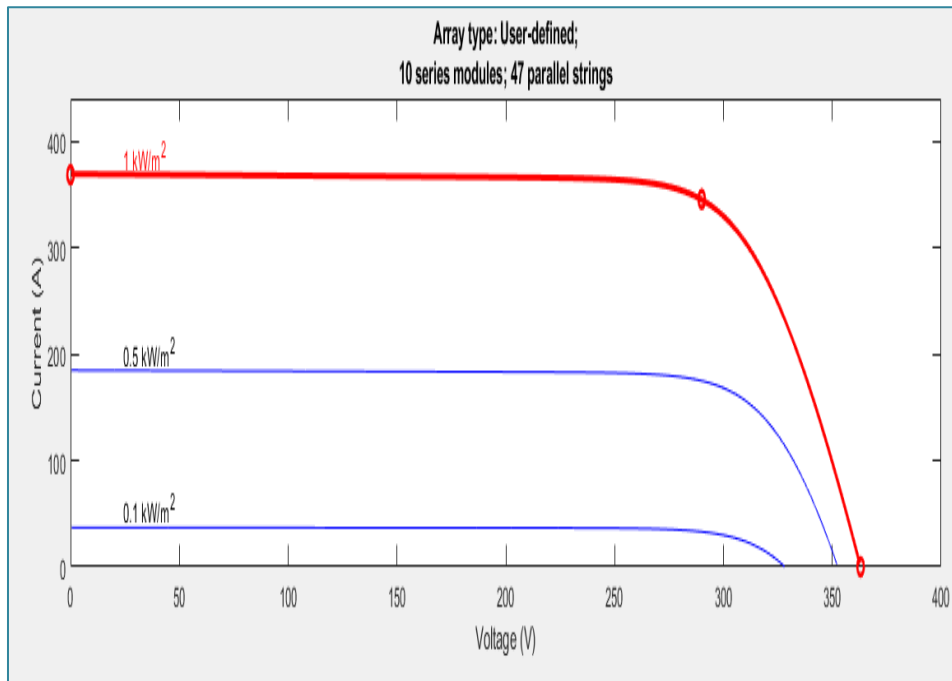


Figure III 2:Le courant en fonction de la tension

**L'influence de l'éclairement sur la caractéristique** ( $P_{pv} = f(V_{pv})$ )

On varie l'éclairement  $G = (100, 500, 1000) \text{ w/m}^2$  et on fixe la température la caractéristique est donné par la figure suivante :

### Chapitre III: Simulation d'un système photovoltaïque connecte au réseau

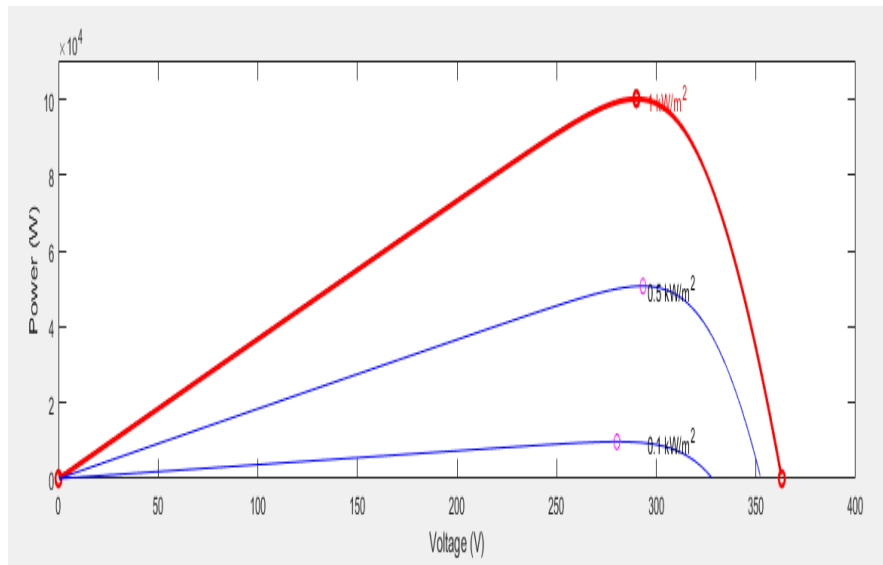


Figure III 3:La puissance en fonction de la tension

On remarque d'après la figure que la variation de l'éclairement influe sur la puissance du GPV, plus l'éclairement augmente plus la puissance augmente

#### III.3.3 Système photovoltaïque avec hacheur commandé en MPPT

Dans cette simulation nous avons utilisé le même générateur photovoltaïque avec un hacheur caractérisé par :

- Une résistance de 0,001ohm
- Capacité d'entrée C=1000mF
- Capacité de sortie C= 3827mF
- Un semi-conducteur de type IGBT

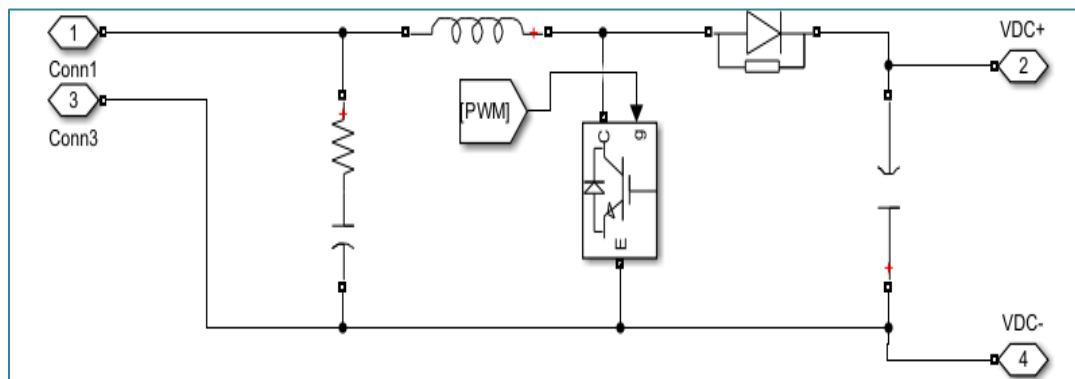


Figure III 4:Lehacheur Boost

Pour la commande MPPT nous avons utilisé un programme de type incrémentale de conductance le programme donné comme suit



### Chapitre III: Simulation d'un système photovoltaïque connecte au réseau

```
function Vref = RefGen(V,I)
Vrefmax=363;
Vrefmin=0.0;
Vrefinit=300;
deltaVref=1;
persistent Vold Pold Vrefold;
dataType = 'double';
if isempty (Vold)
    Vold=0;
    Pold=0;
Vrefold =Vrefinit;
end
P=V*I;
dV=V - Vold;
dP=P - Pold;
if dP ~= 0
if dP< 0
if dV< 0
Vref = Vrefold + deltaVref;
else
Vref = Vrefold - deltaVref;
end
else
if dV< 0
Vref = Vrefold - deltaVref;
else
Vref = Vrefold + deltaVref;
end
end
else Vref = Vrefold;
end

if Vref>= Vrefmax | Vref<= Vrefmin
Vref=Vrefold;
end
Vrefold=Vref;
Vold=V;
Pold=P;
```

## Chapitre III: Simulation d'un système photovoltaïque connecte au réseau

- **Les résultats de simulation**

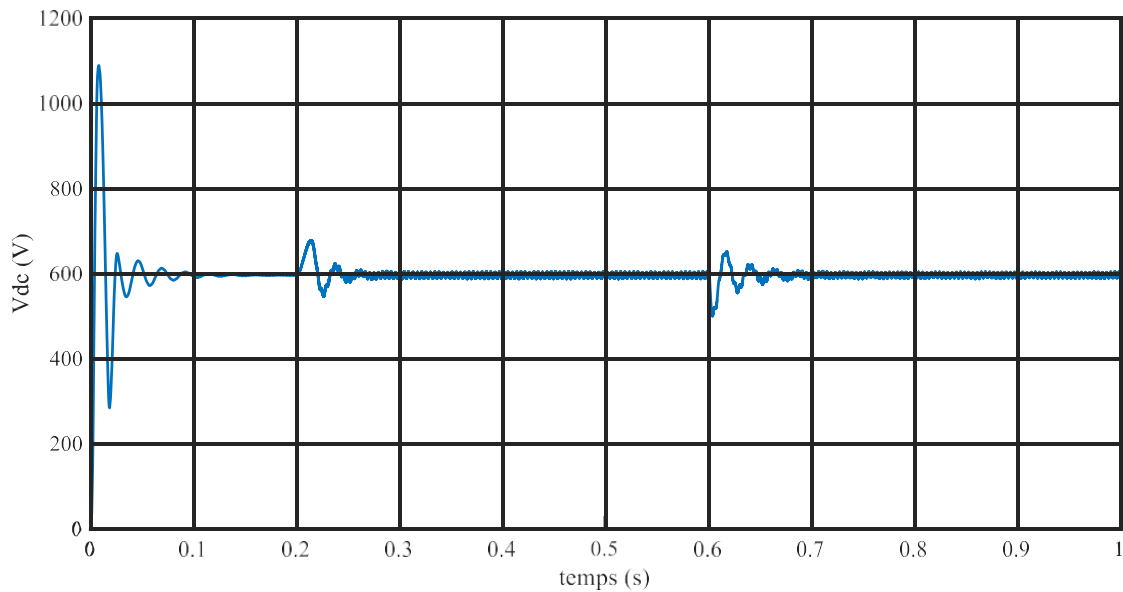


Figure III 5:La tension de sortie du hacheur Boost

D'après la figure précédente on remarque que la tension est constante ( $V_{dc} = 600V$ ) en fonction de temps malgré la variation de l'éclairement  $G = (100, 500, 1000)w/m^2$  tant qu'une partie change de tension on période courte

$t = (0,2 \ 0,25) s$  et  $t = (0,68 \ 0,85) s$  correspond au changement d'éclairement grâce à la commande MPPT

### III.3.4 Simulation de l'onduleur

L'onduleur utilisé est un onduleur de trois niveaux contient trois bras et chaque bras contient deux semi-conducteurs de type IGBT comme illustré dans la figure suivante :

### Chapitre III: Simulation d'un système photovoltaïque connecte au réseau

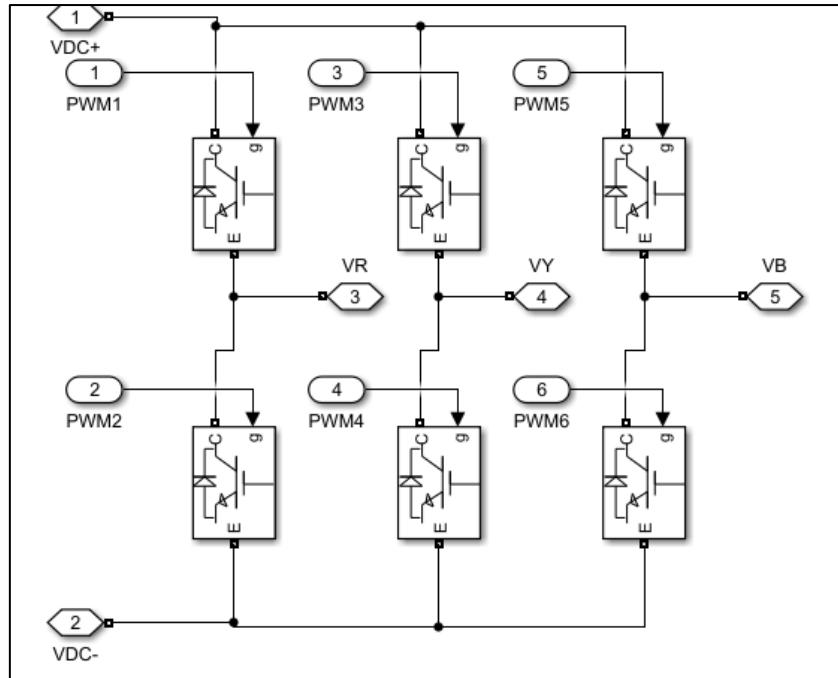


Figure III 6:Schéma de l'onduleur

Pour commander l'onduleur nous avons utilisé la commande MLI (sinus triangle)

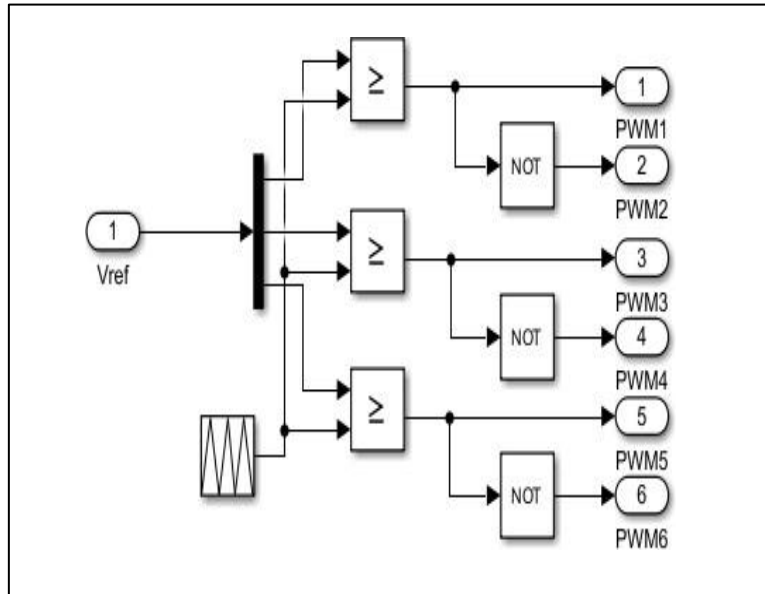


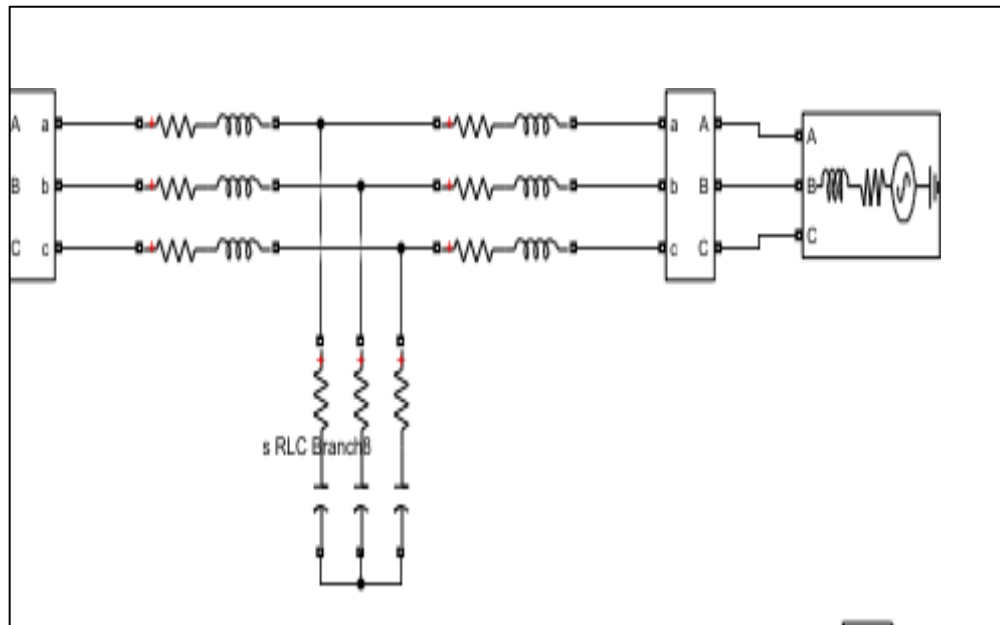
Figure III 7:La simulation de la commande MLI

## Chapitre III: Simulation d'un système photovoltaïque connecte au réseau

### III.4 Simulation de côté réseau

#### III.4.1 Schéma de simulation du réseau

On va utiliser un réseau BT(400V)avec une fréquence de50Hz raccordé à un filtre de lissage de courant.



III 1:Schéma de simulation de réseau

#### III.4.2 Le filtre LC

Le filtre **LC** élimine les harmoniques de découpage presque parfaitement et son comportement est quasiment idéal lorsqu'on travaille à vide (courant de sortie nul) et avec des signaux de fréquences voisines de la fréquence fondamentale.

Pour pouvoir connecter l'onduleur de tension en parallèle avec le réseau et le faire travailler comme une source de courant. Il est nécessaire d'utiliser un filtre de raccordement de nature inductive(**L** ou **LCL**).

La fonction de ce filtre permet d'une part de convertir le compensateur en dipôle de courant du point de vue du réseau. Et d'autre part de réduire la dynamique du courant. De façon à le rendre plus facile à contrôler

### Chapitre III: Simulation d'un système photovoltaïque connecte au réseau

Le filtre de type (L) permet de diminuer les harmoniques autour de la fréquence de commutation. Pour obtenir cela, la valeur de cette inductance doit être relativement élevée. Cependant cette augmentation peut mettre en risque la capacité de compensation du système. Le filtre(LCL)est l'autre alternative de raccordement. [33]

#### III.4.3 Simulation de réseau

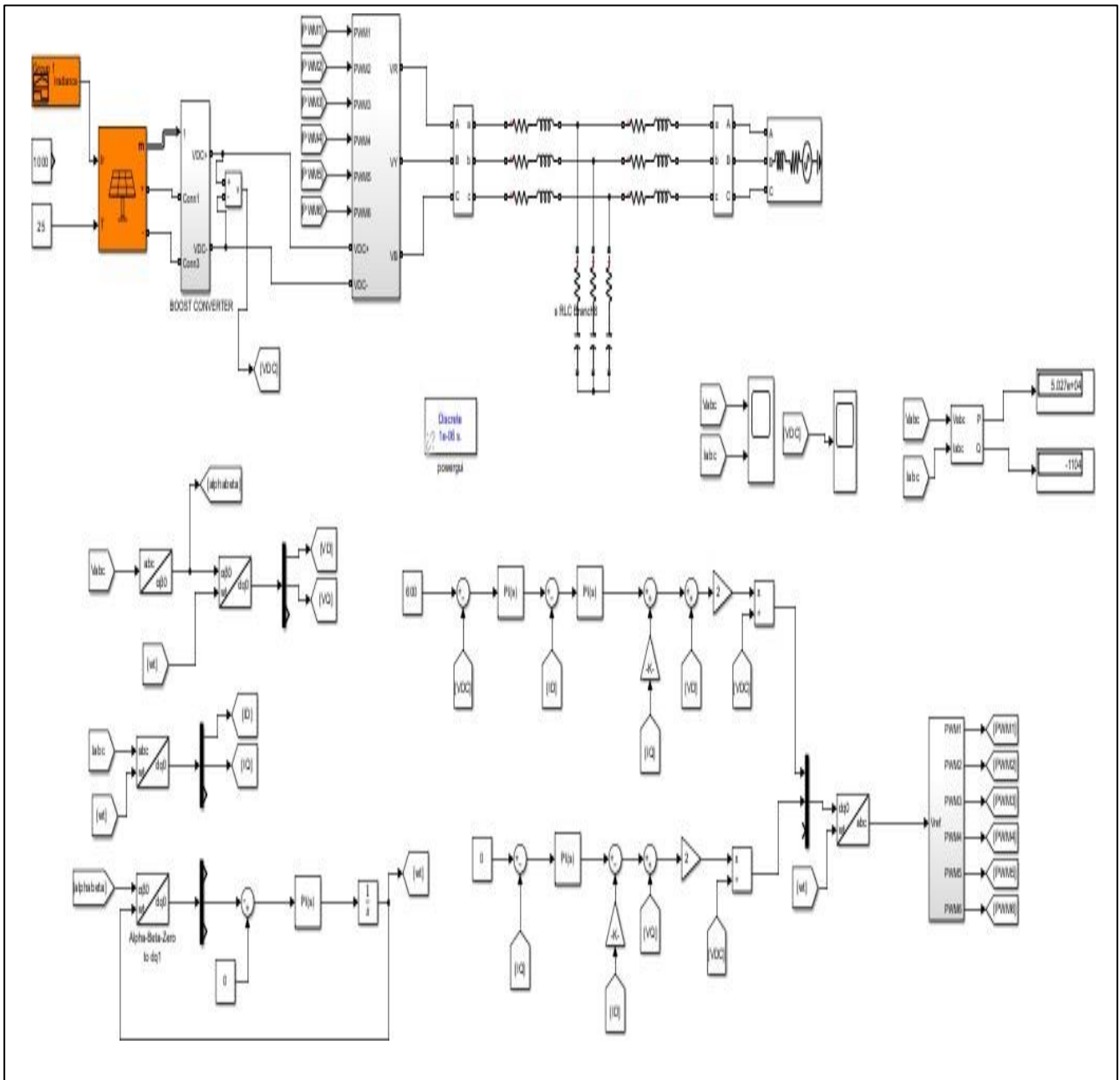


Figure III 8:Schéma global de la simulation de système

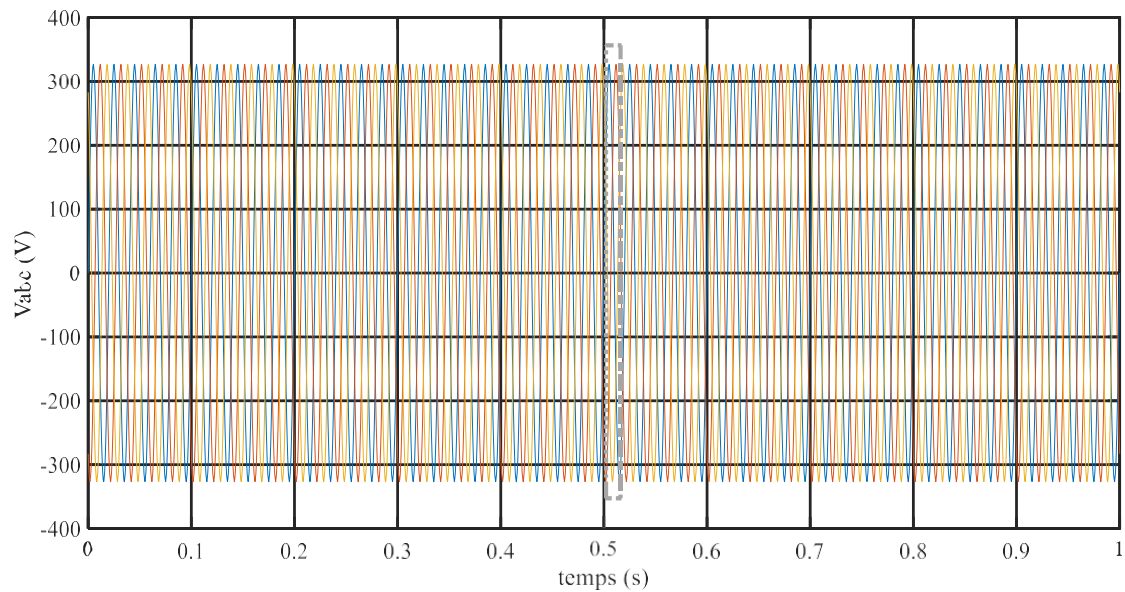
### Chapitre III: Simulation d'un système photovoltaïque connecte au réseau

Dans cette simulation nous avons utilisé un réseau de caractéristiques suivantes :

Tension phase a phase	400V
Angle de phase	0%
La fréquence	50HZ
La résistance	1e-6ohms
L'inductance	1e-6 H
Tension de base	400V

Figure III 9:Caractéristique de réseau

- **Les résultats de simulation de réseau**



### Chapitre III: Simulation d'un système photovoltaïque connecte au réseau

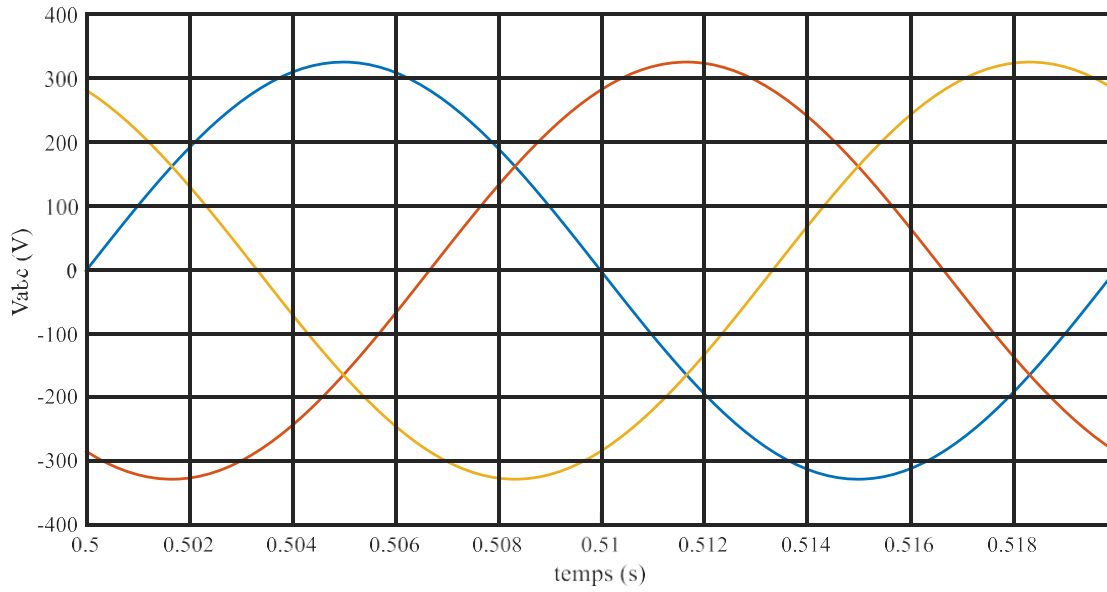
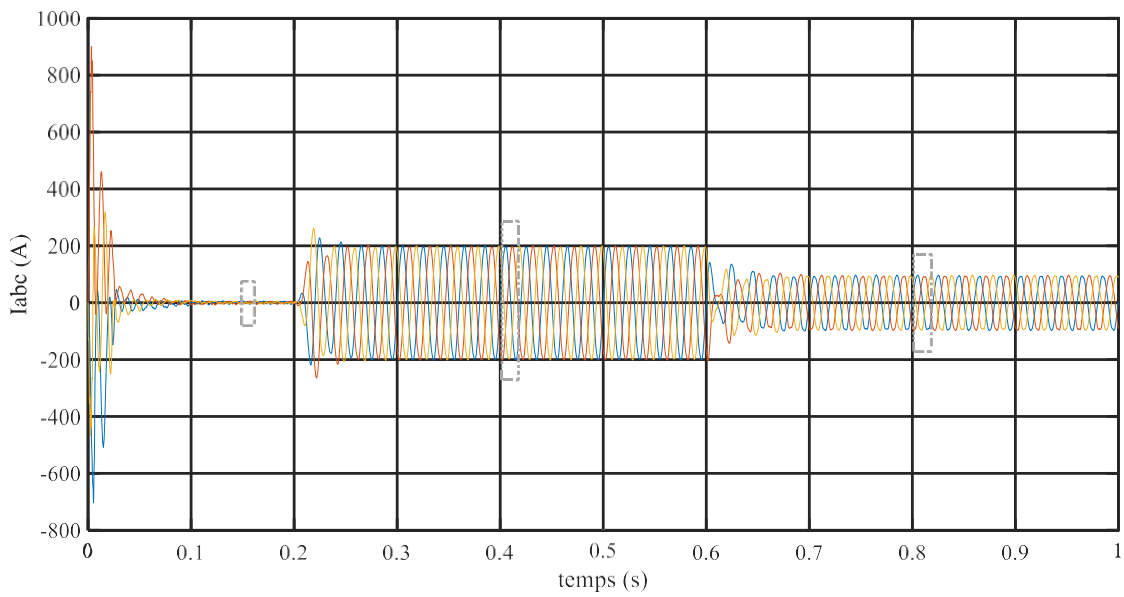
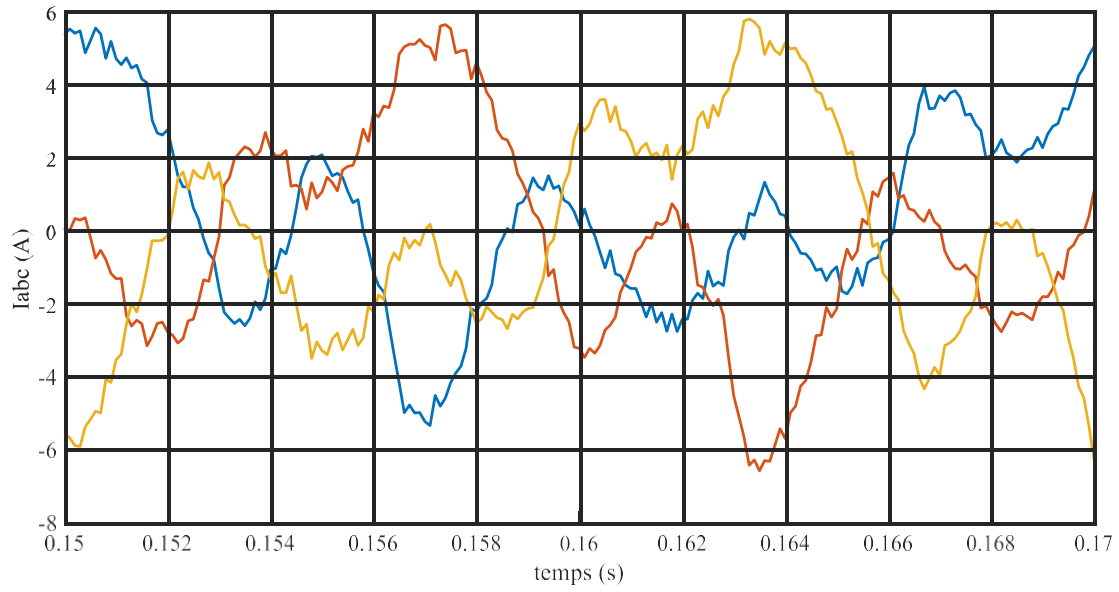


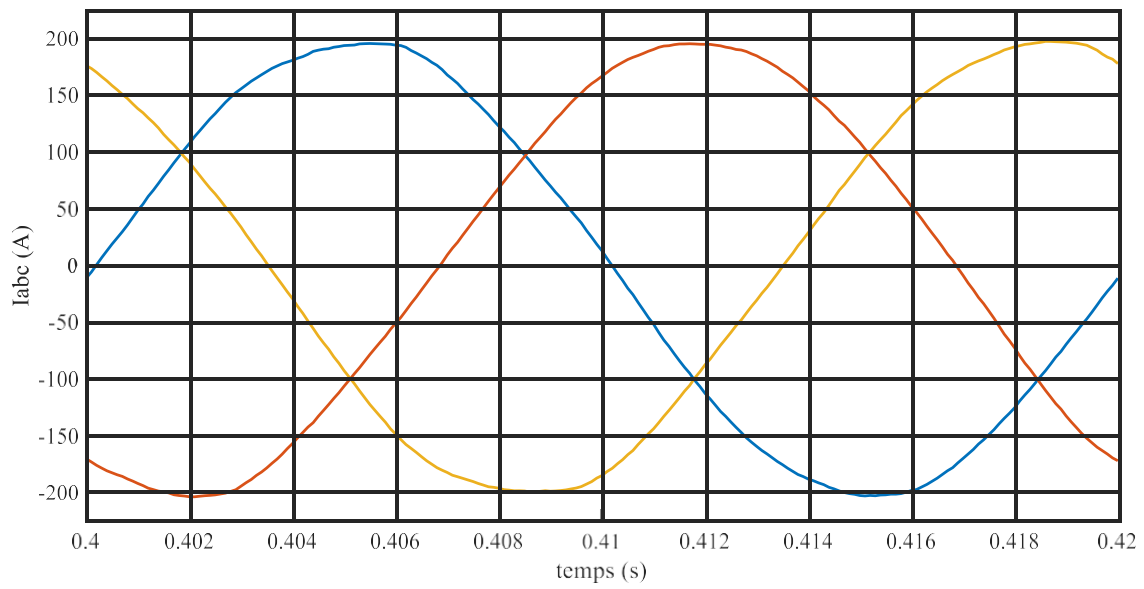
Figure III 10:La tension de réseau



### Chapitre III: Simulation d'un système photovoltaïque connecte au réseau



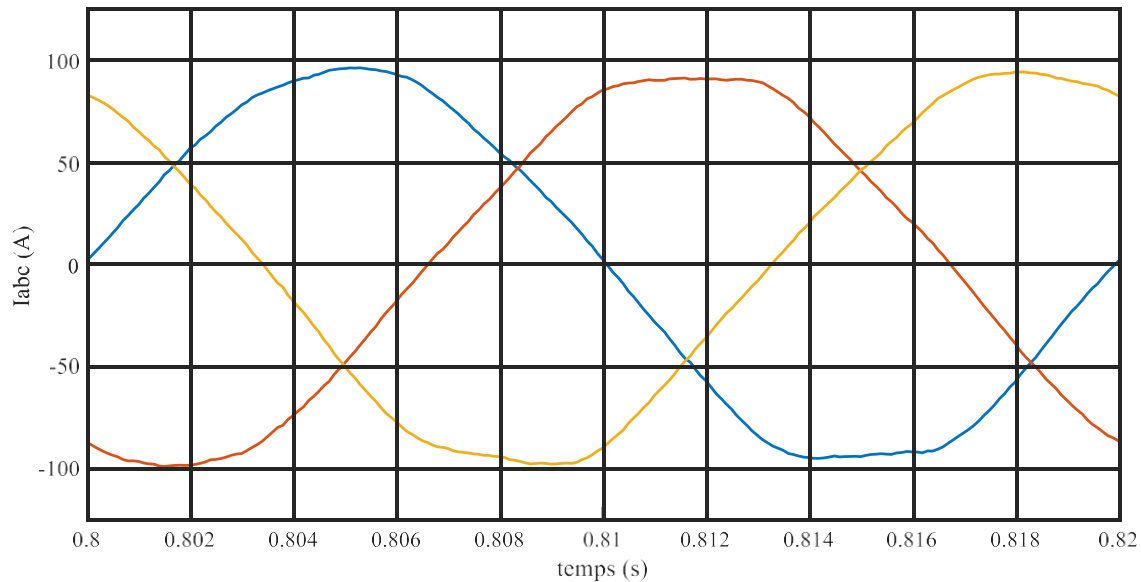
(zoom gauche)



(zoom milieu)



### Chapitre III: Simulation d'un système photovoltaïque connecte au réseau



(zoom droite)

Figure III 11:Le courant de réseau

D'après les figures précédentes on observe que la forme des courbes de courant et de tension Forni au réseau sont sinusoïdales et équilibré après la chute des filtres LC ; Dans notre simulation  $v=400V$  et le courant est différent selon la diminution et de la croissante de l'éclairement

### III.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la simulation du système photovoltaïque, connecté au réseau avec l'illustration des différentes opérations que subit la tension produite par le générateur PV l'analyse spectrale du courant et de la tension de réseau ont montré l'effet de la perturbation harmonique sur la qualité de l'énergie fournir par le GPV et les résultats de simulation ont montré l'efficacité de l'ajout d'un filtre à la sortie de l'onduleur pour améliorer la qualité de la tension et du courant injectés au réseau.

# Conclusion générale

## **Conclusion générale**

Ce mémoire traite des systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique. Ces systèmes connaissent un développement significatif, motivé par la diversification des méthodes de production et le respect de l'environnement. Les entreprises de petite ou moyenne taille peuvent contribuer à une production centralisée et à une meilleure gestion de l'électricité grâce à des ressources dispersées.

L'étude a porté sur les chaînes de production photovoltaïque et les modèles mathématiques permettant une estimation précise de la production d'énergie. La conversion d'énergie photovoltaïque a été optimisée par des commandes MPPT efficaces, notamment avec la méthode incrémentale de conductance

Depuis 2000, la recherche s'est concentrée sur la combinaison du photovoltaïque avec d'autres sources d'énergie, en se focalisant sur la compatibilité des architectures de conversion pour les réseaux centralisés. La connexion au réseau électrique a été modélisée avec un convertisseur DC/DC et DC/AC, simulé avec Matlab-Simulink.

L'intérêt pour les énergies renouvelables a conduit à l'étude des systèmes de décentralisation de la production photovoltaïque. Les systèmes sont classés en connexions directes et à bus intermédiaire, cette dernière étant celle étudiée. La synchronisation des courants de référence, souvent réalisée par PLL, est essentielle pour gérer les perturbations du réseau et maximiser la production d'énergie.

Cette étude souligne l'importance de la modélisation des connexions au réseau et des systèmes de production. Les technologies actuelles permettent une gestion flexible et adaptée aux défauts du réseau. L'utilisation des convertisseurs pour les systèmes photovoltaïques est sous-exploitée et mérite une investigation approfondie.

## IV Bibliographie

1. Ginsberg, M. (2019). *Solar Photovoltaic Power Optimization*. Routledge.
2. Machovec, G. (2013). *Solar Energy Index*. Elsevier.
3. J. Smith, A. Kumar, and L. Chen, "Grid-Connected Photovoltaic Systems: Design and Performance Analysis," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 15, no. 3, pp. 456-469, July 2023
4. Solaire Sans Frontières, "Systèmes Photovoltaïques Autonomes," *SSF Association*, 2023.
5. Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER), "Systèmes Photovoltaïques: Applications et Innovations," *Revue des Energies Renouvelables, Special Edition*, vol. 6, no. 4, pp. 123-145, 2023.
6. P. Solera, "5 Éléments Indispensables dans une Installation Solaire Photovoltaïque," *Psolera*, 2023.
7. Futura-Sciences, "Cellule Photovoltaïque," *Futura-Sciences*, 2023.
8. Planète Energies, "Cellule Photovoltaïque: Comment ça Marche," *Planète Energies*, 2023.
9. *Reflats de la Physique*, "Dossier Photovoltaïque," *Reflats de la Physique*, 2023.
10. *Photovoltaïque Info*. (2009). *Systèmes photovoltaïques : fabrication et impact environnemental*.
11. A.Ricaud, « Les convertisseurs photovoltaïques, Gisement solaire, cellules, modules et champs de modules » *European Master in Renewable Energy Valbonne*, Sept 2011.
12. *Énergie Plus*. (n.d.). *Caractéristiques électriques des cellules et des modules photovoltaïques*.
13. *Otovo*. (n.d.). *Module photovoltaïque*
14. *Phocos AG*. (n.d.). *What is a Photovoltaic (PV) Panel and What Does It Do*
15. Hadjadj, D., & Belkhir, O. *Études des caractéristiques d'un capteur solaire photovoltaïque et évaluation de ses performances sous différentes conditions climatiques*
16. *XPair*. (n.d.). *Panneau photovoltaïque*.
17. *Automation Sense*. (n.d.). *Les convertisseurs statiques : définition et exemples*.
18. F. L. Luo and H. Ye, *Advanced DC/AC Inverters*. CRC Press, 2017.
19. B. Benbouya, D. Ouabbas, « Etude des éléments de la chaîne de traction d'un véhicule électrique à base d'une machine asynchrone double étoile », *Mémoire de master, Université A.MIRA Bejaia*, 2019.
20. C. Alonso, « Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie », *Université Paul Sabatier, Toulouse III, Décembre 2003*.
21. *Gre-ENR*. (n.d.). *Avantages et inconvénients du photovoltaïque*.
22. *Thèses Algérie*. (n.d.). *Détection et isolation de défauts combinant des méthodes à base de données appliquées aux systèmes électro-énergétiques*. Université Ferhat Abbas - Sétif 1
23. F. L. Luo and H. Ye, *Advanced DC/DC Converters*. CRC Press, 2003.
24. S. White, *Solar Photovoltaic Basics*. Routledge, 2014.
25. R. K. Pachauri, J. K. Pandey, A. Sharmu, O. Nautiyal, and M. Ram, *Applied Soft Computing and Embedded System Applications in Solar Energy*. CRC Press, 2021.
26. S. Motahhir, *Performance Enhancement and Control of Photovoltaic Systems*. Elsevier,
27. H. J. Sira-Ramirez and R. Silva-Ortigoza, *Control Design Techniques in Power Electronics Devices*. Springer Science & Business Media, 2006.
28. T. Khatib and W. Elmenreich, *Modeling of Photovoltaic Systems Using MATLAB*. John Wiley & Sons, 2016
29. *Stratégies de Commande pour l'Optimisation des Systèmes Photovoltaïques Autonomes et Connectés au Réseau - Scientific Figure on ResearchGate..*
30. Q.-C. Zhong and T. Hornik, *Control of Power Inverters in Renewable Energy and Smart Grid Integration*. John Wiley & Sons, 2012.
31. Chouaf, F. (n.d.). *Commande d'un onduleur triphasé par MLI vectorielle*. Université d'Annaba.
32. S. Capitaneanu, *Optimisation de la fonction MLI d. Omniscryptum*, 2011.
33. Y. Sun, *Design of High Frequency Integrated Analogue Filters*. IET, 2002.

## **Résumé**

Ce travail présente un système de génération photovoltaïque connecté au réseau triphasé, et notre objectif c'est l'étude de raccordement d'un système photovoltaïque au réseau électrique. Ce système injecte de l'énergie solaire dans le réseau triphasé comme une puissance active à travers un système de conversion en deux étages, composées d'un convertisseur continu-continu(Boost) et un onduleur continu-alternatif. Le contrôleur MPPT est appliqué pour la poursuite du point de puissance maximale du système PV dans des conditions variables d'éclairement. La tâche de la poursuite du point de puissance maximale(MPPT) dans un système de puissance PV.

## **Mots-clés**

Système photovoltaïque, convertisseur DC-DC, convertisseur DC-AC, MPPT, réseau électrique

## **Abstract**

This work presents a three-phase grid-connected photovoltaic generation system our objective in this work is a study the connexion of photovoltaic generator with various network elements, the system and inject the solar energy into the power system as the active power by means of a two-stage conversion system, composed of a DC-DC Boost converter and a DC-AC inverter. The MPPT controller is applied to tracking the maximum power point of PV system -

## **Keywords:**

Photoelectric system, DC-DC converter, DC-AC converter, MPPT, the electric grid.