

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

*Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj*

*Faculté des Sciences et de la technologie*

*Département d'Electronique*

# **Mémoire**

*Présenté pour obtenir*

**LE DIPLOME DE MASTER**

**FILIERE : Electronique**

**Spécialité : Industries Electroniques**

Par

- **NEBBACHE AKRAM**
- **DEGDEG SADDEK**

*Intitulé*

***Etude et commande d'une chaine photovoltaïque connectée au réseau à travers un onduleur multi-niveaux de type PEC***

*Soutenu le :04/07/2023*

*Devant le Jury composé de :*

<i>Nom &amp; Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>M. BENTOUHAMI Larafi</i>	<i>MCB</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. TALBI Billel</i>	<i>MCB</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. BOUKEZATA Boualem</i>	<i>MCB</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

# Remerciement

*Avant de présenter ce travail, nous tenons à remercier ALLAH tout puissant, de nous avoir permis d'arriver à ce niveau d'étude.*

*C'est avec un immense plaisir que nous réserverons ces quelques lignes en signe de gratitude et de reconnaissance à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.*

*Nous souhaitons adresser, en premier lieu, nos remerciements les plus sincères à notre encadrant Dr. Billel TALBI pour sa disponibilité, sa patience et son précieux suivi tout au long de la réalisation de ce travail.*

*Nos remerciements s'étendent à tous nos jurys et nos enseignants du département d'électronique de l'Université Mohammed El Bachir El Ibrahimi ainsi qu'à tous nos professeurs et examinateurs de la Faculté des sciences et technologie et la qualité de leur enseignement et qui déploient de grands efforts pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée.*

*On n'oublie pas nos parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience. Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos amis, qui nous ont toujours soutenue et encouragée au cours de la réalisation de ce mémoire.*

# *Dédicace*

Que ce travail témoigne de nos respects :

## *A nos parents :*

Grâce à leurs tendres encouragements et leurs grands sacrifices, ils ont pu créer le climat affectueux et propice à la poursuite de nos études.

Aucune dédicace ne pourrait exprimer nos respects, nos considérations et nos profonds sentiments envers eux.

Nous prions le bon Dieu de les bénir, de veiller sur eux, en espérant qu'ils seront toujours fiers de nous.

## *A nos sœurs et à nos frères.*

## *A tous nos professeurs :*

Leur générosité et leur soutien nous oblige de leurs témoigner nos profonds respects et notre loyale considération

## *A tous nos amis et nos collègues*

Ils vont trouver ici le témoignage d'une fidélité et d'une amitié infinie.

# Table des matières

Liste des figures .....	iii
Liste des tableaux .....	v
Liste des acronymes et symboles .....	vi
<b>Introduction générale .....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques interconnectés au réseau .....</b>	<b>3</b>
<b>I.1. Introduction.....</b>	<b>3</b>
<b>I.2. Énergie photovoltaïque.....</b>	<b>3</b>
<b>I.3. Systèmes photovoltaïques.....</b>	<b>4</b>
I.3.1. Systèmes photovoltaïques autonomes.....	5
I.3.2. Systèmes photovoltaïques interconnectés au réseau .....	6
<b>I.4. Convertisseurs de puissance pour les systèmes photovoltaïques connectés au réseau.....</b>	<b>9</b>
I.4.1. Convertisseurs DC-DC .....	9
I.4.2. Convertisseurs DC-AC.....	11
<b>I.5. Autorisation de connexion au réseau .....</b>	<b>18</b>
<b>I.6. Conclusion .....</b>	<b>19</b>
<b>Chapitre II : Modélisation des éléments d'un système photovoltaïque interconnecté au réseau avec un onduleur multiniveaux PEC9 .....</b>	<b>20</b>
<b>II.1. Introduction .....</b>	<b>20</b>
<b>II.2. Description du système étudié .....</b>	<b>20</b>
<b>II.3. Modélisation du panneau photovoltaïque .....</b>	<b>21</b>
II.3.1. Modèle de la cellule photovoltaïque .....	22
II.3.2. Modèle du module photovoltaïque .....	24
II.3.3. Modèle du panneau photovoltaïque.....	25

<b>II.4. Modélisation des convertisseurs de puissance .....</b>	<b>26</b>
II.4.1. Modèle du convertisseur élévateur (Boost).....	26
II.4.2. Modèle de l'onduleur à cellules en E empilées à neuf niveaux.....	28
<b>II.5. Conclusion.....</b>	<b>30</b>
<b>Chapitre III : Elaboration d'un schéma de commande pour un système photovoltaïque interconnecté au réseau avec un onduleur multiniveaux PEC9 ..</b>	<b>31</b>
<b>III.1. Introduction .....</b>	<b>31</b>
<b>III.2. Schéma de commande proposé: .....</b>	<b>31</b>
III.2.1. Commande MPPT P&O.....	32
III.2.2. Contrôle du bus continu .....	34
III.2.3. Boucle à verrouillage de Phase (P.L.L.) .....	35
III.2.4. Contrôle prédictif du courant injecté .....	36
<b>III.5. Conclusion .....</b>	<b>40</b>
<b>Chapitre IV : Résultats de simulation.....</b>	<b>41</b>
<b>IV.1. Introduction.....</b>	<b>41</b>
<b>IV.2. Simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau avec un onduleur multiniveaux PEC9 .....</b>	<b>41</b>
<b>IV.3. Résultats de simulation.....</b>	<b>44</b>
<b>IV.4. CONCLUSION.....</b>	<b>53</b>
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>54</b>
Références Bibliographiques .....	55

## Liste des figures

<b>Figure I- 1</b> Schéma de principe de l'effet PV	4
<b>Figure I- 2</b> Schéma d'un système PV typique	5
<b>Figure I- 3</b> Schéma-bloc des systèmes PV autonomes alimentant (a) une charge DC et (b) une charge AC.	6
<b>Figure I- 4</b> Configurations des systèmes PV connectés au réseau	7
<b>Figure I- 5</b> Schéma d'un système PV connecté au réseau à un seul étage.	8
<b>Figure I- 6</b> Schéma d'un système PV connecté au réseau à deux étages.	9
<b>Figure I- 7</b> Convertisseurs DC-DC	10
<b>Figure I- 8</b> Circuit d'un convertisseur abaisseur (Buck).	10
<b>Figure I- 9</b> Circuit d'un convertisseur élévateur (Boost).	11
<b>Figure I- 10</b> Circuit d'un convertisseur abaisseur-élévateur (Buck-Boost).	11
<b>Figure I- 11</b> Circuit d'un onduleur monophasé en pont H à deux niveaux.	12
<b>Figure I- 12</b> La forme d'onde de la tension de sortie d'un onduleur monophasé à deux niveaux.	12
<b>Figure I- 13</b> Bras d'un onduleur de tension : (a) deux niveaux, (b) trois niveaux et (c) n niveaux	13
<b>Figure I- 14</b> Circuit d'un onduleur en cascade à cinq niveaux.	14
<b>Figure I- 15</b> La forme d'onde de la tension de sortie d'un onduleur en cascade à cinq niveaux.	14
<b>Figure I- 16</b> Circuit d'un onduleur NPC à cinq niveaux.	15
<b>Figure I- 17</b> Circuit d'un onduleur à capacités flottantes à trois niveaux.	16
<b>Figure I- 18</b> Circuit d'un onduleur à cellules en U individuelle	17
<b>Figure I- 19</b> Circuit d'un onduleur à cellules en E empilées à neuf niveaux.	18
<b>Figure II- 1</b> Structure du système PV connecté au réseau étudié.....	21
<b>Figure II- 2</b> Constitution d'un panneau photovoltaïque .....	22
<b>Figure II- 3</b> Circuit équivalent d'une cellule PV. ....	22
<b>Figure II- 4</b> Circuit équivalent d'un module PV.....	24
<b>Figure II- 5</b> Caractéristiques d'un module PV. ....	24
<b>Figure II- 6</b> Circuit d'un convertisseur Boost .....	26
<b>Figure II- 7</b> Circuit équivalent du Boost: (a) l'interrupteur est fermé et (b) l'interrupteur est ouvert .	27
<b>Figure II- 8</b> Circuit d'un onduleur PEC9 connecté au réseau. ....	28
<b>Figure II- 9</b> Les états de commutation de l'onduleur PEC9. ....	30
<b>Figure III- 1</b> Schéma de contrôle suggéré pour le système PV connecté au réseau avec un onduleur PEC9 étudié. ....	32
<b>Figure III- 2</b> Caractéristique de fonctionnement de la méthode P&O. ....	33
<b>Figure III- 3</b> Organigramme de la méthode P&O. ....	34
<b>Figure III- 4</b> Schéma de régulation de la tension du bus continu. ....	35
<b>Figure III- 5</b> Diagramme de blocs d'une PLL.....	36
<b>Figure III- 6</b> Principe de la commande prédictive. ....	37
<b>Figure III- 7</b> Diagramme de l'algorithme du contrôle prédictif.....	38
<b>Figure IV- 1</b> Configuration du système photovoltaïque connecté au réseau avec un onduleur multiniveaux PEC9.	42
<b>Figure IV- 2</b> Influence de l'éclairement sur les caractéristiques du panneau photovoltaïque (a)Caractéristiques courant-tension (b) Caractéristiques puissance-tension.	43

<b>Figure IV- 3</b> Influence de la température sur les caractéristiques du panneau photovoltaïque, (a)Caractéristiques courant-tension (b)Caractéristiques puissance-tension _____	43
<b>Figure IV- 4</b> Profil de l'éclairement injecté dans le panneau photovoltaïque. _____	44
<b>Figure IV- 5</b> Evolution de la tension, du courant et de la puissance du panneau photovoltaïque commandé par l'algorithme P&O. _____	47
<b>Figure IV- 6</b> Evolution de la tension du bus continu commandé par un régulateur PI. _____	47
<b>Figure IV- 7</b> Evolution de la tension du deux condensateurs. _____	48
<b>Figure IV- 8</b> Evolution de la tension et du courant du réseau avec l'onduleur PEC9. _____	49
<b>Figure IV- 9</b> Evolution de courant injecté dans le réseau avec un onduleur multiniveaux PEC9,commandé par l'algorithme prédictif. _____	50
<b>Figure IV- 10</b> Forme d'onde de la tension de sortie du convertisseur PEC9. _____	51
<b>Figure IV- 11</b> Configuration du système photovoltaïque connecté au réseau avec un onduleur à deux niveaux. _____	51
<b>Figure IV- 12</b> Analyse spectrale du courant du réseau avec onduleur multiniveaux PEC9 pour différents niveaux de l'éclairement. (a)→1000 W/m <sup>2</sup> , (b) →800 W/m <sup>2</sup> , (c) →600 W/m <sup>2</sup> , (d) →400 W/m <sup>2</sup> ) __	52
<b>Figure IV- 13</b> Analyse spectrale du courant du réseau avec onduleur à deux niveaux pour différents niveaux de l'éclairement. (a)→1000 W/m <sup>2</sup> , (b) →800 W/m <sup>2</sup> , (c) →600 W/m <sup>2</sup> , (d) →400 W/m <sup>2</sup> ) __	52

# Liste des tableaux

<b>Tableau I. 1</b> Les états de commutation et niveaux de tension de l'onduleur en cascade à cinq niveaux. ....	15
<b>Tableau I. 2</b> Les états de commutation et niveaux de tension de l'onduleur NPC à cinq niveaux. ....	16
<b>Tableau I. 3</b> Les états de commutation et niveaux de tension de l'onduleur à capacités flottantes à trois niveaux. ....	17
<b>Tableau II. 1</b> Les états de commutation et niveaux de tension de l'onduleur PEC9. ....	29
<b>Tableau III. 1</b> Principe de la méthode P&O.....	33
<b>Tableau IV. 1</b> Paramètres du module PV.....	45
<b>Tableau IV. 2</b> Paramètres du système PV monophasé connecté au réseau utilisant l'onduleur PEC9. ....	45
<b>Tableau IV. 3</b> Comparaison du THD % du courant du réseau en cas de variations soudaines d'irradiance. ....	53

## Liste des acronymes et symboles

**MPPT** Maximum Power Point Tracking

**MPP** point de puissance maximale

**P&O** Perturb and Observe

**DC** Courant continue

**AC** Courant alternative

**HB** Half-bridge

**FB** Full-bridge

**THD** Total harmonic distortion

**MLI** Multi-level inverter

**CHB** Cascade h-bridge

**NPC** Neutral point clamped

**FC** Flying capacitor

**PUC** Packed unit cell

**PEC** Packed E cell

**MPC** modèle du Contrôle prédictif

**PI** Proportionnel intégrale

**PWM** Pulse width modulation.

**PLL** Phase-locked loop

**IGBT** Insulated Gate Bipolar Transistor.

**V<sub>inv</sub>** la tension de sortie du convertisseur PEC9

**V<sub>dc</sub>** DC-link voltage

**I<sub>g\_ref</sub>** courant référence de courant

**i<sub>g</sub>** Courant du réseau

**v<sub>g</sub>** Tension du réseau

**g** Fonction de coût

**f** Fréquence du réseau

**L** Bobine d'inductance de charge côté redresseur

**S1, 2,3**, Changement des signaux de commutation de l'onduleur par rapport à la tension du réseau.

# Introduction générale

---

De nos jours, le monde dépend fortement des sources d'énergie non renouvelables telles que le charbon, le pétrole et le gaz naturel. Pendant ce temps, la production d'énergie constitue un défi majeur dans les années à venir en raison de l'augmentation des besoins énergétiques, ce qui entraîne une augmentation de la pollution environnementale causée par les sources précédentes. Comme solution à cette crise, le monde a commencé à utiliser un autre type d'énergie appelé énergies renouvelables, telles que, l'énergie éolienne, l'énergie solaire photovoltaïque (PV) et la biomasse. Car elle se caractérise par des sources illimitées et n'a pas d'impact négatif sur l'environnement [1].

Parmi toutes les sources d'énergie renouvelable, l'énergie solaire PV devient de plus en plus compétitive par rapport aux sources d'énergie conventionnelles. L'énergie PV connectée au réseau est l'une des sources d'énergie renouvelable à la croissance la plus rapide et les plus prometteuses dans le monde [2]. Les systèmes PV connectés au réseau sont largement classés en deux catégories : les systèmes à un et deux étages d'adaptation. L'efficacité de ces systèmes dépend non seulement des conditions de fonctionnement, mais aussi de l'ensemble de la chaîne de conversion. Cela peut être réalisé par un choix judicieux de configurations ou de topologies, un bon dimensionnement des composants et des techniques de contrôle efficaces.

L'objectif de ce travail est de concevoir un schéma de contrôle efficace basé sur l'approche la commande prédictive pour un système photovoltaïque monophasé connecté au réseau utilisant un onduleur multiniveau à neuf niveaux de type PEC (Packed E-Cell). Le convertisseur PEC est considéré comme une topologie prometteuse pour l'interface du système PV au réseau avec un volume et un poids réduits du filtre et une haute efficacité. Contrairement à d'autres topologies d'onduleurs multiniveaux en monophasée, ce convertisseur fournit une tension de sortie à neuf niveaux avec une seule source DC et sept interrupteurs de puissance. Ce travail est organisé en quatre chapitres :

- Le premier chapitre est consacré aux systèmes PV connectés au réseau monophasé, ainsi qu'aux topologies d'interfaçage de l'électronique de puissance pour ces systèmes et leurs objectifs de contrôle.

- Dans le deuxième et le troisième chapitre, nous allons modéliser et contrôler un système PV connecté au réseau basé sur la topologie multiniveaux PEC en utilisant la technique de contrôle prédictif.
- Dans le dernier chapitre, nous allons donner les résultats de la simulation.

Enfin, une conclusion générale de ce travail ainsi que des perspectives clôturent le mémoire.

# Chapitre I :

# Généralité sur les systèmes photovoltaïques interconnectés au réseau

---

## I.1. Introduction

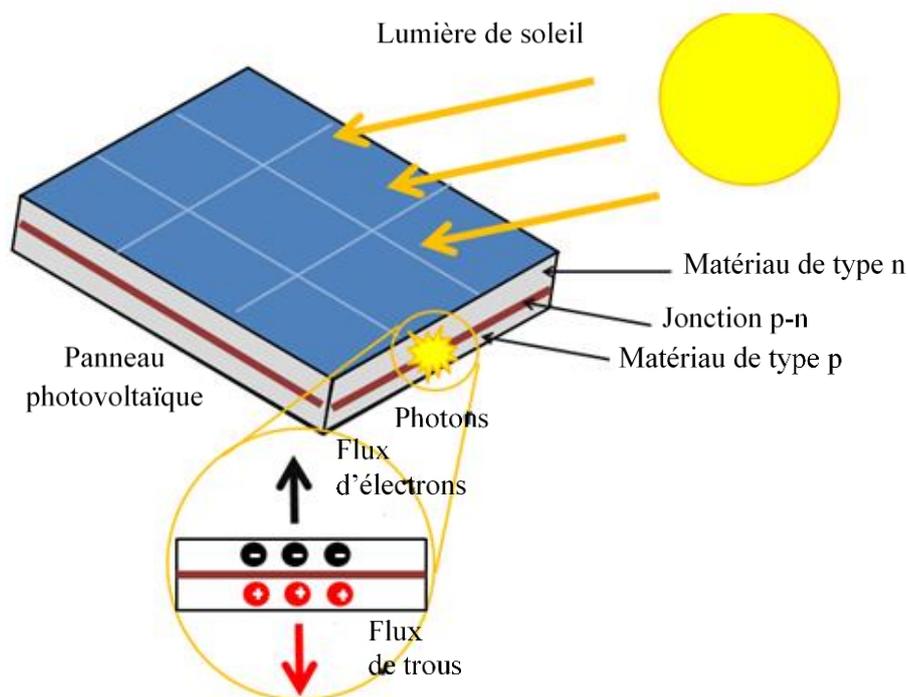
Récemment, la pénétration des sources d'énergie renouvelable dans le réseau électrique a été largement étudiée par de nombreux projets de recherche en raison des caractéristiques importantes de ces sources, telles que la propreté et la durabilité. Parmi toutes les sources d'énergie renouvelable, l'énergie photovoltaïque (PV) devient de plus en plus compétitive avec les sources d'énergie classiques [3].

Ce chapitre présente un aperçu des systèmes photovoltaïques connectés au réseau monophasé afin de présenter l'énergie photovoltaïque et d'illustrer les systèmes photovoltaïques avec leurs classes. De plus, les topologies d'interfaçage de l'électronique de puissance pour les systèmes PV connectés au réseau et les objectifs de contrôle de ces systèmes sont présentés respectivement.

## I.2. Énergie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque est une forme d'énergie renouvelable, durable et non polluante. Elle est obtenue en convertissant la lumière du soleil en électricité à l'aide d'une technologie basée sur l'effet photovoltaïque. Ce phénomène a été découvert pour la première fois en 1839 par *Edmond Becquerel*. Lorsqu'il faisait des expériences impliquant des cellules humides, il a remarqué que la tension de la cellule augmentait lorsque ses plaques d'argent étaient exposées à la lumière du soleil [4]. L'effet photovoltaïque se produit dans les cellules solaires. Ces cellules solaires sont composées de deux types de semi-conducteurs différents un de type p et un de type n qui sont assemblés pour créer une jonction p-n. En joignant ces deux types de semi-conducteurs, un champ électrique est formé dans la région de la jonction lorsque les électrons se déplacent vers le côté positif p et que les trous se déplacent vers le côté négatif n. Ce champ provoque le déplacement de particules chargées négativement dans une direction et

de particules chargées positivement dans l'autre direction. La lumière est composée de photons, qui sont simplement de petits paquets de rayonnement électromagnétique ou d'énergie. Ces photons peuvent être absorbés par une cellule PV. Lorsque la lumière d'une longueur d'onde appropriée est incidente sur ces cellules, l'énergie du photon est transférée à un atome du matériau semi-conducteur dans la jonction p-n. Plus précisément, l'énergie est transférée aux électrons dans la matière. Ceci fait sauter les électrons à un état d'énergie plus élevé connu comme la bande de conduction, ce mouvement de l'électron en raison de l'énergie ajoutée crée deux porteurs de charge [4]. La Figure I.1 présente un schéma de principe de l'effet PV.

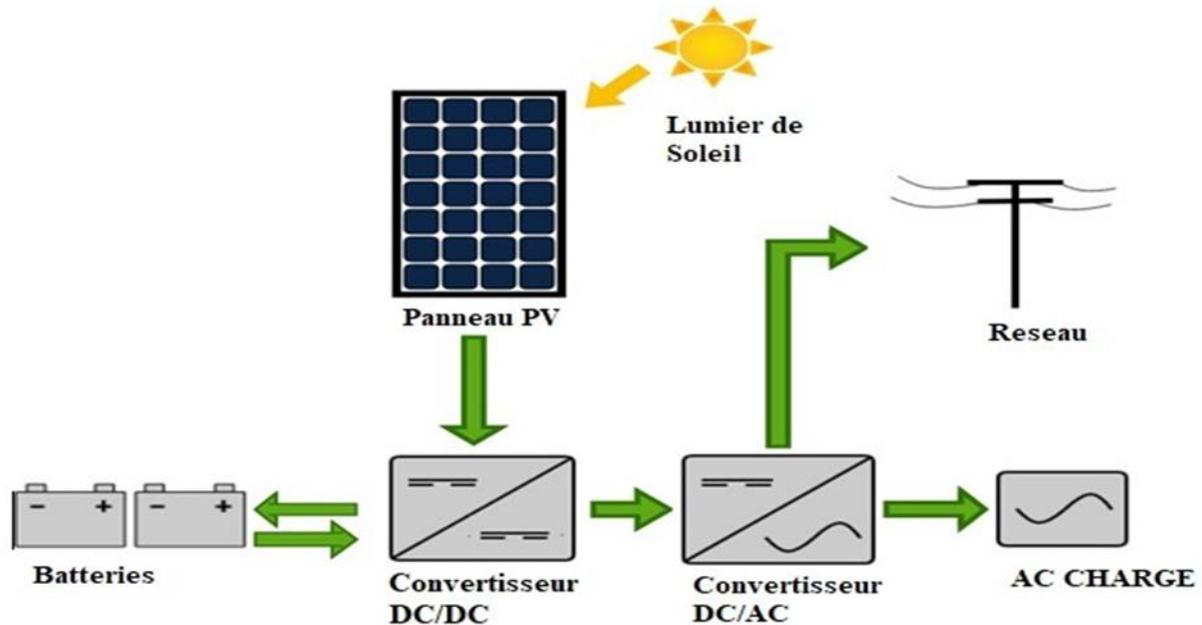


**Figure I- 1** Schéma de principe de l'effet PV.

### I.3. Systèmes photovoltaïques

Les systèmes PV sont des systèmes d'alimentation en énergie solaire photovoltaïque, qui fournissent soit de l'électricité directement à un équipement électrique, soit injectent de l'énergie dans le réseau public d'électricité. Les cellules solaires PV sont généralement combinées en modules pouvant contenir jusqu'à 72 cellules, un certain nombre de ces modules sont aussi regroupées en série et/ou en parallèle de manière à former un panneau PV. En général, un système PV se compose d'un panneau PV et de convertisseurs électroniques de puissance ; le panneau PV est responsable de la conversion de la lumière du soleil en électricité, puis l'énergie PV obtenue est traitée à travers les convertisseurs électroniques de puissance. Généralement, un convertisseur DC-DC est utilisé pour maximiser la puissance DC fournie par le panneau PV. Ensuite, le

Le convertisseur DC-DC est suivi par un convertisseur DC-AC, qui traite la puissance fournie depuis l'étage DC-DC et l'acheminer vers les charges AC [5].



**Figure I- 2** Schéma d'un système PV typique.

Principalement, les systèmes PV peuvent être divisés en deux catégories en fonction de leur application :

- Systèmes photovoltaïques autonomes.
- Systèmes photovoltaïques interconnectés au réseau.

### **I.3.1. Systèmes photovoltaïques autonomes**

Aussi connu sous le nom de système PV hors réseau, il nécessite généralement un système de stockage (groupe de batteries), ce type fonctionne en général indépendamment du réseau public d'électricité, conçu et dimensionné pour alimenter certains équipements électriques DC et/ou AC. Pour les applications alimentant des charges DC, les systèmes PV utilisent un convertisseur de puissance DC-DC (un étage d'adaptation), qui joue un rôle majeur dans la modification du niveau de tension ou de courant PV pour suivre le point de puissance maximale (MPPT). Pour les applications alimentant des charges AC, une topologie à deux étages avec un système de stockage connecté entre les deux étages est utilisée. Dans le premier étage, un convertisseur DC-DC est utilisé pour augmenter la tension PV et suivre le point de puissance maximale (PPM). Dans le deuxième étage, un convertisseur DC-AC (onduleur) est utilisé pour convertir la puissance DC en puissance AC et améliorer la qualité de la puissance AC. Dans le

cas d'une application PV avec une charge critique, un groupe de batterie est utilisé pour fixer la tension DC de l'onduleur et améliorer ou fournir la puissance de charge requise [6].

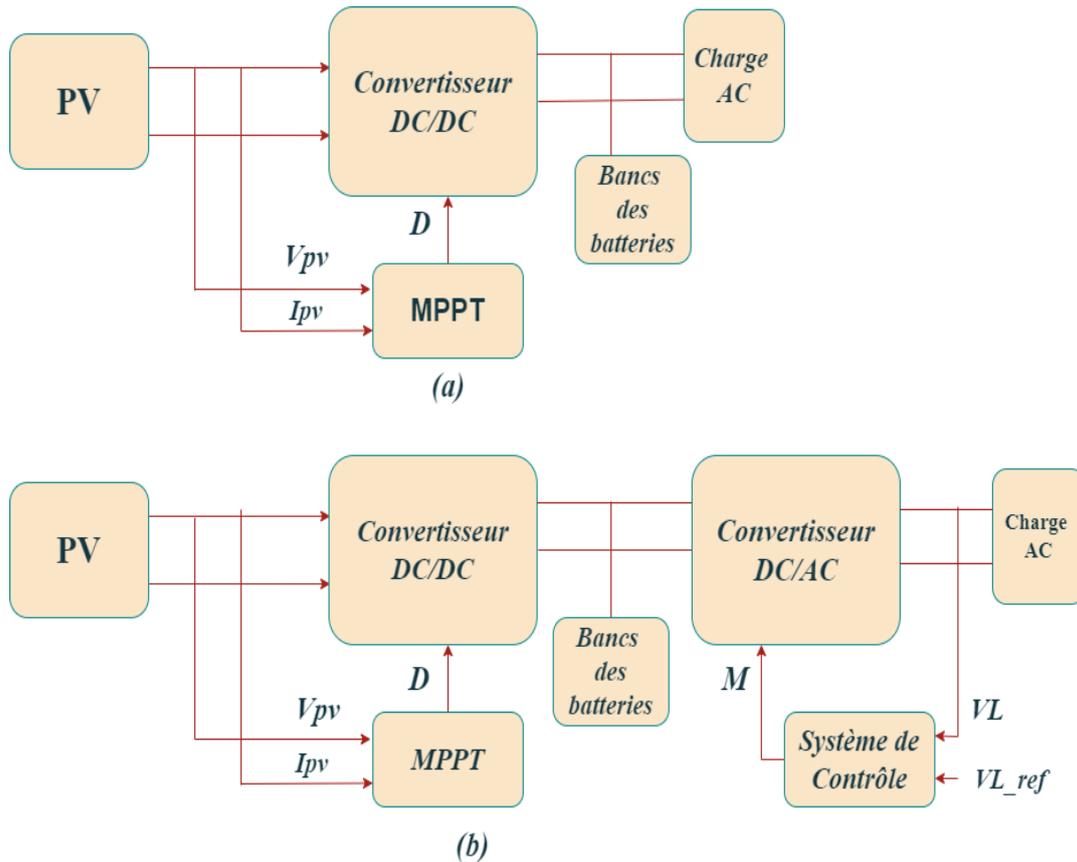
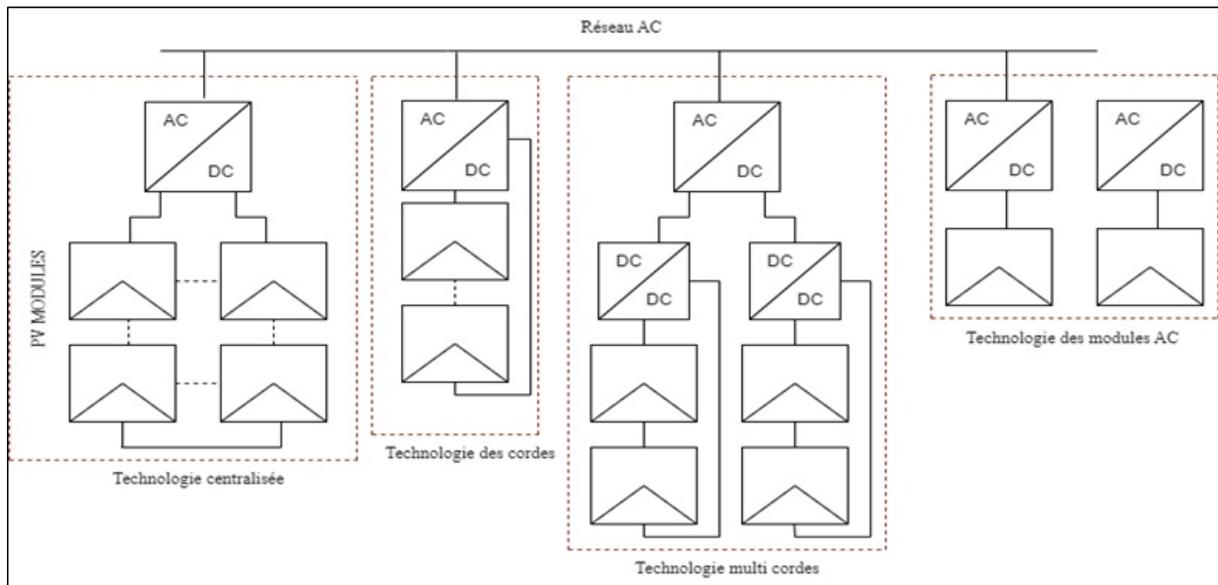


Figure I- 3 Schéma-bloc des systèmes PV autonomes alimentant (a) une charge DC et (b) une charge AC.

### I.3.2. Systèmes photovoltaïques interconnectés au réseau

Les systèmes PV interconnectés au réseau sont conçus pour être capables d'injecter la puissance PV générée dans le réseau public. Ces systèmes comportent de nombreux étages de conversion de puissance qui admettaient d'extraire la puissance du panneau PV puis de l'injecter dans le réseau. Dans ces systèmes, l'onduleur est l'élément clé qui assure la conversion de puissance DC en AC. Il existe différentes configurations pour associer les onduleurs et les panneaux PV [7]:

- Configuration centralisée.
- Configuration à chaîne.
- Configuration à chaînes multiples.
- Configuration modulaire.



**Figure I- 4** Configurations des systèmes PV connectés au réseau.

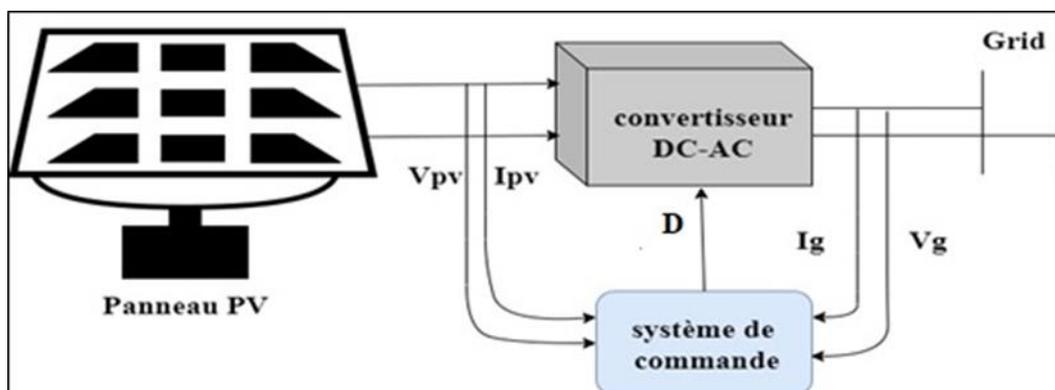
Figure I.4 montre les différentes configurations des systèmes PV connectés au réseau. La configuration d'onduleur centralisé est considérée comme la première configuration de raccordement au réseau pour les systèmes PV. Les panneaux PV (un certain nombre de modules PV connectés en série) sont connectés en parallèle pour obtenir un panneau PV avec la puissance de sortie et le niveau de tension DC souhaités. La sortie du panneau PV est connectée à un seul onduleur. Dans cette configuration, la puissance maximale PV est injectée dans le réseau avec une grande efficacité, une petite taille et un faible coût. Toutefois, pour répondre aux exigences du réseau, cette configuration nécessite soit un transformateur élévateur, ce qui réduit l'efficacité du système et augmente le coût global du système, soit un panneau PV avec une tension DC élevée. Un système PV avec une tension DC élevée souffre de points chauds pendant l'ombrage partiel (si l'un des modules soumis d'une irradiation plus faible que les autres, à cause d'un ombrage par exemple, ce dernier se comporte comme une charge par rapport aux autres modules) et d'une augmentation du courant de fuite entre les modules PV. De plus, les panneaux PV connectés en parallèle peuvent avoir des tensions optimales différentes, ce qui entraîne de multiples crêtes sur la courbe caractéristique du panneau PV. Pour améliorer le suivi du point de puissance maximale (MPPT) pendant l'ombrage partiel ou en cas de non-correspondance de la tension optimale des modules, la configuration à chaîne est utilisée, où chaque panneau PV est connecté à un onduleur avec son propre MPPT. Cette configuration présente quelques inconvénients, elle nécessite un grand nombre de composants et a un coût d'installation élevé. La configuration à chaînes multiples est similaire à la technologie à chaîne. La différence est qu'un convertisseur DC-DC est installé sur chaque panneau PV, où les sorties de chaque convertisseur

DC-DC sont connectées à un seul onduleur. Le convertisseur DC-DC ajouté sur chaque chaîne est utilisé pour suivre le point de puissance maximale et éviter d'avoir un panneau PV avec une grande tension DC, cette configuration est coûteuse car chaque chaîne a son propre convertisseur. Dans la configuration modulaire, chaque panneau PV est connecté à un onduleur différent, où le point de puissance maximale de chaque panneau est extrait séparément. Cette technologie est recommandée lorsque des modules PV différents sont utilisés et elle est considérée comme la plus coûteuse [7].

En outre, les topologies de raccordement au réseau à un ou deux étages sont des topologies couramment utilisées dans les systèmes monophasés et triphasés.

### **I.3.2.1. Systèmes à un étage d'adaptation**

Un système PV raccordé au réseau à un étage est illustré dans la Figure I.5. Afin de suivre le point de puissance maximale et d'interfacer le système PV au réseau, le système PV utilise une seule unité de conversion (onduleur). Dans cette topologie, la puissance PV est injectée dans le réseau avec une haute efficacité, une petite taille et un faible coût. Cependant, pour répondre aux exigences du réseau, cette topologie nécessite soit un transformateur élévateur, qui réduit l'efficacité du système et augmente le coût, soit un panneau PV avec une tension DC élevée. Les systèmes avec une tension DC élevée souffrent de points chauds pendant les ombres partielles et de l'augmentation du courant de fuite entre les panneaux, comme mentionné dans la section I.3.2. De plus, il est compliqué de contrôler l'onduleur en raison des objectifs de contrôle tels que le MPPT, la correction du facteur de puissance et la réduction des harmoniques. Différents types d'onduleurs ont été appliqués pour améliorer et réguler les performances, tels que les onduleurs source de tension à deux niveaux et multiniveaux et les onduleurs de courant [6].



**Figure I- 5** Schéma d'un système PV connecté au réseau à un seul étage.

### I.3.2.2. Systèmes à deux étage d'adaptation

Un diagramme pour un système PV raccordé au réseau à deux étages est présenté dans la Figure I.6. Le premier étage est généralement un convertisseur DC-DC pour extraire la puissance maximale du panneau PV, le second est un onduleur pour fournir l'énergie PV au réseau. Les avantages de la topologie à deux étages résident dans la simplicité de la conception du schéma de contrôle, car les exigences de contrôle sont réparties entre les deux étages. De plus, un panneau PV avec une tension de sortie élevée n'est pas requis en raison du premier étage d'amplification. Cette topologie souffre de pertes de puissance plus importantes, d'une taille plus grande et d'un coût plus élevé que les systèmes à un seul étage [6].

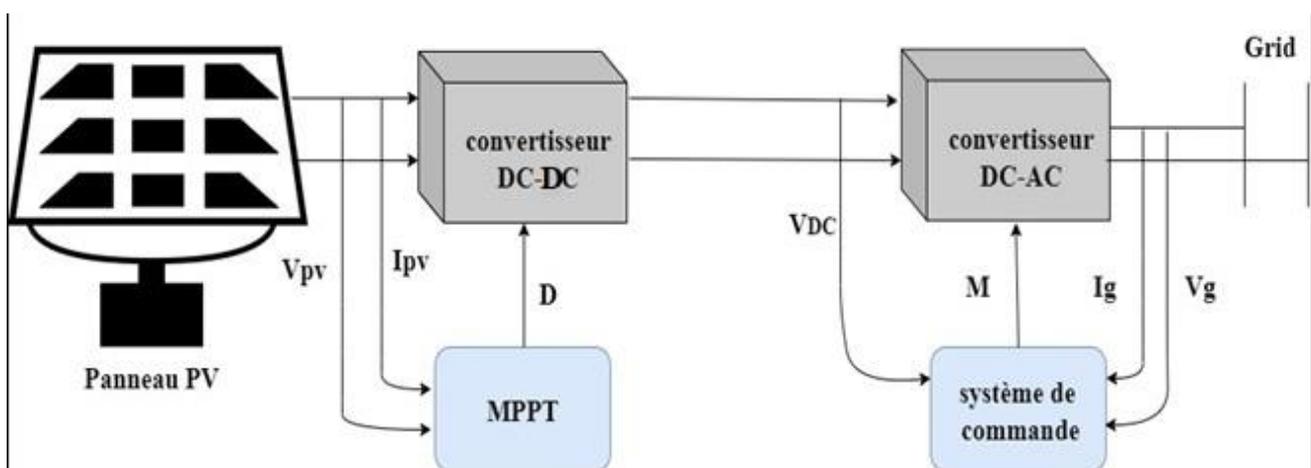


Figure I- 6 Schéma d'un système PV connecté au réseau à deux étages.

## I.4. Convertisseurs de puissance pour les systèmes photovoltaïques connectés au réseau

Comme présenté précédemment, deux configurations principales peuvent être distinguées pour les systèmes PV connectés au réseau: les systèmes à un étage et les systèmes à deux étages d'adaptation. Pour la première configuration, un onduleur est utilisé pour la conversion et le transfert de l'énergie PV vers le réseau connecté. Pour la seconde configuration, un convertisseur DC-DC est inséré entre le panneau PV et l'onduleur.

### I.4.1. Convertisseurs DC-DC

Comme son nom l'indique, un convertisseur DC-DC est conçu pour convertir une tension DC en une autre tension DC. Ils sont utilisés pour augmenter ou diminuer le niveau de tension (Figure I.7). Ces convertisseurs utilisent un circuit de commutation à haute fréquence, associé à des inductances, des condensateurs et des interrupteurs, afin de réduire le bruit de commutation et de fournir une tension DC régulé [7].

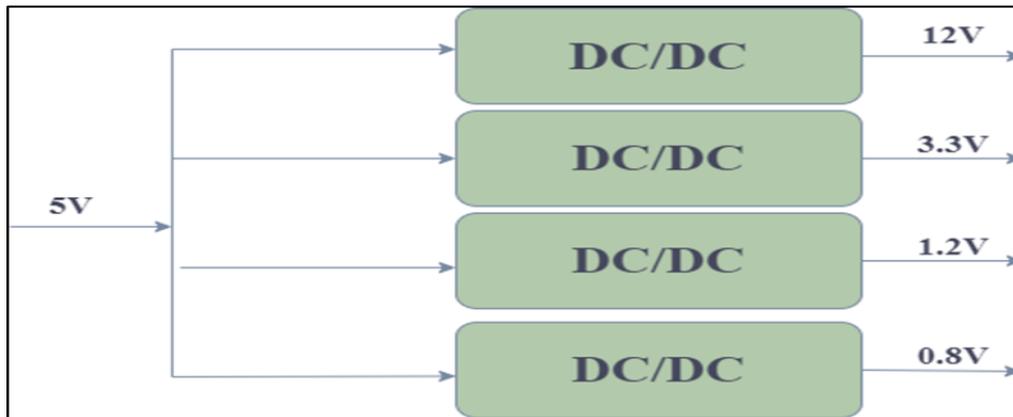


Figure I- 7 Convertisseurs DC-DC.

#### I.4.1.1. Types des convertisseurs DC-DC

Il existe de nombreux types de convertisseurs DC-DC différents en fonction de l'application pour laquelle ils peuvent être utilisés. Les trois principaux types sont [7]:

- Convertisseur abaisseur (Buck converter):** est un convertisseur DC-DC qui abaisse (réduit) la tension de sortie par rapport à la tension d'entrée. Ce convertisseur est adapté lorsque la tension de charge souhaitée est inférieure à la tension correspondant au point de puissance maximale (Figure I.8).

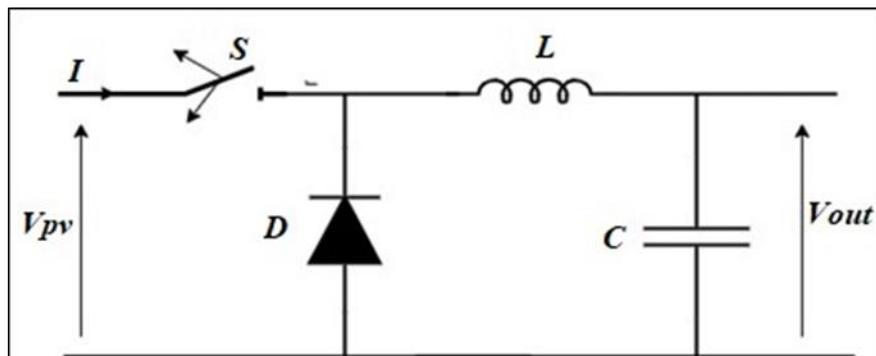


Figure I- 8 Circuit d'un convertisseur abaisseur (Buck).

- Convertisseur élévateur (Boost converter):** ce type de convertisseur DC-DC (Figure I.9) augmente la tension, comme son nom l'indique, produisant donc une tension de sortie plus élevée que la tension d'entrée.

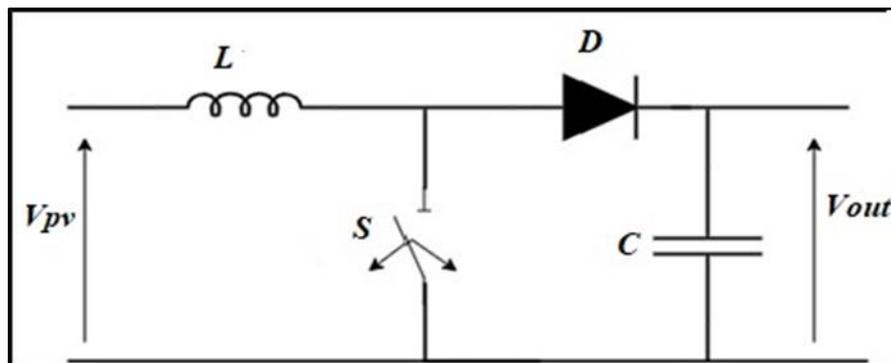


Figure I- 9 Circuit d'un convertisseur élévateur (Boost).

- c. **Convertisseur abaisseur-élévateur (Buck-Boost converter):** est un convertisseur DC-DC à double fonction, il peut soit augmenter, soit diminuer la tension afin de produire une tension de sortie qui peut être supérieure ou inférieure à la tension d'entrée. Il peut également être utilisé pour produire des tensions négatives ou positives et est donc utilisé dans une grande variété d'applications.

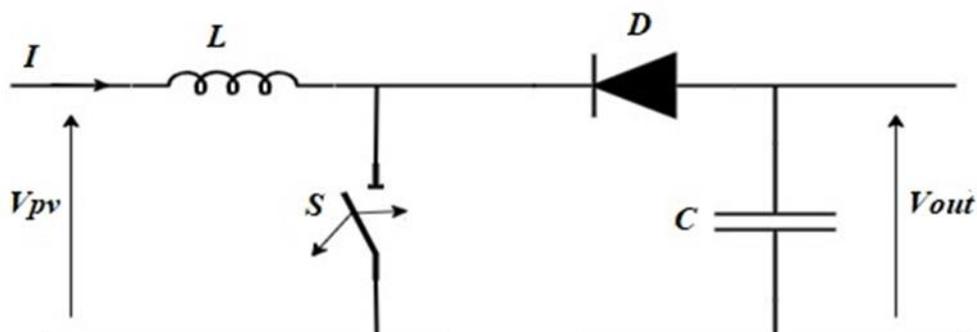


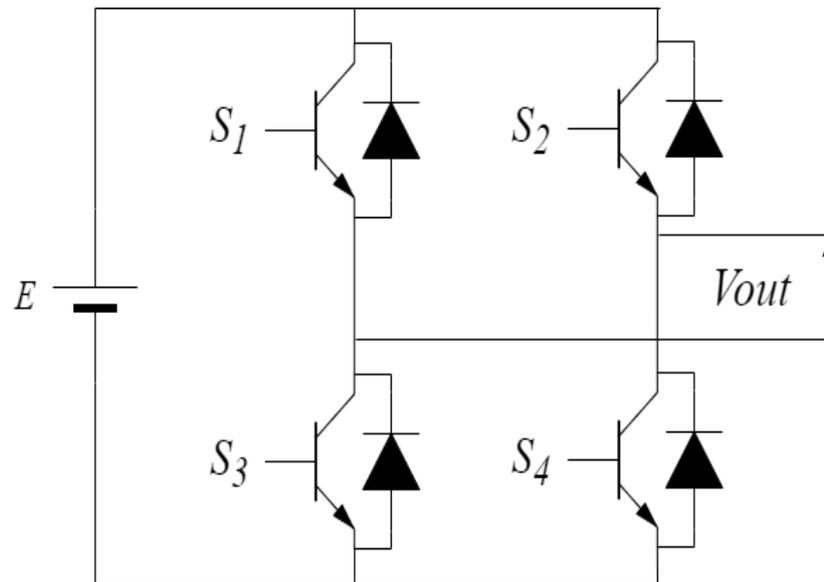
Figure I- 10 Circuit d'un convertisseur abaisseur-élévateur (Buck-Boost).

## I.4.2. Convertisseurs DC-AC

Un convertisseur DC-AC ou encore un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continu-alternatif. Alimenté par une source continue, il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie pour obtenir à la sortie une tension et un courant alternatif, c'est-à-dire de valeur moyenne nulle.

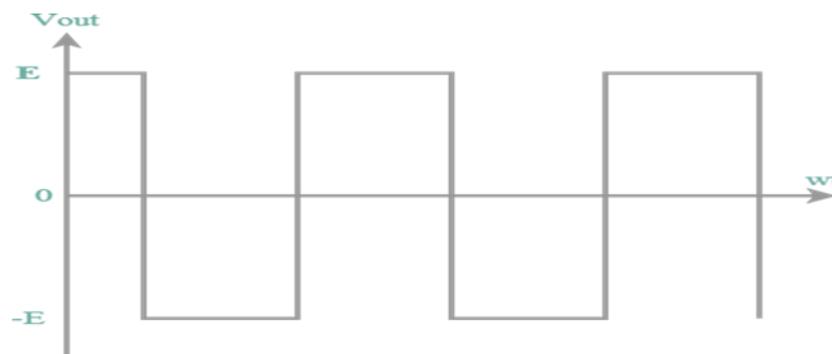
### I.4.2.1. Onduleur à deux niveaux

Un onduleur à deux niveaux est composé de deux cellules de commutation structurées en pont en *H*. Les composants traditionnellement utilisés sont des IGBT avec leur diode antiparallèle.



**Figure I- 11** Circuit d'un onduleur monophasé en pont H à deux niveaux.

Afin d'éviter le court-circuit de l'entrée DC, la technique de contrôle doit toujours garantir qu'à tout instant, soit l'interrupteur supérieur, soit l'interrupteur inférieur de chaque cellule de commutation de l'onduleur est activé. La tension de sortie AC de l'onduleur monophasé à deux niveaux est représentée sur la Figure I.12.

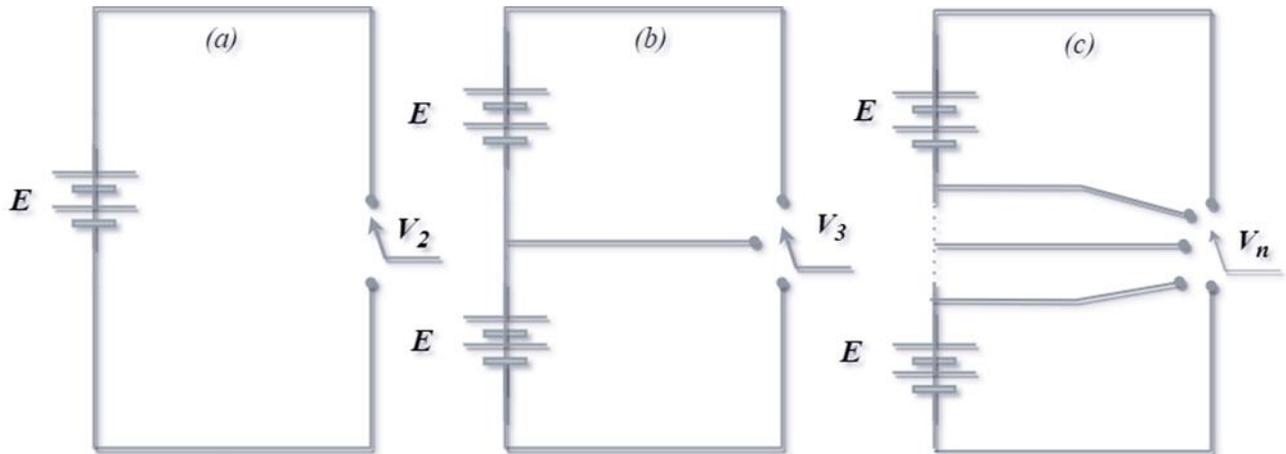


**Figure I- 12** La forme d'onde de la tension de sortie d'un onduleur monophasé à deux niveaux.

#### I.4.2.2. Onduleur multiniveaux

Les onduleurs multiniveaux sont de plus en plus appliqués grâce à leurs diverses caractéristiques. Ils sont capables de produire plus de deux niveaux de tensions de sortie, permettant de délivrer une tension de meilleure qualité que les convertisseurs conventionnels à deux niveaux et de réduire ainsi le dimensionnement du filtre inductif de sortie. La Figure I.13 montre le principe de base du fonctionnement d'un onduleur multiniveaux, dont l'action du semi-conducteur est représentée par un interrupteur idéal ayant plusieurs positions. L'onduleur deux niveaux génère une tension de sortie pivotant entre deux valeurs (deux niveaux  $+E$  et  $-E$ )

(Figure I.6.a), alors que l'onduleur trois niveaux génère trois tensions  $+E$ ,  $0$  et  $-E$  (Figure I.6.b), et ainsi de suite pour l'onduleur  $n$  niveaux (Figure I.6.c) [8].



**Figure I- 13** Bras d'un onduleur de tension : (a) deux niveaux, (b) trois niveaux et (c) n niveaux

Pour les onduleurs multiniveaux monophasés, différentes topologies ont été proposées dans la littérature qui sont présentées ci-dessous :

- a. **Topologie en cascade** : cette topologie peut être utilisée pour les applications de moyenne et haute puissance. Elle est constituée de nombreuses unités d'onduleurs en pont  $H$  monophasés connectés en cascade. Chaque pont est alimenté par une source de tension continue distincte. Les niveaux de tension de sortie, en fonction du nombre d'onduleurs en cascade  $n$ , pourront varier de  $-nE$  à  $+nE$ , avec  $2n + 1$  niveaux. L'augmentation du nombre de niveaux conduit à une forme d'onde de tension de sortie presque sinusoïdale, même sans l'application de filtres. La Figure I.14 illustre un onduleur en cascade à cinq niveaux monophasé, qui contient deux onduleurs en pont  $H$  monophasés. Dans ce cas, les cinq niveaux de tension de sortie sont  $0$ ,  $\pm E$  et  $\pm 2E$ , qui sont représentés dans la Figure I.15 [8]. Les niveaux de tension de sortie de l'onduleur en cascade à cinq niveaux monophasé sont listés dans le Tableau I.1. Le principal inconvénient de cette topologie est le coût élevé, car l'augmentation du nombre de niveaux de tension nécessite une augmentation du nombre de commutateurs et de sources de tension continue.

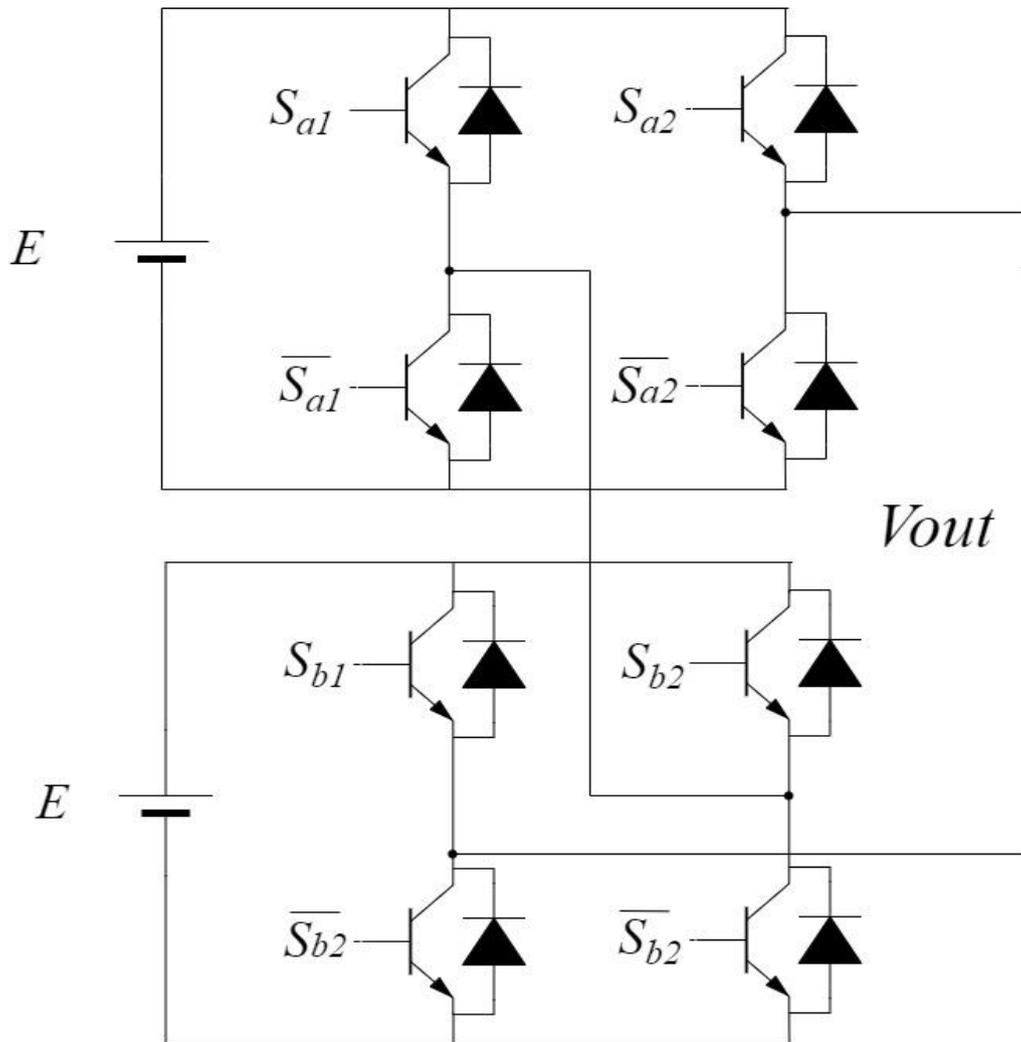


Figure I- 14 Circuit d'un onduleur en cascade à cinq niveaux.

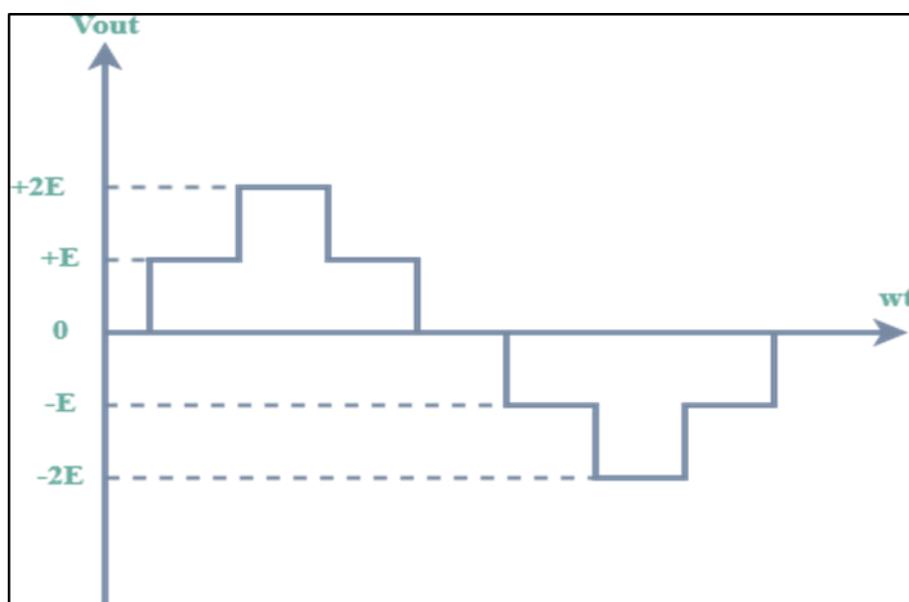


Figure I- 15 La forme d'onde de la tension de sortie d'un onduleur en cascade à cinq niveaux.

Tableau I. 1 Les états de commutation et niveaux de tension de l'onduleur en cascade à cinq niveaux.

États de commutation				Niveaux de tension
$S_{a1}$	$S_{a2}$	$S_{b1}$	$S_{b2}$	$V_{out}$
0	1	0	1	$-2E$
0	1	0	0	$-E$
0	0	0	0	$0$
1	0	0	0	$+E$
1	0	1	0	$+2E$

b. Topologie à point neutre clampé (NPC) : la Figure 1.16 représente un onduleur NPC monophasé à cinq niveaux, proposé pour la première fois par A. Nabae et H. Akagi en 1981 afin de réduire l'amplitude des harmoniques injectés par l'onduleur dans la charge pour des applications d'entraînement électriques. Dans cette topologie, les diodes servent à répartir la tension d'alimentation sur les composants. Elles sont reliées au point milieu capacitif. Un onduleur NPC de  $n$  niveaux, contient de  $n-1$  interruptrices et  $n-2$  diodes de bouclage pour chaque bras. Le tableau 1.2 présente la tension de sortie d'onduleur NPC à cinq niveaux en fonction des signaux de commande. L'un des avantages de cette topologie est sa flexibilité à être contrôlée à la fois par la modulation de largeur d'impulsion (PWM) et par la modulation vectorielle (SVM) [8]. Néanmoins, lorsque le nombre de niveaux de tension est très élevé, le système est difficile à construire en raison du grand nombre de semi-conducteurs nécessaires.

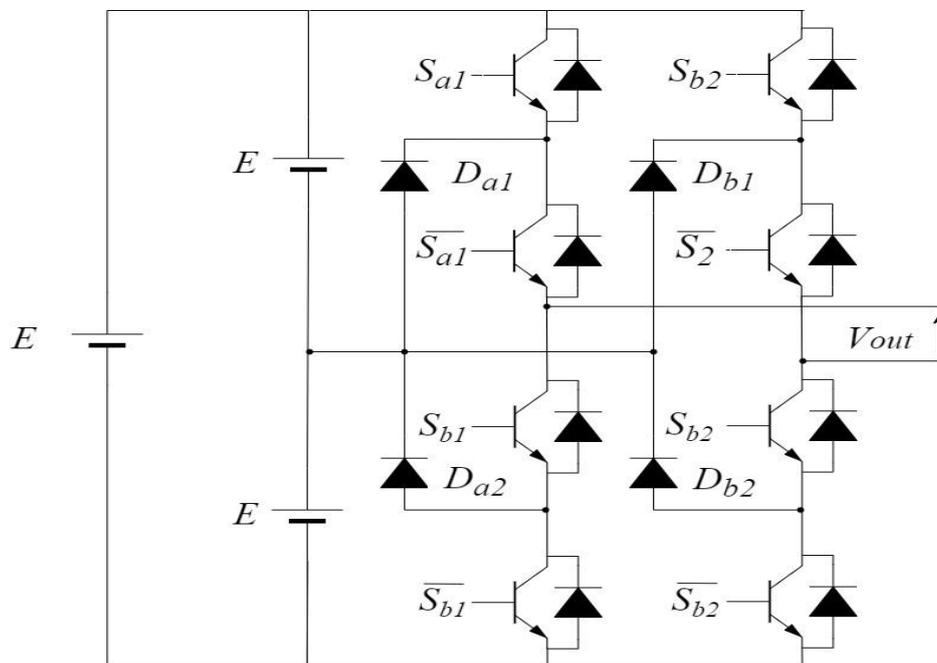


Figure I- 16 Circuit d'un onduleur NPC à cinq niveaux.

Tableau I. 2 Les états de commutation et niveaux de tension de l'onduleur NPC à cinq niveaux.

États de commutation				Niveaux de tension
$S_{a1}$	$S_{a2}$	$S_{b1}$	$S_{b2}$	$V_{out}$
1	1	0	0	+E
0	1	0	0	+E/2
0	0	0	0	0
0	0	0	1	-E
0	0	1	1	-E/2

c. **Topologie à capacités flottantes** : cette topologie a été proposée par Escalante Vannier et Arzandé en 2002. La Figure I.17 présente un onduleur à capacités flottantes à trois niveaux. Dans cet onduleur les deux diodes de calage du convertisseur NPC ont été remplacées par un condensateur. Les combinaisons de fonctionnement sont les mêmes que pour la topologie NPC. Pour un onduleur à capacités flottantes de  $n$  niveaux, chaque bras doit contenir  $2n-2$  interrupteurs et  $n-2$  capacités. Cette topologie élimine quelques inconvénients de la NPC comme l'équilibre des tensions supportées par les interrupteurs. Le Tableau I.3 liste la tension de sortie d'onduleur à capacités flottantes à trois niveaux en fonction des signaux de commande [8].

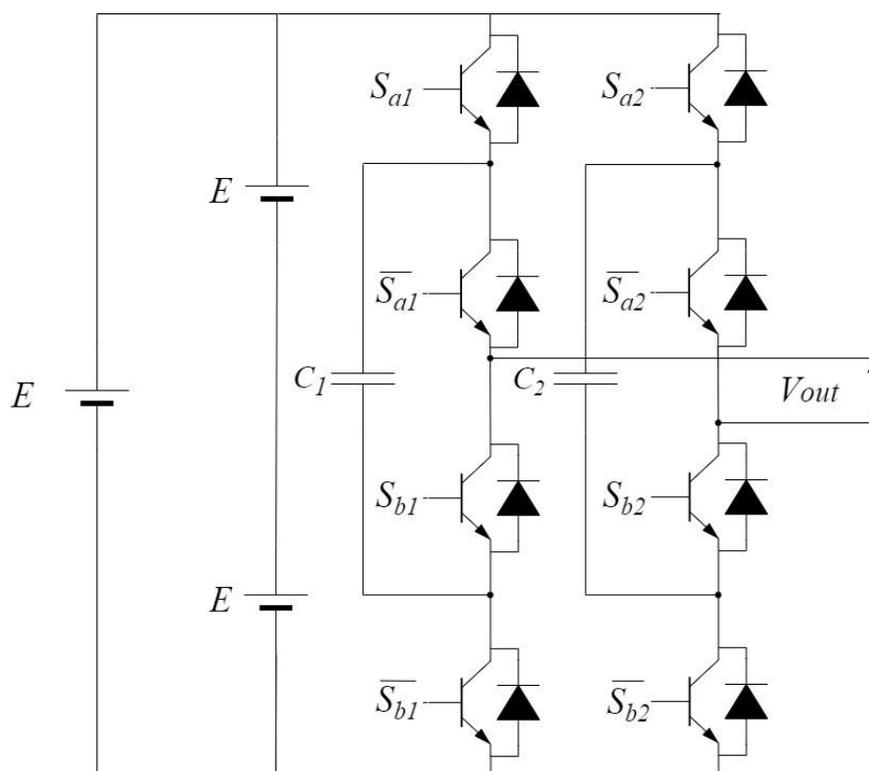
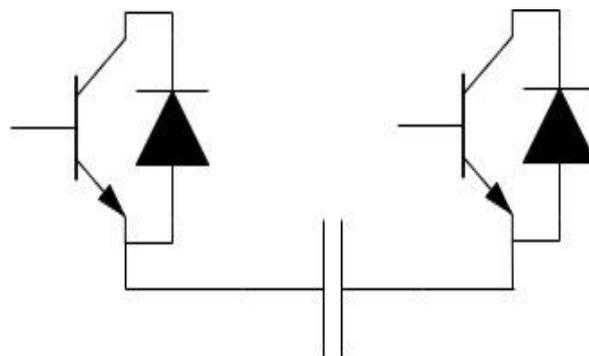


Figure I- 17 Circuit d'un onduleur à capacités flottantes à trois niveaux.

**Tableau I. 3** Les états de commutation et niveaux de tension de l'onduleur à capacités flottantes à trois niveaux.

États de commutation				Niveaux de tension
$S_{a1}$	$S_{a2}$	$S_{b1}$	$S_{b2}$	$V_{out}$
1	1	0	0	$+E$
1	0	1	0	0
0	0	0	0	0
0	1	0	1	0
0	0	1	1	$-E$

d. **Topologie à cellules en U empilées (PUC)** : l'onduleur PUC est un convertisseur multiniveaux proposé en 2008 par *Ounejjar et Al-Haddad*. Il est composé par des cellules dont chacune est formée de deux interrupteurs (avec leurs diodes en antiparallèle) ainsi que d'un condensateur. En considérant  $n$  cellules, un convertisseur sera constitué de  $2n$  interrupteurs et de  $n-1$  condensateurs, ce convertisseur donnera  $2n - 1$  niveaux (car les deux interrupteurs d'une même cellule doivent être complémentaires ce qui donnera  $2n$  combinaisons et car le niveau 0 sera toujours répété 2 fois ce qui permettra d'avoir  $2n - 1$  niveaux différents). Ainsi, un convertisseur de sept niveaux est constitué de six interrupteurs et de deux condensateurs (Figure I.17).



**Figure I- 18** Circuit d'un onduleur à cellules en U individuelle

e. **Topologie à cellules en E empilées (PEC)** : Le PEC9 monophasé a été récemment introduit sur la base de l'idée d'utiliser une cellule E au lieu d'une cellule U pour réduire le nombre total de composants [9]. Cet onduleur multiniveau peut être utilisé en configuration monophasée et triphasée. Il s'agit d'une combinaison d'un demi-pont et d'une connexion de type cellule E.

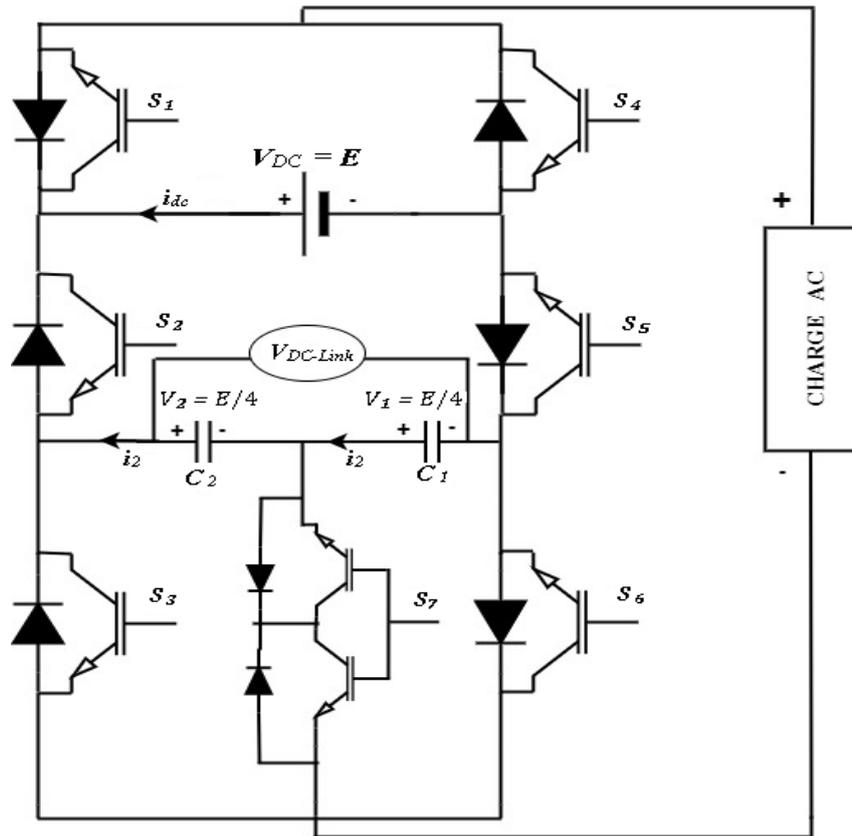


Figure I- 19 Circuit d'un onduleur à cellules en E empilées à neuf niveaux.

### I.5. Autorisation de connexion au réseau

Afin d'être autorisé à fournir de l'énergie électrique au réseau, le producteur doit prouver que son installation répond à une série de conditions, qui ont trait à :

- **La sécurité** : le principal problème de sécurité occasionné par les systèmes PV est le risque du fonctionnement en îlot. Un îlot est une partie du réseau de distribution qui se trouve isolé du reste du réseau, une situation qui se rencontre lorsque le distributeur veut mettre cette partie du réseau hors tension (par exemple pour y effectuer une réparation) ou parce qu'un défaut a été détecté dans cette partie du réseau, si l'îlot reste alimenté par de petits fournisseurs d'énergie, il peut en résulter des dangers tant pour la sécurité des personnes que pour la protection des appareils, chaque onduleur doit donc reconnaître le fonctionnement en îlot et se découpler aussi rapidement que possible du réseau lorsque cette situation se présente [10].
- **La qualité de l'énergie fournie** : le principal défaut que peut présenter un onduleur fournissant de la puissance au réseau est la présence des courants de fréquence autre que la fréquence de fonctionnement du réseau. Les limites des harmoniques de courants sont fixées à 5% pour le THD dans les normes les plus pertinentes, IEC 61727 et IEEE 1547-

2003. Un autre défaut que peut présenter un onduleur est l'injection d'une composante continue de courant dans le réseau. Enfin, le gestionnaire du réseau peut aussi imposer des contraintes sur le facteur de puissance de la puissance fournie au réseau. Un facteur de puissance différent de 1 signifie que l'on échange avec le réseau non seulement de la puissance active, mais aussi de la puissance réactive (il est tout à fait possible de fournir de la puissance active tout en consommant de la puissance réactive). On notera que la notion de facteur de puissance couvre aussi bien l'aspect "harmoniques indésirables" que l'aspect "puissance réactive" : le facteur de puissance n'est égal à l'unité que s'il n'y a ni harmoniques ni puissance réactive [10].

## **I.6. Conclusion**

Ce chapitre présente un aperçu sur les systèmes photovoltaïques monophasés connectés au réseau. Les systèmes PV autonomes et connectés au réseau ont été décrits pour montrer leurs circuits de puissance et leurs schémas de commande. Les configurations d'un système PV connecté au réseau ont été discutées. Les topologies les plus courantes des convertisseurs DC-DC et DC-AC, qui sont utilisées sur des structures à un ou deux étages, ont été aussi discutées.

Le chapitre prochain sera consacré à la modélisation détaillée des différents éléments d'une chaîne photovoltaïque connecté au réseau à base d'un onduleur multiniveaux monophasé.

# Chapitre II :

# Modélisation des éléments d'un système photovoltaïque interconnecté au réseau avec un onduleur multiniveaux PEC9

---

## II.1. Introduction

La modélisation d'un système quelconque est indispensable pour l'étude et la maîtrise de son fonctionnement et lorsqu'on souhaite lui appliquer une commande particulière. D'autre part, elle est une phase primordiale dans le développement de la conception des systèmes. Les progrès de l'informatique et du génie des logiciels permettent de réaliser des modélisations performantes et d'envisager l'optimisation de la conception. L'étude et la modélisation des systèmes présentent un grand intérêt en raison des impératifs techniques et économiques et conduisent à concevoir et à exploiter le matériel au voisinage des limites technologiques [11].

On présentera dans ce chapitre la modélisation d'un système photovoltaïque interconnecté au réseau avec un onduleur multiniveau, constitué d'un panneau PV, un convertisseur DC-DC élévateur (Boost) et un onduleur à cellules en E empilées à neuf niveaux (PEC9) raccordé au réseau par l'intermédiaire d'un filtre  $RL$ .

## II.2. Description du système étudié

Suite à la discussion du chapitre précédent, une configuration typique d'un système PV monophasé connecté au réseau, comme illustré dans la Figure II.1, est une solution prometteuse pour un système PV connecté au réseau efficace, économique et robuste. Le système comprend

un panneau PV, qui est un groupe de modules connectés en série-parallel. Un filtre d'entrée passif, un condensateur, est utilisé pour réduire les ondulations de courant et de tension (et donc la puissance) du côté de panneau PV. Le filtre d'entrée est suivi d'un convertisseur élévateur DC-DC, qui est utilisé pour effectuer le suivi du point de puissance maximale (MPPT) du panneau PV et élever sa tension. Le convertisseur DC-DC est connecté via un bus continu continue (condensateur) à l'onduleur à cellules en E empilées à neuf niveaux monophasé. L'onduleur est utilisé pour convertir la puissance DC en puissance AC et alimenter le réseau électrique avec une qualité de puissance élevée.

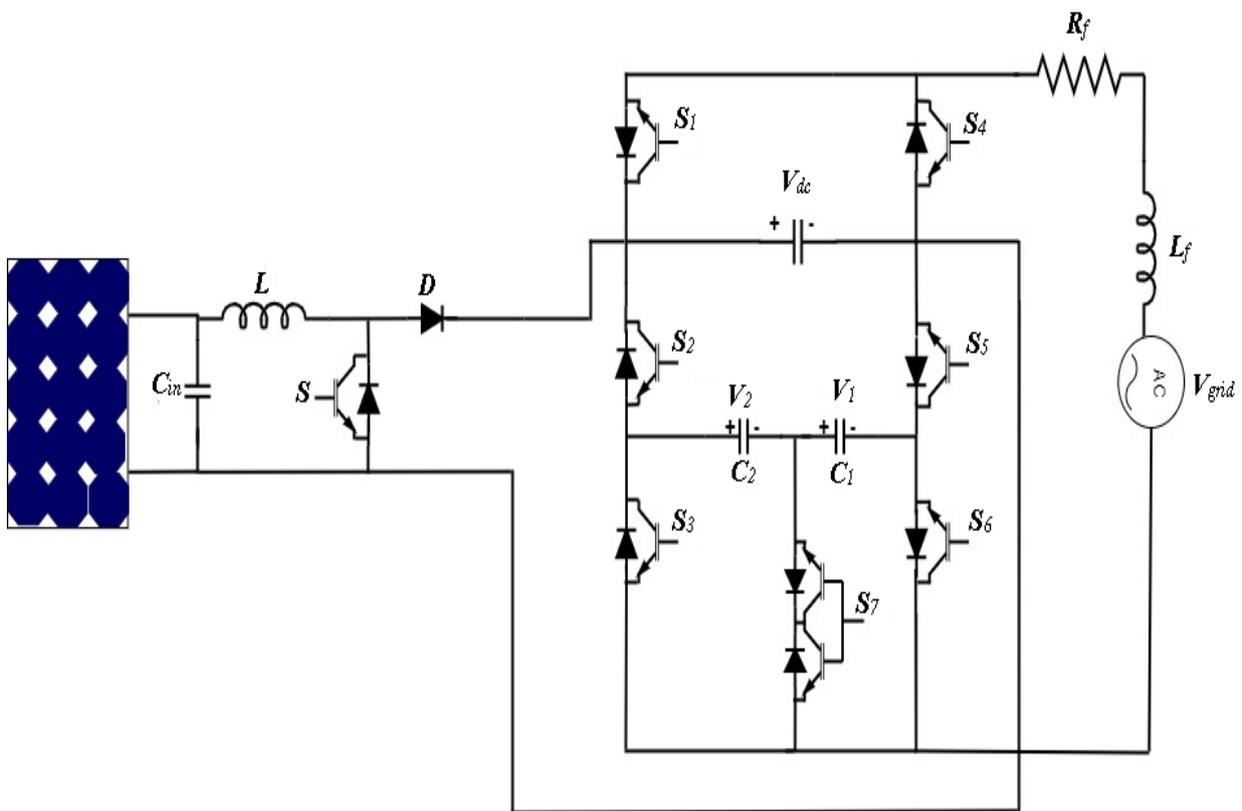


Figure II- 1 Structure du système PV connecté au réseau étudié.

### II.3. Modélisation du panneau photovoltaïque

En général, les cellules PV sont combinées en série et en parallèle, avant d'être enfermées dans une enveloppe en verre pour former un module photovoltaïque. Un panneau solaire photovoltaïque est composé de modules assemblés en série et/ou en parallèle (Figure II.2) pour former une unité capable de fournir une puissance élevée et continue, adaptée aux applications photovoltaïques domestiques ou industrielles [11, 12].

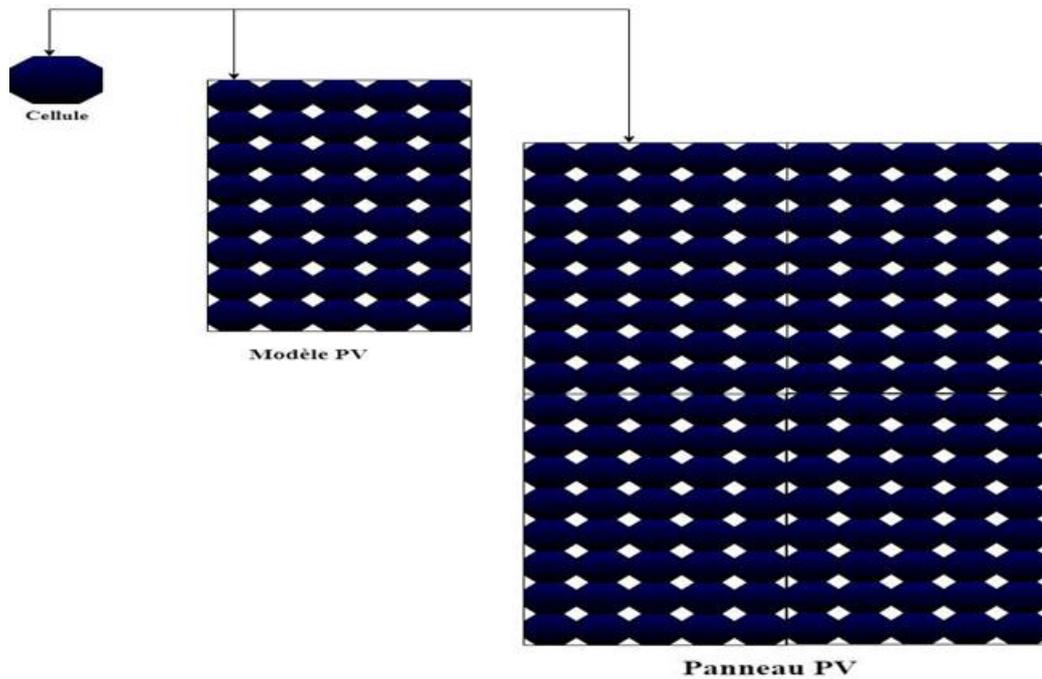


Figure II- 2 Constitution d'un panneau photovoltaïque.

### II.3.1. Modèle de la cellule photovoltaïque

Une cellule PV est modélisée dans la littérature par plusieurs circuits. Le circuit équivalent le plus couramment utilisé pour une cellule PV est composé d'une source de courant en parallèle avec une diode, une résistance de shunt  $R_{sh}$  et une résistance de série  $R_s$  (Figure II.3) [11].

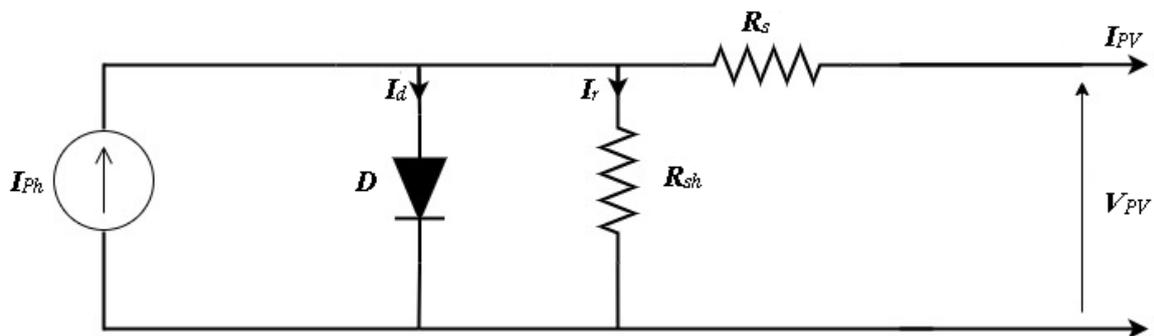


Figure II- 3 Circuit équivalent d'une cellule PV.

Le courant de sortie de la cellule est donné par l'équation suivante :

$$I_{PV} = I_{ph} - I_d - I_r = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{V_{PV} + R_s I_{PV}}{nV_t}} - 1 \right) - \frac{V_{PV} + R_s I_{PV}}{R_{sh}} \quad (II.1)$$

Où :

$I_{PV}$ : le courant de sortie de la cellule [A].

$I_{ph}$  : la photo courant de la cellule [A], proportionnel à l'irradiance solaire, donné par :

$$I_{ph} = (I_{sc,STC} + K_i(T - T_{STC})) \frac{G}{G_{STC}} \quad (II.2)$$

Avec :

$I_{sc,STC}$  : le courant de court-circuit dans les conditions de test standard (STC) [A].

$K_i$  : le coefficient de température du courant de court-circuit, normalement fourni par le fabricant.

$T$  : la température de la cellule [°K].

$T_{STC}$  : la température de la cellule aux STC (298,15°K).

$G$  : l'irradiance solaire incidente sur la surface de la cellule [W/m<sup>2</sup>].

$G_{STC}$  : l'irradiance en conditions STC (1000 W/m<sup>2</sup>).

$I_r$  : le courant traversant la résistance shunt [A].

$I_d$  : le courant de la diode [A].

$I_0$  : le courant de saturation inverse de la diode [A], décrit comme suit :

$$I_0 = I_{0,STC} \left( \frac{T_{STC}}{T} \right)^3 e^{\left[ \frac{qE_g}{nk} \left( \frac{1}{T_{STC}} - \frac{1}{T} \right) \right]} \quad (II.3)$$

Avec:

$I_{0,STC}$  : le courant de saturation inverse de la diode dans les conditions STC, exprimé comme suit :

$$I_{0,STC} = \frac{I_{sc,STC}}{e^{\left( \frac{V_{0c,STC}}{nV_{t,STC}} \right)}} \quad (II.4)$$

$V_{0c,STC}$  : la tension de circuit ouvert dans les conditions STC [V].

$V_{t,STC}$  : la tension thermique dans les conditions STC (0,02569 V).

$n$  : le facteur d'idéalité de la diode (coefficient dépendant du matériau de la cellule PV, généralement pour les cellules PV :  $1 < n < 2$ ).

$E_g$  : l'énergie de bande de la cellule (silicium cristallin  $E_g = 1,12$  eV)

$k$  : la constante de Boltzmann ( $1,38 \times 10^{-23}$  J/°K)

$q$  : la charge électrique

$V_{PV}$  : la tension de sortie de la cellule [V].

$V_t$  : la tension thermique [V], donnée par :

$$V_t = \frac{kT}{q} \quad (II.5)$$

### II.3.2. Modèle du module photovoltaïque

Le modèle présenté précédemment concerne une seule cellule PV. Pour le modèle du module, il est nécessaire d'intégrer un certain nombre de cellules en parallèle/série, formant ainsi un module. La Figure II.4 montre le circuit équivalent d'un module PV. Ainsi, le courant du module PV est exprimé par [12]:

$$I_{PV} = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left( e^{\frac{N_s V_{PV} + (N_s/N_p) R_s I_{PV}}{n N_s V_t}} - 1 \right) - \frac{N_s V_{PV} + (N_s/N_p) R_s I_{PV}}{(N_s/N_p) R_{sh}} \quad (II.6)$$

Où :

$I_{PV}$  : le courant de sortie du module [A].

$V_{PV}$  : la tension de sortie du module [V].

$N_s$  : le nombre de cellules connectées en série par module.

$N_p$  : le nombre de cellules connectées en parallèle par module.

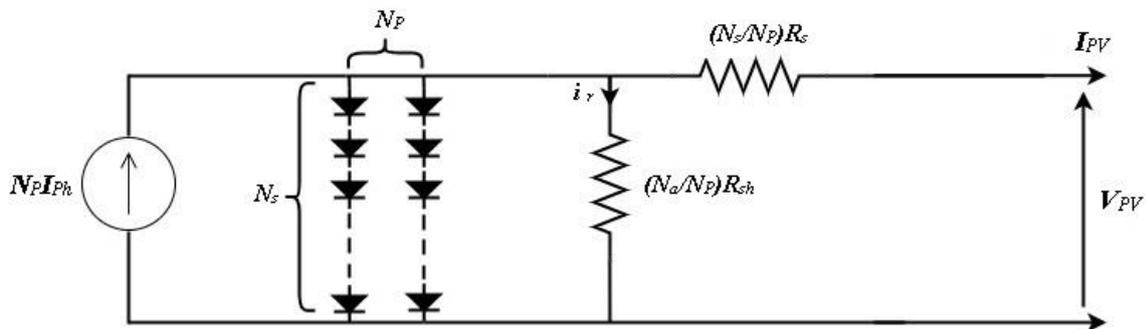


Figure II- 4 Circuit équivalent d'un module PV.

Les caractéristiques d'un module PV sont présentées dans la Figure II.5.

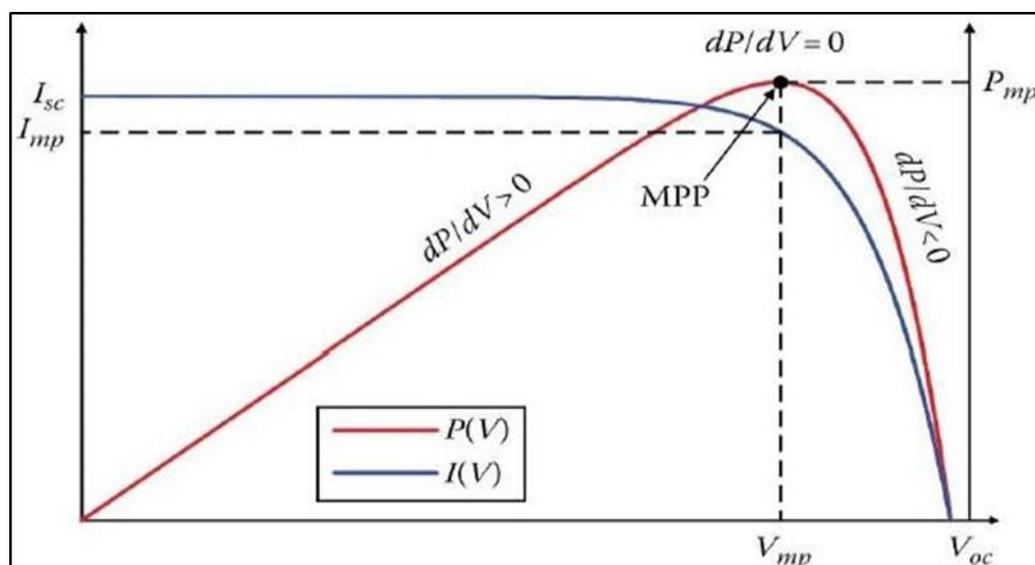


Figure II- 5 Caractéristiques d'un module PV.

Sur la Figure II.5, il y a trois points remarquables [11, 12]:

- **Le point de court-circuit**  $(0, I_{sc})$  : (c'est-à-dire le point où la courbe I-V rencontre l'axe de tension), où  $I_{sc}$  est le courant de court-circuit qui peut être mesuré en connectant les bornes positive et négative des modules PV. Il correspond à la valeur la plus élevée du courant généré lorsque la tension est nulle.
- **Le point de circuit ouvert**  $(V_{oc}, 0)$ : (c'est-à-dire le point où la courbe I-V rencontre l'axe de courant), où  $V_{oc}$  est la tension de circuit ouvert du module PV. Il représente la tension du module dans l'obscurité. Dans ce cas, aucun courant n'est généré.
- **Le point de puissance maximale, MPP**  $(V_{mpp}, I_{mpp})$ : dans ce cas, le module PV fonctionne à un rendement optimale et fournit une puissance maximale  $P_{mpp}$  donnée par :

$$P_{mpp} = I_{mpp}V_{mpp} \quad (\text{II.7})$$

Avec :

$I_{mpp}$  et  $V_{mpp}$  : sont respectivement les valeurs optimales du courant et de la tension du module PV.

En outre, deux paramètres importants du module PV peuvent également être définis :

- **Le facteur de forme  $FF$**  : c'est le rapport de la puissance maximale qui peut être extraite au produit  $I_{sc}V_{oc}$ :

$$FF = \frac{P_{mpp}}{I_{sc}V_{oc}} = \frac{I_{mpp}V_{mpp}}{I_{sc}V_{oc}} \quad (\text{II.8})$$

- **L'efficacité de conversion  $\eta$**  : c'est le rapport de la puissance électrique maximale qui peut être extraite à la puissance de rayonnement incidente  $G$  sur la surface  $S_r$  du module PV :

$$\eta = \frac{P_{mpp}}{S_r G} = \frac{I_{mpp}V_{mpp}}{S_r G} = \frac{I_{sc}V_{oc}FF}{S_r G} \quad (\text{II.9})$$

### II.3.3. Modèle du panneau photovoltaïque

Un panneau PV se compose d'un certain nombre de modules PV connectés en série/parallèle pour obtenir la tension, le courant et la puissance souhaités. La taille d'un panneau varie d'un seul module à un certain nombre de modules. Le courant et la tension de sortie d'un panneau PV peuvent être calculés à partir des équations suivantes :

$$I_{PVt} = N_{pp} I_{PV} \quad (\text{II.10})$$

$$V_{PVt} = N_{ss} V_{PV} \quad (\text{II.11})$$

Où:

$I_{PVt}$  : le courant de sortie du panneau PV [A].

$V_{PVt}$  : la tension de sortie du panneau PV [V].

$I_{PV}$  : le courant de sortie du module PV [A].

$V_{PV}$  : la tension de sortie du module PV [V].

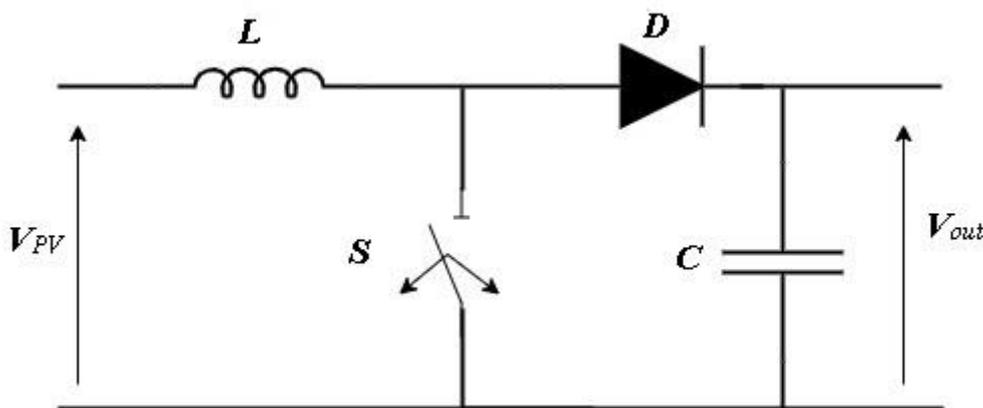
$N_{ss}$  : le nombre de modules PV connectés en série par panneau.

$N_{pp}$  : le nombre de modules PV connectés en parallèle par panneau.

## II.4. Modélisation des convertisseurs de puissance

### II.4.1. Modèle du convertisseur élévateur (Boost)

Un convertisseur Boost est un élévateur de tension. La Figure II.6 montre un circuit équivalent d'un convertisseur Boost typique, qui se compose d'une diode, d'un interrupteur électronique (IGBT), d'une bobine  $L$  et d'un condensateur  $C$ . Le condensateur agit comme un filtre pour améliorer la qualité de la tension de charge [13].



**Figure II- 6** Circuit d'un convertisseur Boost.

La modélisation de ce convertisseur passe par l'analyse des différentes séquences de fonctionnement que nous supposons de durées fixes par la commande  $S$ . Pendant le fonctionnement du convertisseur élévateur, l'interrupteur sera commuté à une fréquence  $f_c$  avec un temps de fermeture égal à  $DT_c$  et un temps d'ouverture égal à  $(1 - D)T_c$ . Deux séquences de fonctionnement apparaissent donc en fonction de l'état de l'interrupteur (Figure II.7), que l'on peut représenter chacune par une équation différentielle :

- Lorsque le commutateur est fermé pour  $t \in [0 DT_c]$  (Figure II.7(a)):

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} I_L = \frac{1}{L} V_{PV} \\ \frac{d}{dt} V_{DC} = -\frac{1}{C} I_{out} \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

- Lorsque le commutateur est ouvert pour  $t \in [DT_c T_c]$  (Figure II.7(b)):

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} I_L = \frac{1}{L} (V_{PV} - V_{DC}) \\ \frac{d}{dt} V_{DC} = -\frac{1}{C} (I_L - I_{out}) \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

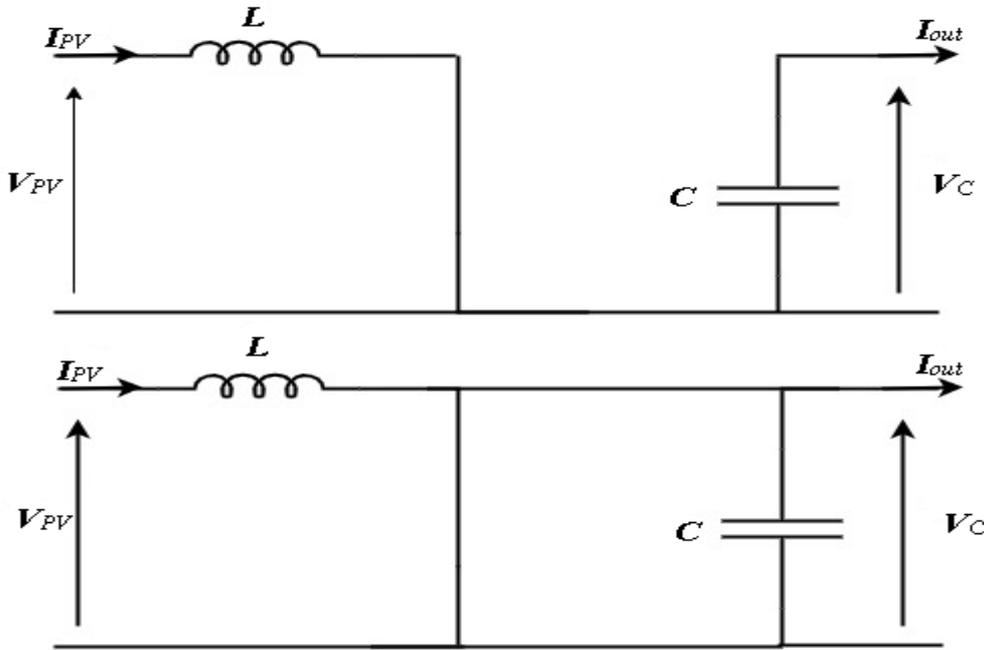


Figure II- 7 Circuit équivalent du Boost: (a) l'interrupteur est fermé et (b) l'interrupteur est ouvert.

En multipliant les équations (II.12) et (II.13) respectivement par  $DT_c$  et  $(1 - D)T_c$ , nous obtenons le modèle dynamique du convertisseur Boost :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} I_L = \frac{1}{L} V_{PV} - (1 - D) \frac{1}{L} V_{DC} \\ \frac{d}{dt} V_{DC} = (1 - D) \frac{1}{C} I_L - \frac{1}{C} I_{out} \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

Où:

$I_L$  : le courant d'entrée du convertisseur Boost [A].

$V_{PV}$ : la tension d'entrée du convertisseur Boost [V].

$V_{DC}$  : la tension de sortie du convertisseur Boost [V].

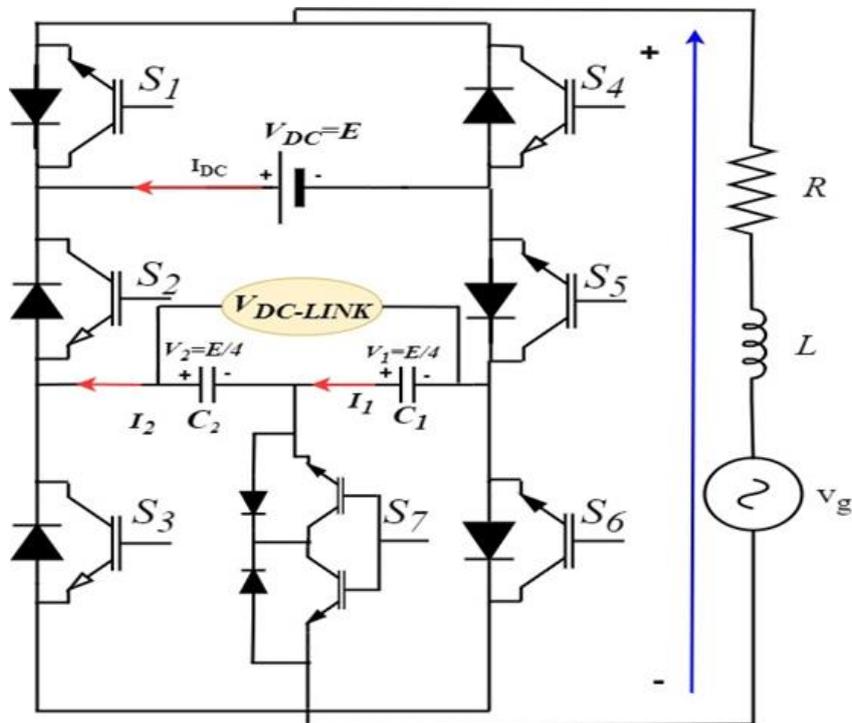
$I_{out}$  : le courant de sortie du convertisseur Boost [A].

$T_c$  : la période de commutation du convertisseur élévateur (qui est égale à  $1/f_c$ ) [s].

$D$  : le rapport cyclique ( $D \in [0,1]$ ).

### II.4.2. Modèle de l'onduleur à cellules en E empilées à neuf niveaux

L'onduleur à cellules en E empilées à neuf niveaux connecté au réseau est représenté dans la Figure II.8, qui est relié au réseau via un filtre  $RL$ . L'onduleur PEC9 est composé d'une source continue  $V_{DC}$ , de deux condensateurs  $C_1$  et  $C_2$  étendus horizontalement, de six interrupteurs bidirectionnels en courant notés  $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5$  et  $S_6$ , et d'un interrupteur quatre quadrants noté  $S_7$ . Ce dernier est connecté entre le point milieu des condensateurs et la borne négative de sortie du PEC9, qui forment une cellule de type E. Les états de commutation du PEC9 ainsi que la topologie des états de tension des condensateurs DC sont détaillés dans le Tableau II.1 [14]. Les paires d'interrupteurs  $(S_1, S_4), (S_2, S_5), (S_3, S_6, S_7)$  fonctionnent de façon complémentaire. Dans le fonctionnement normal de PEC9, douze états de commutation possibles sont choisis pour obtenir la tension désirée à neuf niveaux à la sortie de l'onduleur. Si  $V_{DC} = E$  et  $V_1 = V_2 = V_{DC}/4 = E/4$ , la forme d'onde de tension de sortie de l'onduleur  $V_{inv}$  contient neuf niveaux de tension tels que  $0, \pm E/4, \pm E/2, \pm 3E/4, \pm E$  listés dans le Tableau II.1.



**Figure II- 8** Circuit d'un onduleur PEC9 connecté au réseau.

**Tableau II. 1** Les états de commutation et niveaux de tension de l'onduleur PEC9.

Etats de commutation	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$	$S_7$	$C_1$	$C_2$	Tension de sortie $V_{inv}$
1	1	0	0	0	1	1	0	Pas d'effet	Pas d'effet	$V_{dc} = +E$
2	1	0	0	0	1	0	1	Pas d'effet	charge	$V_{dc} - V_2 = +3E/4$
3	1	0	1	0	1	0	0	charge	charge	$V_{dc} - V_1 - V_2 = +E/2$
4	1	1	0	0	0	1	0	décharge	décharge	$V_1 + V_2 = +E/2$
5	1	1	0	0	0	0	1	décharge	Pas d'effet	$V_1 = +E/4$
6	0	0	0	1	1	1	0	Pas d'effet	Pas d'effet	0
7	1	1	1	0	0	0	0	Pas d'effet	Pas d'effet	0
8	0	0	0	1	1	0	1	Pas d'effet	décharge	$-V_2 = -E/4$
9	0	0	1	1	1	0	0	décharge	décharge	$-V_1 - V_2 = -E/2$
10	0	1	0	1	0	1	0	charge	charge	$-V_{dc} + V_1 + V_2 = -E/2$
11	0	1	0	1	0	0	1	charge	Pas d'effet	$-V_{dc} + V_1 = -3E/4$
12	0	1	1	1	0	0	0	Pas d'effet	Pas d'effet	$-V_{dc} = -E$

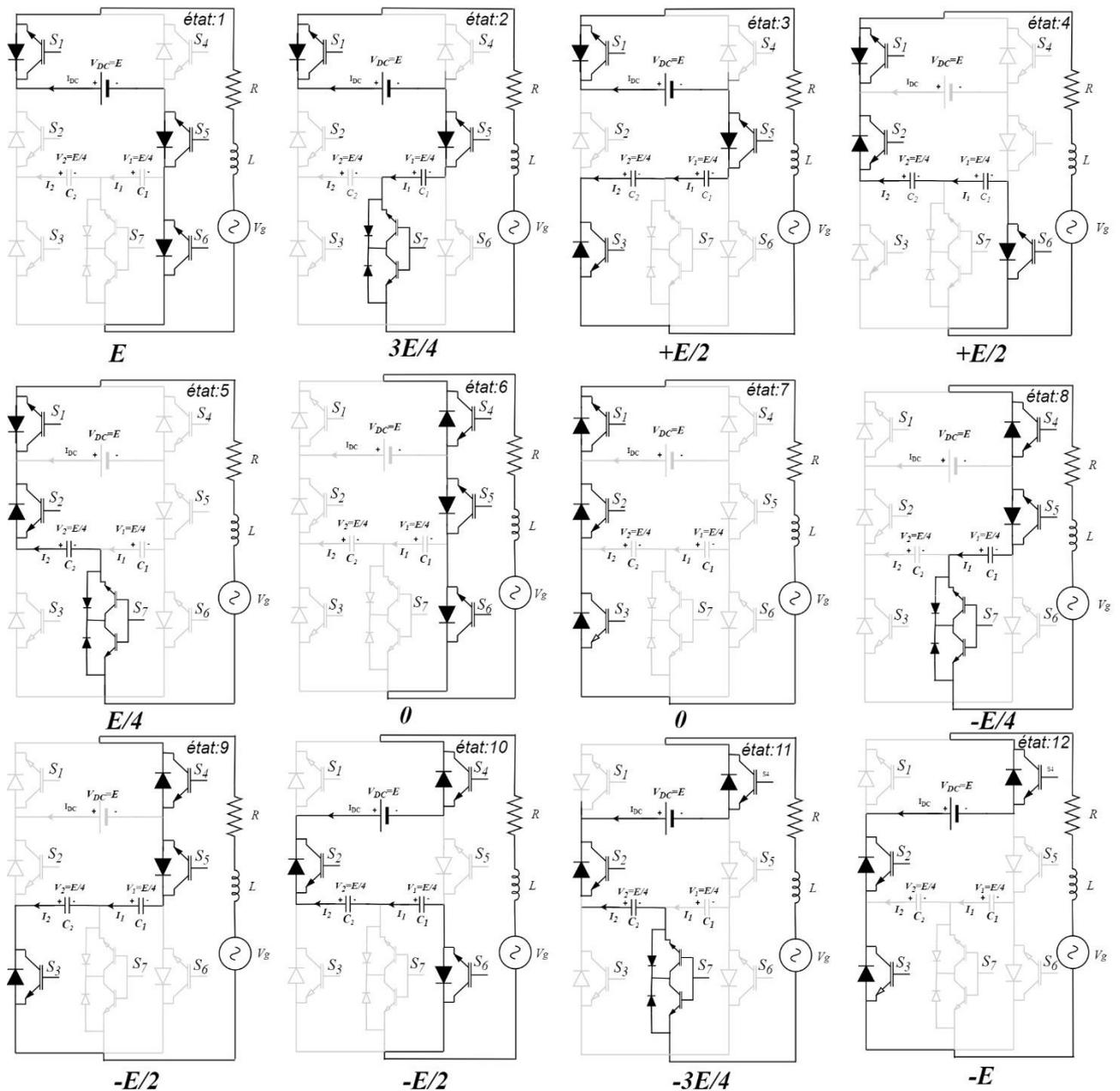


Figure II- 9 Les états de commutation de l'onduleur PEC9.

## II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons modélisé les différents composants d'un système photovoltaïque monophasé connecté au réseau, tel que le panneau photovoltaïque, le convertisseur DC-DC Boost, l'onduleur à cellules en E empilées à neuf niveaux.

Le chapitre suivant sera consacré à la conception des lois de commande du système photovoltaïque monophasé connecté au réseau avec un onduleur à cellules en E empilées à neuf niveaux.

# Chapitre III :

## Elaboration d'un schéma de commande pour un système photovoltaïque interconnecté au réseau avec un onduleur multiniveaux PEC9

---

### III.1. Introduction

Les systèmes photovoltaïques connectés au réseau ont l'avantage d'utiliser de façon plus efficace la puissance photovoltaïque extraite. Cependant, des exigences techniques des deux côtés doivent être satisfaites pour assurer une bonne fiabilité de l'installation photovoltaïque et du réseau électrique. L'interconnexion est assurée par des convertisseurs statiques, qui convertissent les grandeurs continues fournies par les modules photovoltaïques en grandeurs alternatives.

Ces convertisseurs permettent non seulement la connexion au réseau mais aussi l'extraction de la puissance maximale des panneaux photovoltaïques grâce à un algorithme de recherche du point de puissance maximale et l'amélioration de qualité de l'énergie injectée sur le réseau. La sélection et la commande de ces convertisseurs sont donc très importantes.

Dans ce cadre, un schéma de commande est élaboré dans cette partie pour un système photovoltaïque connecté au réseau avec un onduleur multiniveaux PEC9, afin d'obtenir des meilleures performances de chaque composant du système sous différentes conditions de fonctionnement.

### III.2. Schéma de commande proposé:

Le schéma de commande proposé pour le système PV connecté au réseau avec un onduleur multiniveaux PEC9 est présenté par la Figure III.1 et est basé sur la commande prédictive. Les objectifs visés par le schéma de commande proposé visent :

- L'extraction maximale de la puissance photovoltaïque via l'algorithme MPPT suggéré.
- Le contrôle du bus continu pour assurer un bon fonctionnement de l'onduleur.
- L'amélioration de la qualité des courants injectés.

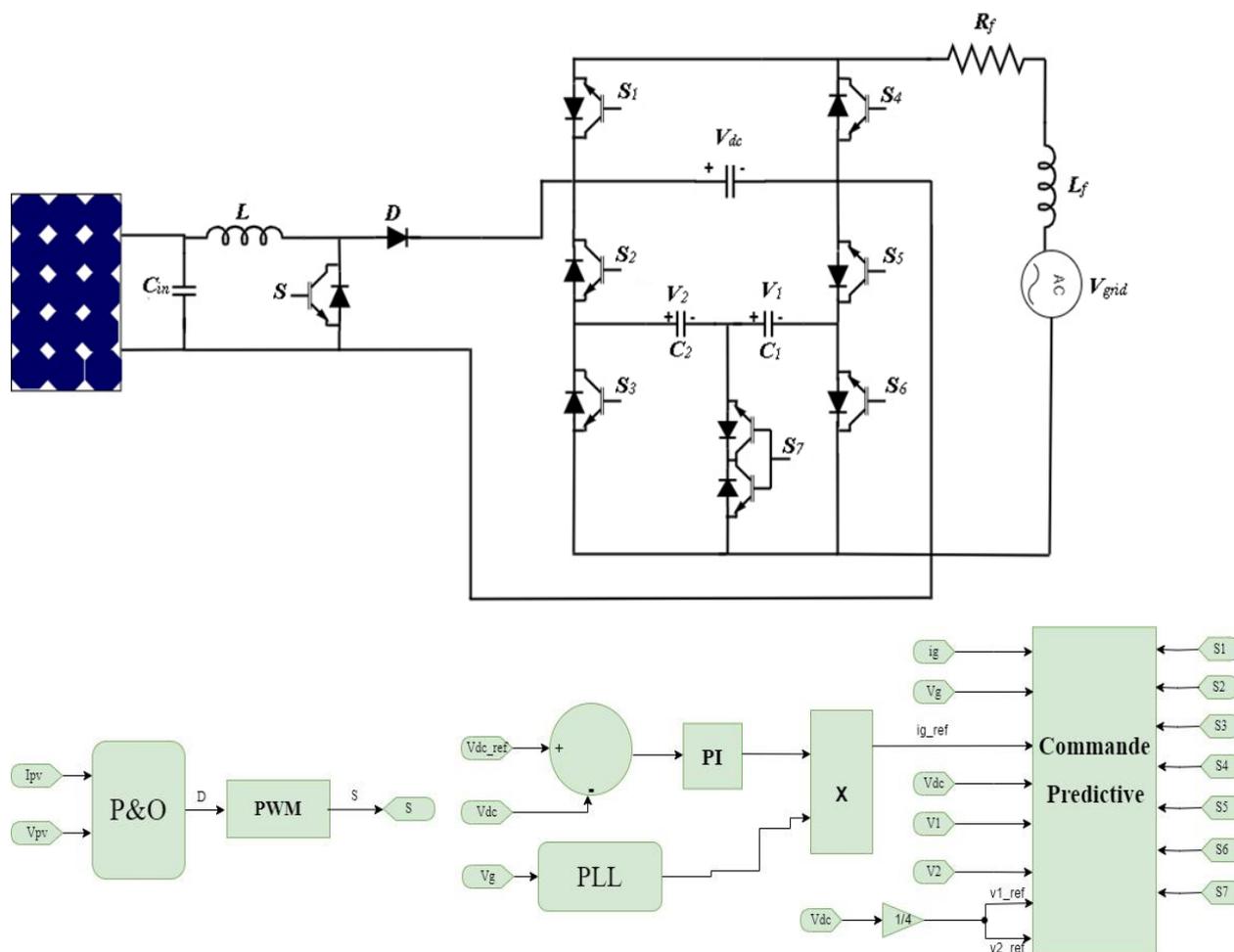


Figure III- 1 Schéma de contrôle suggéré pour le système PV connecté au réseau avec un onduleur PEC9 étudié.

### III.2.1. Commande MPPT P&O

Le fonctionnement du panneau PV est particulièrement non-linéaire et dépendant de nombreux paramètres de sorte que l'énergie récupérée n'est pas forcément maximale. Dans ce contexte, de nombreux chercheurs se sont attachés à inventer des systèmes permettant de récupérer toujours le maximum d'énergie, c'est le principe nommé Maximum Power Point Tracker (MPPT) [15].

Différents types d'algorithmes MPPT ont été déjà proposés dans la littérature [15]. Parmi les nombreux algorithmes, la méthode Perturbation et Observation (P&O) est la méthode la plus utilisée dans l'industrie, en raison du bon équilibre entre la complexité et la fiabilité de cette méthode [16].

L'algorithme P&O a pour objectif de faire fonctionner le système à sa puissance maximale par l'incrémentation ou décrémentation de la tension du point de fonctionnement et l'observation de l'effet de cette perturbation sur la puissance débitée par le panneau PV. Selon cette observation, l'algorithme décide sur l'acte à faire pendant la prochaine itération. Quatre cas de situation pour P&O sont envisagés par la Figure III.2 et récapitulés dans le Tableau III.1.

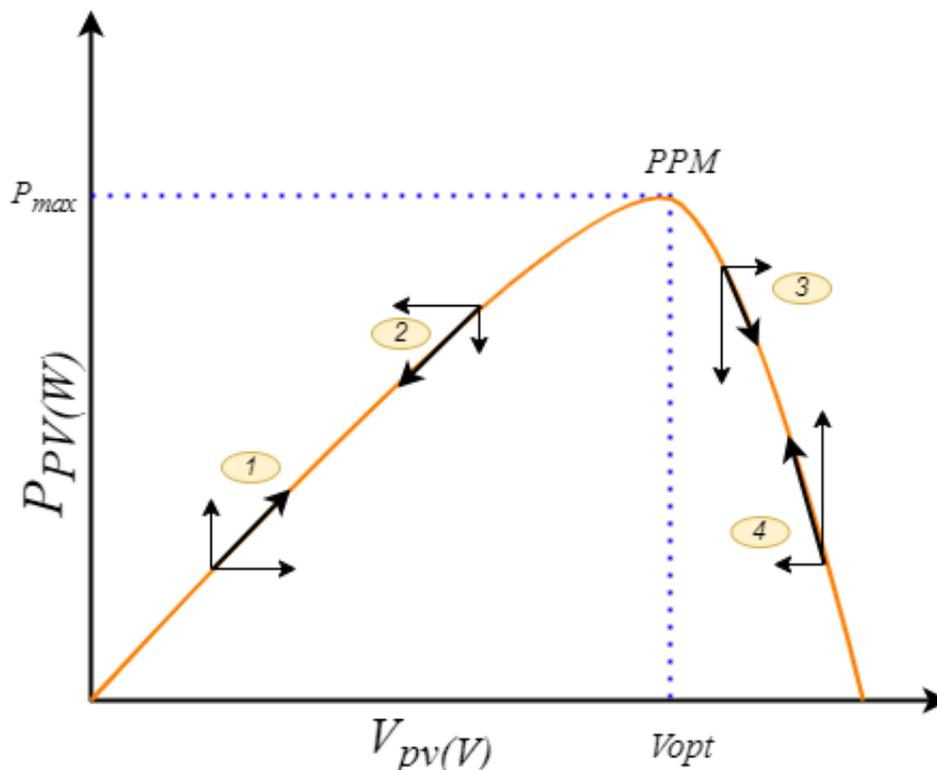


Figure III- 2 Caractéristique de fonctionnement de la méthode P&O.

Tableau III. 1 Principe de la méthode P&O.

Cas n°	$\Delta V_{PV}$	$\Delta P_{PV}$	Sens de la poursuite	Puissance délivrée
1	+	+	Bon	$V_{ref} = V_{ref} + \Delta V$
2	-	-	Mauvais	$V_{ref} = V_{ref} + \Delta V$
3	+	-	Mauvais	$V_{ref} = V_{ref} - \Delta V$
4	-	+	Bon	$V_{ref} = V_{ref} - \Delta V$

L'algorithme P&O (Figure III. 3) a comme avantage la précision et la rapidité de réaction. Il permet de déterminer le point de puissance maximale pour un ensoleillement et une température ou un niveau de dégradation des caractéristiques.

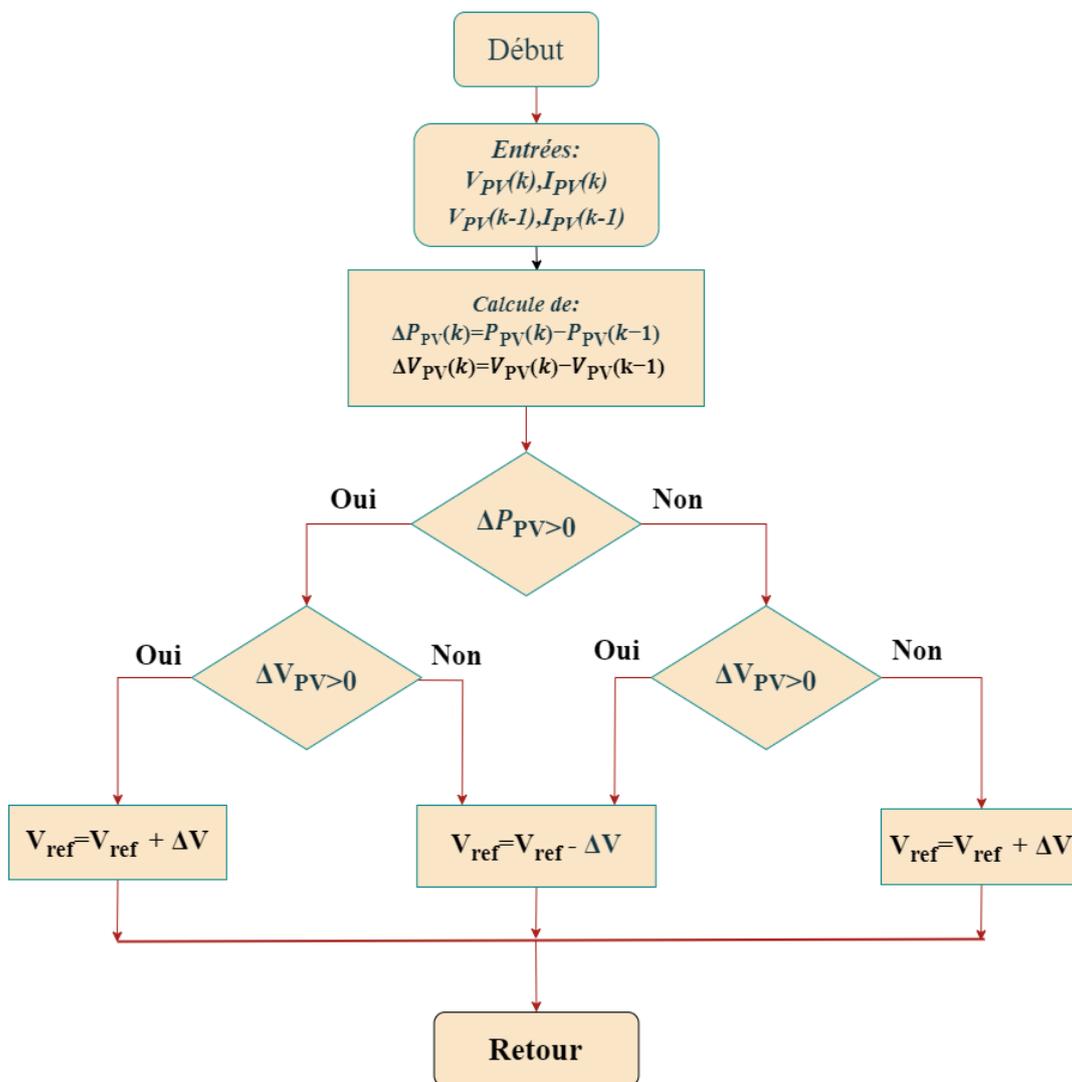


Figure III- 3 Organigramme de la méthode P&O.

### III.2.2. Contrôle du bus continu

Pour réduire les variations de la tension du condensateur du bus continu et compenser les pertes du système liées à l'échange d'énergie entre le système PV et le réseau principal, un régulateur proportionnel-intégral (PI) est utilisé pour diminuer la fluctuation de la tension dans le bus continu et la réguler à une valeur désirée. La Figure III.3 montre le synoptique du régulateur PI, où l'entrée est l'erreur entre la tension du condensateur du bus continu  $V_{DC}$  et la valeur de référence  $V_{DC-ref}$ , la sortie du régulateur est l'amplitude du courant de référence à injecter dans le réseau  $I_{g-ref}$  [17-18].

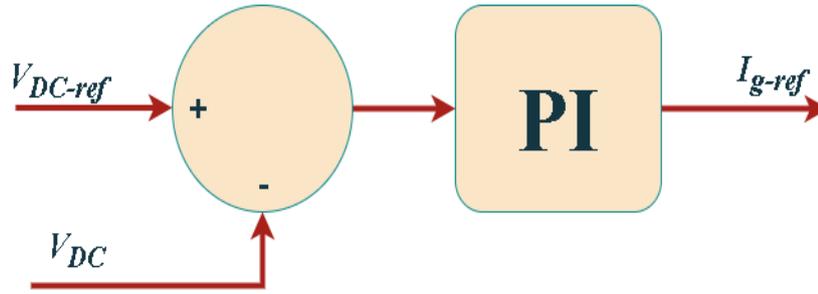


Figure III- 4 Schéma de régulation de la tension du bus continu.

Le régulateur PI peut être modélisé comme un système du second ordre comme suit [17-18]:

$$\frac{V_{DC}}{V_{DC\_ref}} = \frac{k_p s + k_i}{C_1 s^2 + k_p s + k_i} = \frac{\frac{k_p}{C_1} s + \frac{k_i}{C_1}}{s^2 + \frac{k_p}{C_1} s + \frac{k_i}{C_1}} \quad (\text{III.1})$$

L'équation caractéristique de la fonction de transfert de second ordre peut être exprimée comme suit:

$$s^2 + \frac{k_p}{C_1} s + \frac{k_i}{C_1} = s^2 + \xi \omega_n s + \omega_n^2 \quad (\text{III.2})$$

Ainsi, le gain  $k_i$  et  $k_p$  peuvent être exprimés comme suit:

$$k_p = 2\xi\omega_n C_1 \quad k_i = C_1 \omega_n^2 \quad (\text{III.3})$$

et

Où :  $\xi$  est le coefficient d'amortissement et  $\omega_n$  est la fréquence naturelle.

### III.2.3. Boucle à verrouillage de Phase (P.L.L.)

Une boucle à verrouillage de phase (PLL) produit en sortie un signal unitaire synchronisé en phase et en fréquence avec le signal d'entrée. Le PLL est assuré que, l'erreur dans la phase entre l'entrée et la sortie est gardée au minimum, et que la fréquence de l'entrée et la sortie est la même [19]. Le circuit PLL de base se compose souvent de trois composants, d'un détecteur de phase, d'un filtre de boucle et d'un oscillateur commandé en tension. Ce circuit de base est montré sur la Figure III.5.

Les multiples blocs de contrôle du système PV connecté au réseau électrique se fondent sur les informations fournies par le PLL pour régler leurs signaux de commande. La tension source du réseau est extraite à l'aide d'un système basé sur une boucle à verrouillage de phase

(PLL). Le sinus unitaire est généré par le même système. Le signal de tension du réseau doit être sinusoïdal et équilibré pour que le contrôle soit fiable et viable [18].

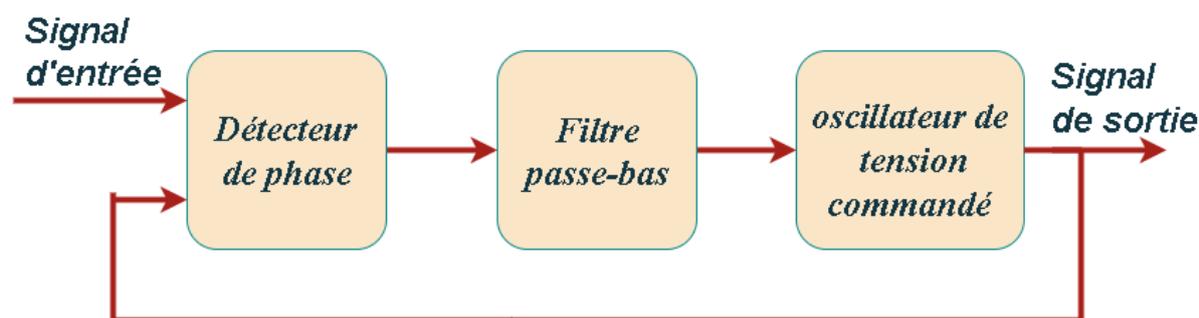


Figure III- 5 Diagramme de blocs d'une PLL.

### III.2.4. Contrôle prédictif du courant injecté

#### III.2.4.1. Principe de la commande prédictive

La commande prédictive, Model predictive control (MPC), est une technique de commande avancée. Elle a pour objectif la commande des systèmes industriels complexes comportant plusieurs entrées et sorties où le simple régulateur PI est insuffisant. Le principe de cette commande est d'utiliser un modèle dynamique du système commandé à l'intérieur du contrôleur en temps réel afin d'anticiper le futur comportement du système [19-20]. Cette structure présente plusieurs avantages importants:

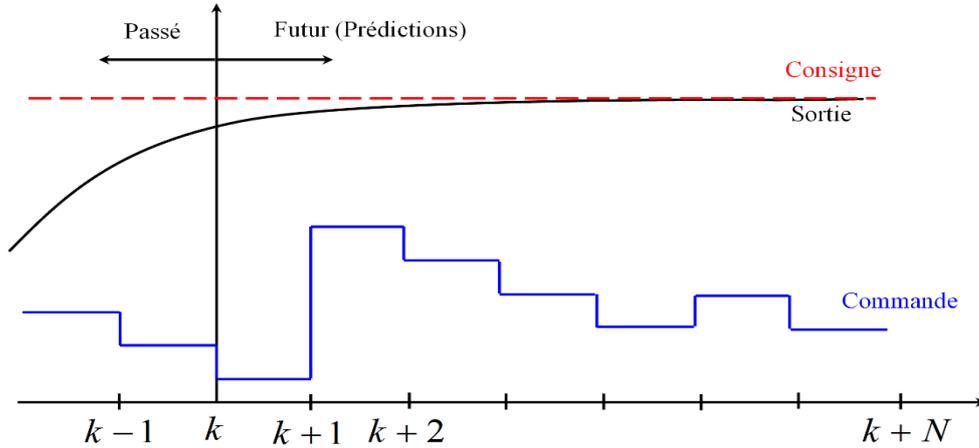
- Les concepts sont très intuitifs et facile à comprendre, elle peut être appliquée à une grande variété de systèmes
- Le cas multi variable peut être facilement considéré.
- Les temps morts peuvent être compensés
- Inclusion facile des non linéarités dans le modèle
- Traitement simple des contraintes
- Le contrôleur résultant est facile à mettre en œuvre et à implémenter.

Le principe de fonctionnement de la commande prédictive est illustré dans la Figure III.6 [19-20] :

- Les valeurs futures des états du système sont prévues jusqu'à un horizon prédéfini dans le temps ( $k + N$ ) en utilisant le modèle du système et les informations disponibles (mesures).
- La séquence des actions optimales est calculée en minimisant la fonction de coût et

le premier élément de cette séquence est appliqué.

- L'ensemble de ce processus est répété pour chaque instant d'échantillonnage en tenant compte des nouvelles données mesurées.



**Figure III- 6** Principe de la commande prédictive.

### III.4.2. Algorithme du contrôle prédictif

Pour appliquer la commande prédictive à l'onduleur PEC9, il faut suivre les quatre étapes suivantes :

- Estimation des variables prédites du système à l'aide d'un modèle discret.
- Extrapolation des courants de référence.
- Evaluation de la fonction de coût pour les 12 états de commutation du convertisseur.
- Sélection de l'état de commutation qui minimise la fonction de coût, puis on l'applique à l'onduleur PEC9.

Un modèle de temps discret du système est nécessaire pour prédire le comportement des variables évaluées par la fonction de coût. Afin de discrétiser le modèle de système, l'approximation d'Euler est utilisée en raison de sa simplicité. Il donne également une précision acceptable qui est nécessaire pour de bonnes performances. Selon cette approche, nous avons la forme de temps discrète du système comme suit [19-20-21]:

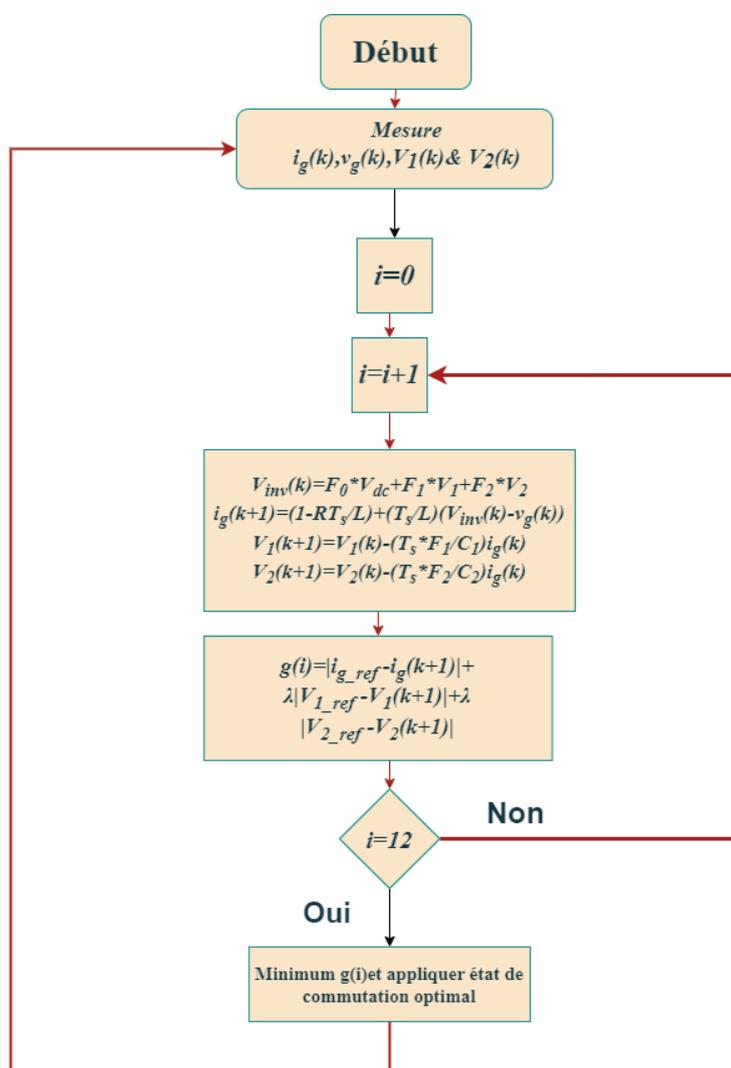
$$\frac{dx(t)}{dt} = \frac{x(k+1) - x(k)}{T_s} \tag{III.4}$$

Où :

$T_s$  : est le temps d'échantillonnage.

$x(k + 1)$  et  $x(k)$ : sont la valeur de la variable d'état dans le prochain temps d'échantillonnage et à l'état actuel, respectivement

L'algorithme du contrôle prédictif du courant injecté avec l'onduleur PEC9 est illustré sur la Figure III.7. À partir des valeurs mesurées du courant injecté  $i_g(k)$ , de la tension de source  $v_g(k)$ , le courant injecté  $i_g(k + 1)$  est estimé pour tous les cas d'états de commutation de PEC9. Le courant injecté de référence est estimé à partir du régulateur PI puis extrapolé du  $k$ ème instant à l'instant d'échantillonnage  $(k + 1)$ . Les tensions prédites de condensateurs  $V_1(k + 1)$  et  $V_2(k + 1)$  sont également calculées pour tous les états de commutation. Après cela, une fonction de coût est évaluée afin de calculer la valeur optimale. L'état de commutation optimal choisi est appliqué pendant le temps d'échantillonnage suivant à l'onduleur PEC9 via les impulsions de commutation, qui sont produites en fonction de l'état de commutation approprié choisi par l'algorithme prédictif.



**Figure III- 7** Diagramme de l'algorithme du contrôle prédictif

Le modèle du courant injecté en utilisant PEC9 est donné par l'équation ci-après :

$$L_g \frac{di_g}{dt} = -R_g i_g + V_{inv} - v_g \quad (\text{III.5})$$

$$\begin{cases} \frac{dV_x}{dt} \approx \frac{1}{C_x} i_g \\ x = 1, 2 \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

Où  $i_g$  et  $v_g$  sont respectivement le courant injecté et la tension de source mesurés,  $V_{in}$  est la tension de sortie de l'onduleur PEC9 et  $L_g$  et  $R_g$  sont respectivement l'inductance et la résistance du filtre coté de source,  $V_x$  sont les tensions de condensateurs de liaison DC.

Les variables à contrôler sont le courant injecté  $i_g(k+1)$  et les tensions de condensateurs ( $V_1(k+1)$  et  $V_2(k+1)$ ). Par l'utilisation de la méthode d'Euler, l'équation III.5 est discrétisé afin d'obtenir une expression qui permet de prédire le futur courant à  $(k+1)$  pour les 12 possibles états de commutation appliqués à l'onduleur PEC9, cette expression s'écrit sous la forme suivante (l'équation III.7) :

$$i_g(k+1) = \left(1 - \frac{R_g T_s}{L_g}\right) i_g(k) + \frac{T_s}{L_g} (V_{inv}(k) - v_g(k)) \quad (\text{III.7})$$

Où :

$T_s$  : est le temps d'échantillonnage de l'algorithme prédictif.

Afin de simplifier l'utilisation des états de commutation  $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6$  et  $S_7$ , trois variables  $F_0, F_1$  et  $F_2$  sont introduites. Ils sont calculés comme suit :

$$\begin{cases} F_0 = (S_1 \overline{S_2} \overline{S_4} S_5) - (S_2 \overline{S_1} \overline{S_5} S_4) \\ F_1 = (\overline{S_2} \overline{S_3} \overline{S_5}) - (S_3 \overline{S_2} \overline{S_6} S_5 S_7) \\ F_2 = (S_2 \overline{S_3} \overline{S_5} S_6 \overline{S_7}) - (\overline{S_2} S_5 \overline{S_6}) \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

Le vecteur de tension généré par l'onduleur PEC9 peut être calculé donc comme suit :

$$V_{inv} = F_0 V_{DC} + F_1 V_1 + F_2 V_2 \quad (\text{III.9})$$

En utilisant à nouveau l'approximation d'Euler et l'équation III.6, les deux tensions de condensateurs pour le temps d'échantillonnage suivant ( $V_1(k+1)$  et  $V_2(k+1)$ ) peuvent être prédites pour assurer l'équilibre de tension des deux condensateurs de liaison DC en activant les commutateurs appropriés :

$$\begin{cases} V_1(k+1) = V_1(k) - \frac{T_s F_1}{C_1} i_g(k) \\ V_2(k+1) = V_2(k) - \frac{T_s F_2}{C_2} i_g(k) \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

Où  $C_1$  et  $C_2$  sont les condensateurs d'onduleur PEC9.

De plus, pour calculer la valeur future de l'erreur de courant, le courant injecté de référence est extrapolé du *kième* instant à l'instant d'échantillonnage  $(k+1)$  en utilisant la méthode d'extrapolation de Lagrange du second ordre et exprimé comme indiqué ci-dessous :

$$i_{g,ref}(k+1) = 3i_{g,ref}(k) - 3i_{g,ref}(k-1) + i_{g,ref}(k-2) \quad (\text{III.11})$$

En dernière étape, la fonction de coût est définie comme :

$$\begin{aligned} g = & |i_{g,ref}(k+1) - i_g(k+1)| + \lambda |V_{1,ref} - V_1(k+1)| \\ & + \lambda |V_{2,ref} - V_2(k+1)| \end{aligned} \quad (\text{III.12})$$

Où  $\lambda$  est un facteur de pondération et  $V_{1,ref} = V_{2,ref} = V_{DC,ref}/4$ .

L'objectif de l'optimisation de la fonction coût est de sélectionner la valeur de coût  $g$  aussi près que possible de zéro. L'état optimal de commutation qui minimise la fonction de coût est choisi et ensuite appliqué au convertisseur au moment du prochain instant d'échantillonnage

### III.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un schéma de commande pour une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque connectée au réseau avec un onduleur multiniveaux PEC9. Dans ce schéma, l'algorithme MPPT P&O est suggéré pour extraire la puissance maximale du panneau PV, un régulateur PI classique est utilisé pour la régulation de la tension du bus continu et un algorithme de contrôle prédictif du courant est développé pour contrôler le courant injecté dans le réseau.

Une validation par simulation sera exposée en détail au chapitre suivant pour tester la performance de ce schéma de commande sous différentes conditions de fonctionnement.

# Chapitre IV :

## Résultats de simulation

---

### IV.1. Introduction

La simulation joue un rôle crucial dans l'étude des systèmes photovoltaïques, car elle offre la possibilité de modifier facilement les paramètres du système, tels que l'éclairement, et d'évaluer les performances des techniques de commande dans différentes conditions. Pour effectuer une simulation, il est nécessaire de représenter le fonctionnement des composants du système à l'aide d'équations mathématiques qui peuvent être interprétées par le logiciel de simulation.

Dans ce chapitre on présentera la simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau à l'aide d'un onduleur multiniveaux PEC9 avec un schéma de commande basé la commande MPPT P&O et la commande prédictive. Dans le but de valider le schéma proposé, des résultats de simulation seront présentés et une comparaison sera effectuée.

### IV.2. Simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau avec un onduleur multiniveaux PEC9

La Figure IV.1 représente la configuration du système photovoltaïque raccordé au réseau avec un onduleur multiniveaux PEC9. Le générateur photovoltaïque est relié à un convertisseur DC-DC Boost qui assure le suivi du point de fonctionnement optimal, et alors l'ensemble est connecté au réseau électrique avec l'onduleur PEC9 commandé par une stratégie qui permet de synchroniser la source photovoltaïque avec le réseau.

Le panneau photovoltaïque utilisé dans cette simulation est formé de 2 modules en série et de 2 modules en parallèle (les modules de type 1Soltech 1STH-215-P). Afin d'observer l'influence des conditions climatiques (l'éclairement et de la température) sur les caractéristiques électriques du panneau, nous avons adopté la méthode suivante :

- Pour visualiser l'influence de l'éclairement, on fixe la température ambiante à  $25^{\circ}\text{C}$  et on fait varier l'éclairement dans une gamme suffisante.
- Pour un éclairement constant de  $1000\text{W/m}^2$ , nous ferons varier la température afin de voir l'influence de celle-ci par rapport aux caractéristiques du panneau photovoltaïque.

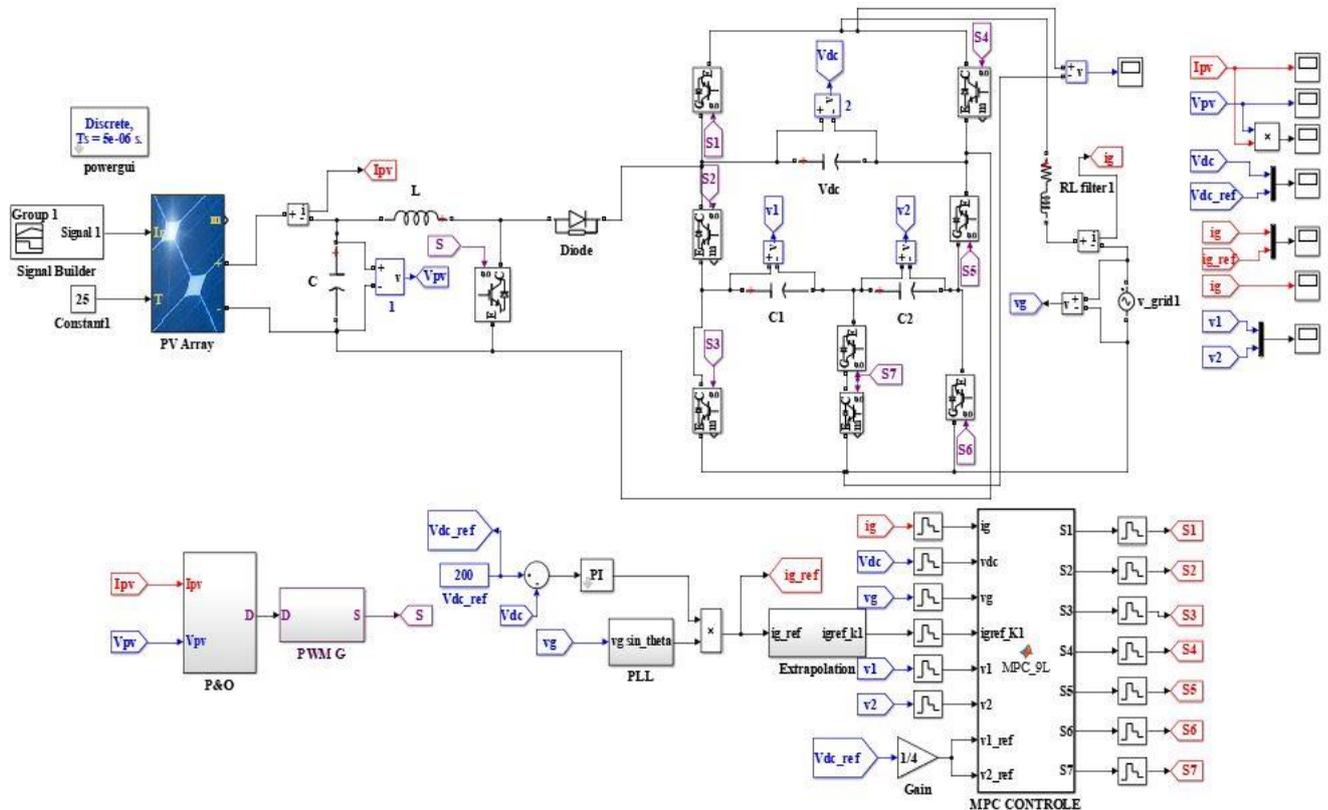
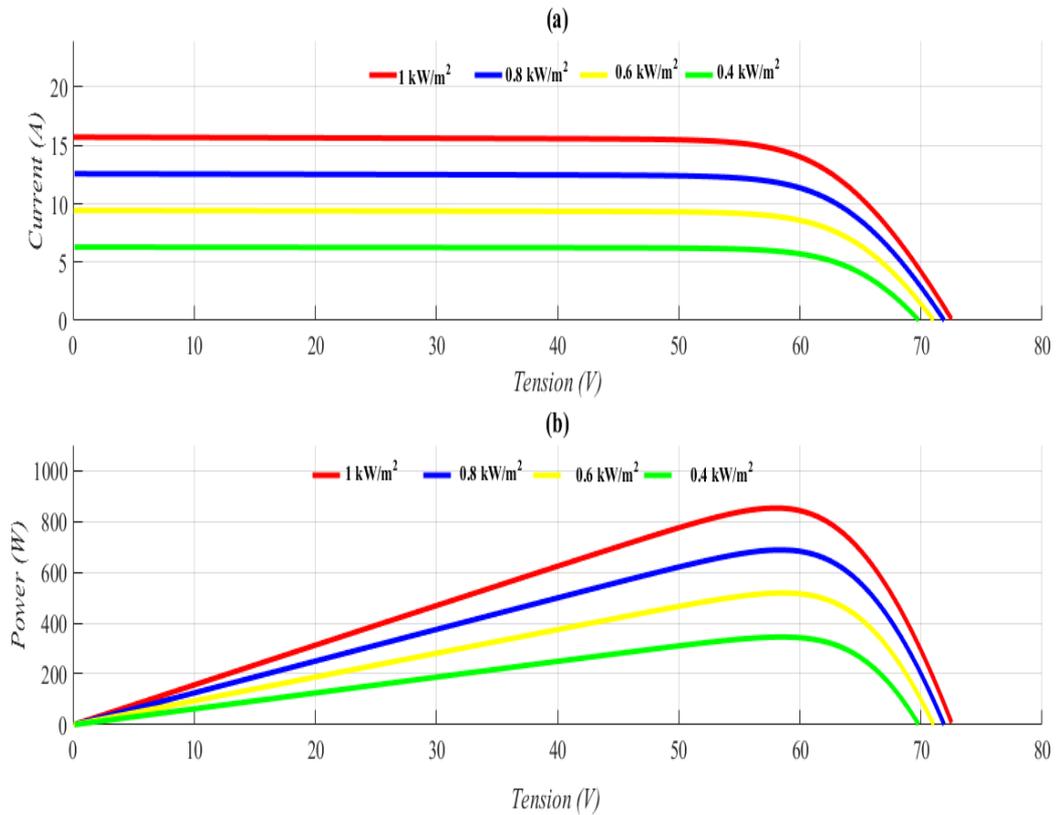
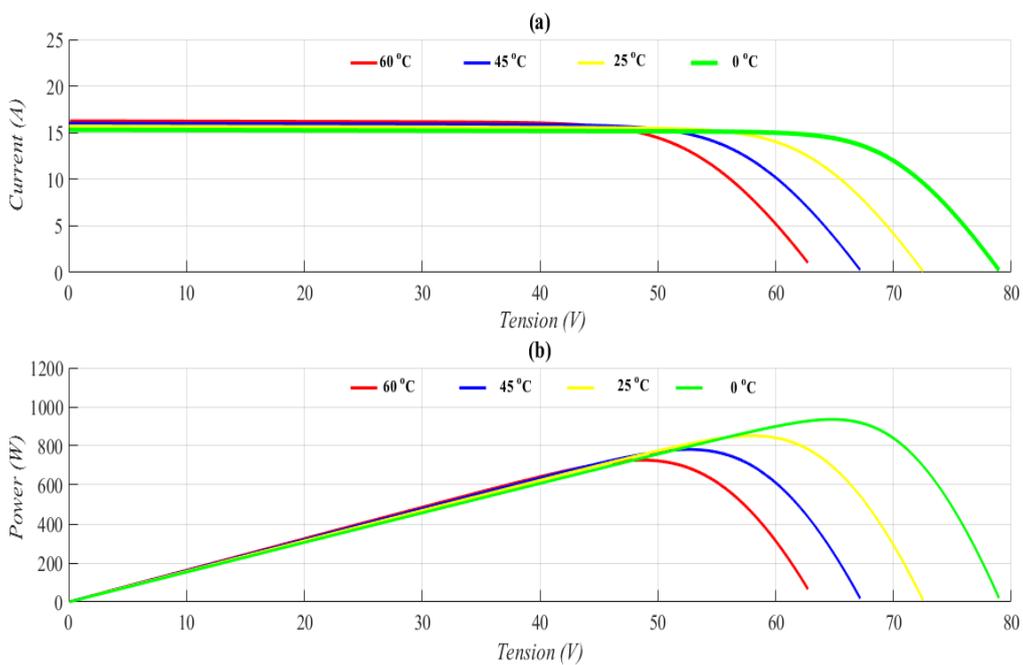


Figure IV- 1 Configuration du système photovoltaïque connecté au réseau avec un onduleur multiniveaux PEC9.

En faisant varier l'éclairement entre  $400\text{W/m}^2$  et  $1000\text{W/m}^2$  avec un pas de  $200\text{W/m}^2$ , les caractéristiques courant-tension et puissance-tension sont données par la Figure IV.2. D'après la Figure IV.2, on remarque que le courant produit par le panneau photovoltaïque augmente avec l'augmentation de l'éclairement, par contre, la tension du panneau varie légèrement avec l'éclairement solaire. La puissance optimale augmente avec l'augmentation de l'éclairement. Mais, les points de tension qui correspondent à la puissance optimale varient peu. En faisant aussi varier la température ambiante entre  $0^{\circ}\text{C}$  et  $60^{\circ}\text{C}$ . L'influence de celle-ci sur les caractéristiques du panneau sont données par la Figure IV.4, avec un éclairement de  $1000\text{W/m}^2$ . D'après la Figure IV.3, on observe que la tension du panneau photovoltaïque diminue avec l'augmentation de la température, par contre, le courant varie très peu avec la température. La puissance optimale diminue avec l'augmentation de la température et la tension du point de puissance optimale diminue également.



**Figure IV- 2** Influence de l'éclairement sur les caractéristiques du panneau photovoltaïque (a)Caractéristiques courant-tension (b) Caractéristiques puissance-tension.



**Figure IV- 3** Influence de la température sur les caractéristiques du panneau photovoltaïque, (a)Caractéristiques courant-tension (b)Caractéristiques puissance-tension.

D'autre part, les modèles des convertisseurs de puissance (Boost et onduleur PEC9) sont construits en utilisant Matlab/ Simulink notamment sa bibliothèque « SimPowerSystemes ». Les schémas des modèles sont montrés dans la Figure 4.1. Concernant le schéma de commande, il est simulé sous Matlab/Simulink où l'on distingue trois sous blocs :

- Le bloc de la commande MPPT P&O est développé sous Matlab/Simulink. Le programme de P&O est écrit sous forme d'une fonction intégrée respectant l'organigramme donné par la Figure III.3.
- Le contrôle de la tension du bus continu est assuré par l'utilisation du régulateur PI (proportionnel, intégral) de Matlab/Simulink.
- Le bloc de l'algorithme du contrôle prédictif est développé sous Matlab/Simulink. Le programme est écrit sous forme d'une fonction intégrée respectant l'algorithme donné par la Figure III.6.

### IV.3. Résultats de simulation

Pour tester le schéma de commande proposé, un profil de l'éclairement (Figure IV.4) est considéré et injecté dans le panneau photovoltaïque et la température est fixée à 25°C. Les principaux paramètres du panneau PV et de la simulation sont montrés dans les Tableaux IV.1 et IV.2.

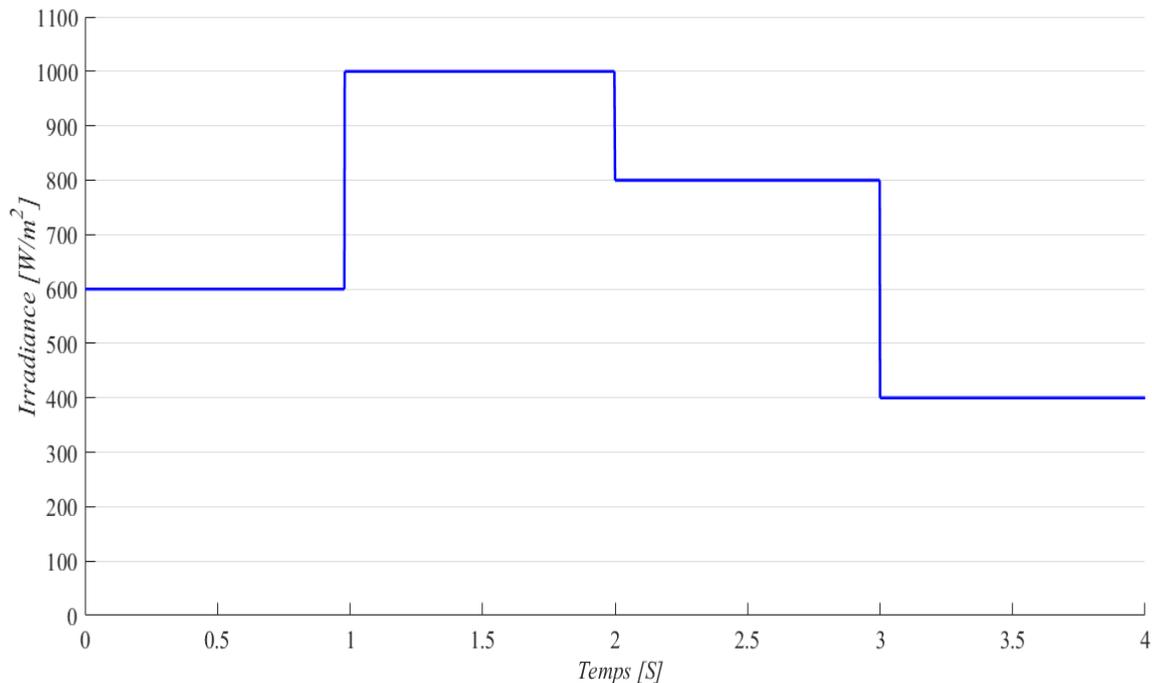


Figure IV- 4 Profil de l'éclairement injecté dans le panneau photovoltaïque.

Tableau IV. 1 Paramètres du module PV.

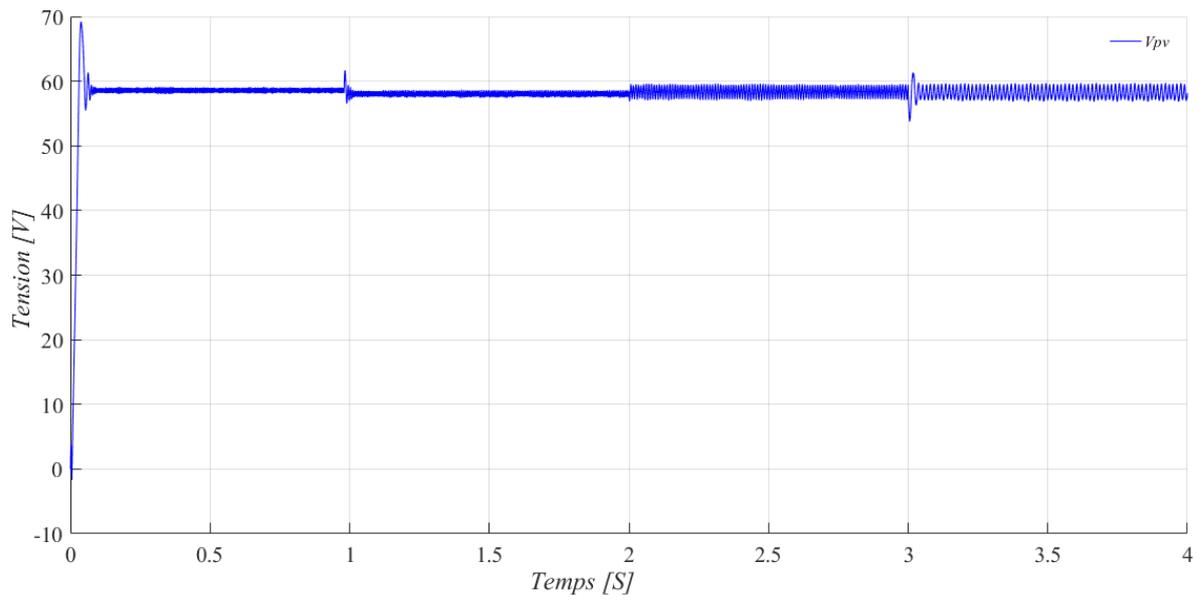
Paramètre	Valeur
Puissance maximale ( $P_{mmp}$ )	213.15W
Tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ )	36.3 V
Tension de fonctionnement optimale ( $V_{mmp}$ )	29 V
Courant de court-circuit ( $I_{sc}$ )	7.84 A
Courant de fonctionnement optimal ( $I_{mmp}$ )	7.35 A
Coefficient de température de $V_{oc}$	-0.36099 %/C°
Coefficient de température de $I_{sc}$	0.102 %/C°
Cellules par module	60

Tableau IV. 2 Paramètres du système PV monophasé connecté au réseau utilisant l'onduleur PEC9.

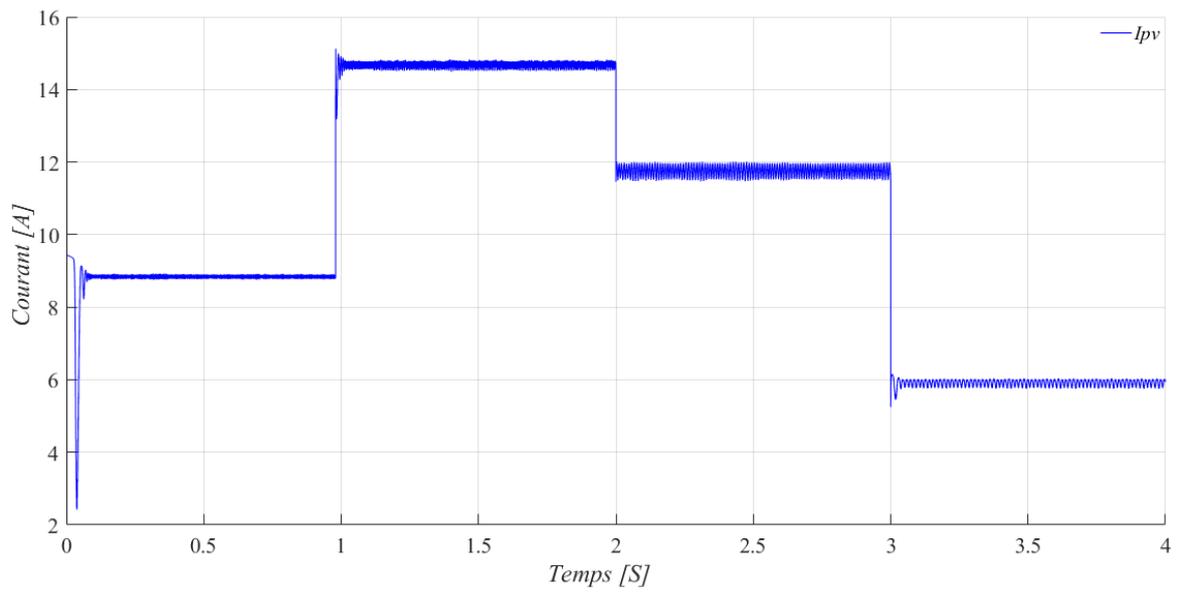
Composant	Valeur
Résistance du filtre de réseau ( $R_g$ )	0.1 $\Omega$
Inductance du filtre de réseau ( $L_g$ )	0.5 mH
Tension maximale du réseau ( $V_{g\_max}$ )	120 V
Fréquence du réseau ( $f$ )	50 Hz
Condensateur 1 du convertisseur PEC9 ( $C_1$ )	2500 $\mu$ F
Condensateur 2 du convertisseur PEC9 ( $C_2$ )	2500 $\mu$ F
Condensateur d'entrée PV ( $C_{PV}$ )	1100 $\mu$ F
Inductance Boost (L)	0.5 mH
Fréquence de commutation du Boost	2 KHz
Fréquence de commutation du PEC9	20 KHz

La Figure IV.5 montre les résultats de simulation de l'évolution de la tension, du courant, et de la puissance de sortie du panneau photovoltaïque obtenus avec l'algorithme de la méthode P&O. On peut remarquer que la puissance du panneau photovoltaïque suit fidèlement le changement de l'éclairement et d'une manière rapide et stable avec des faibles oscillations autour des points de puissance optimales. Ces résultats montrent l'efficacité de la commande MPPT P&O et la relation entre l'éclairement et la puissance de sortie du panneau photovoltaïque.

(a) Tension photovoltaïque du panneau



(b) Courant photovoltaïque du panneau



(c) Puissance photovoltaïque du panneau

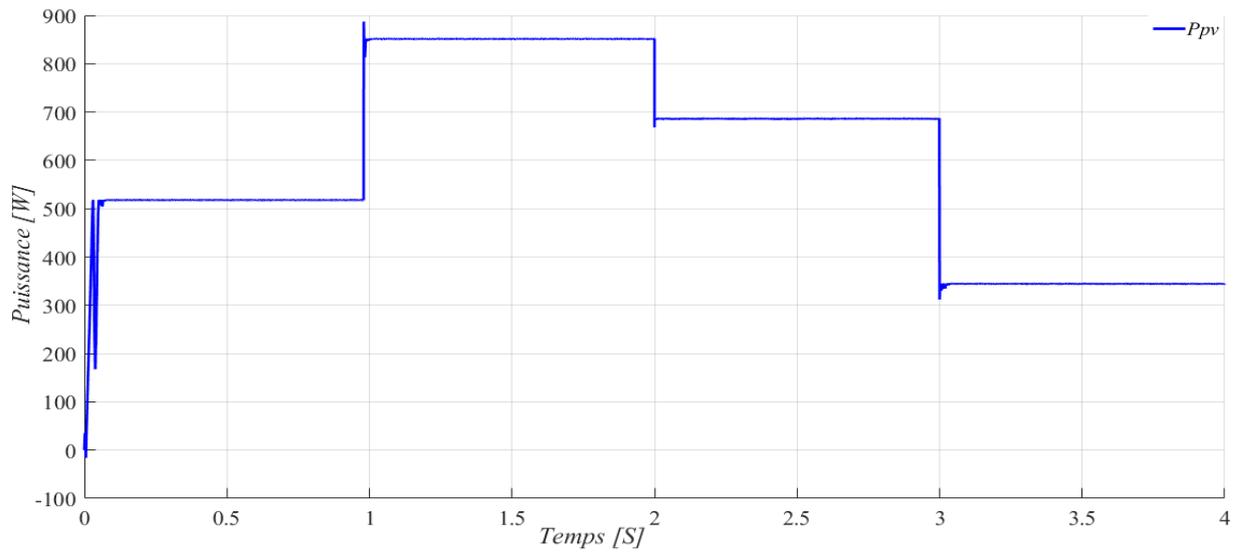


Figure IV- 5 Evolution de la tension, du courant et de la puissance du panneau photovoltaïque commandé par l’algorithme P&O.

La Figure IV.6 représente le résultat de simulation de l’évolution de la tension du bus continu obtenu pour une tension de référence de 220V. Il est noté que la tension du bus continu suit sa référence malgré le changement de l’éclairement avec une bonne précision et stabilité.

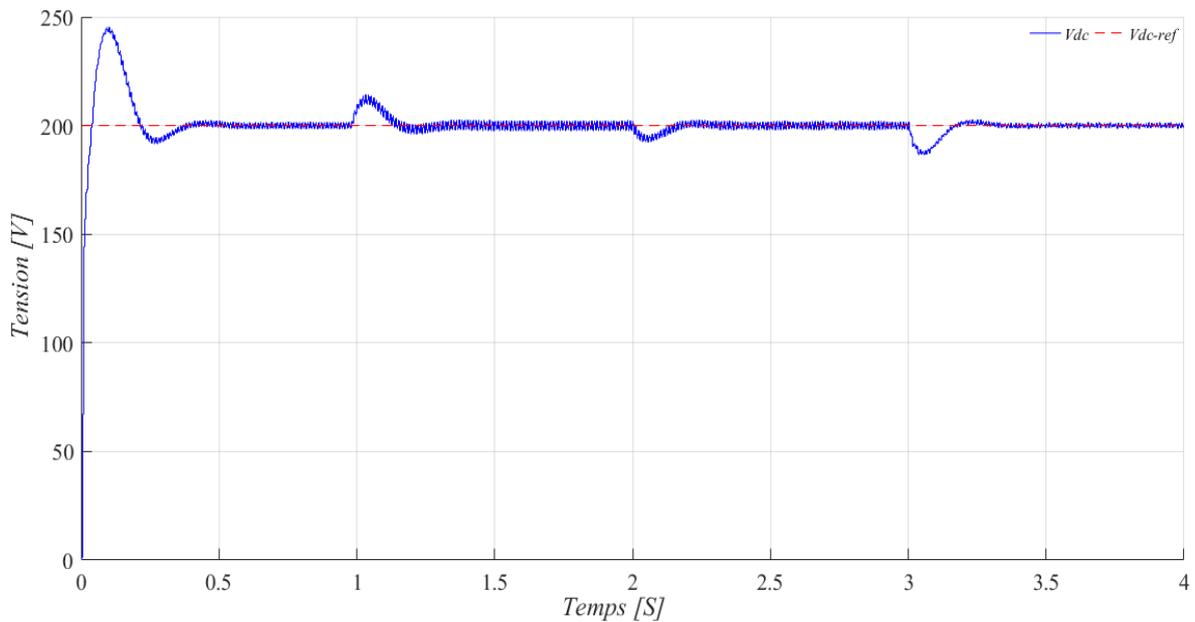
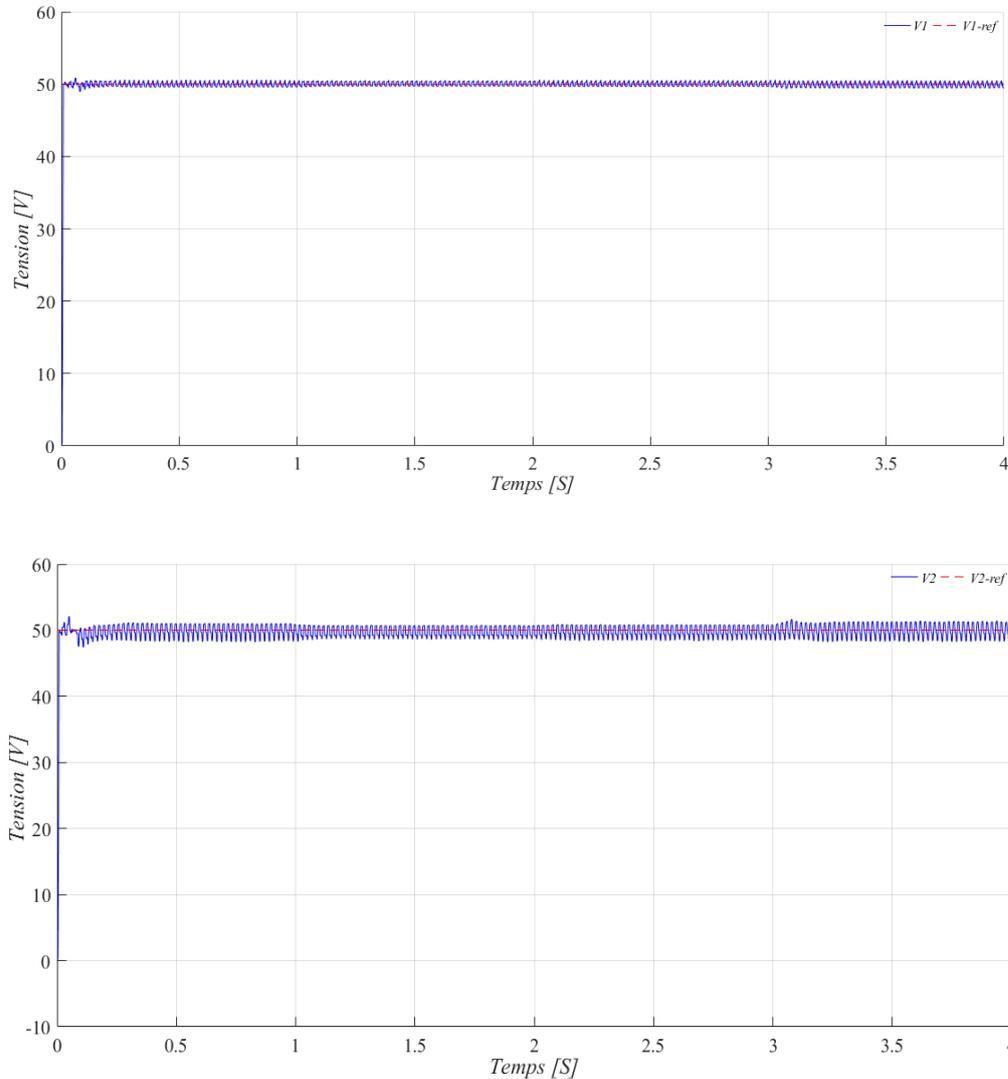


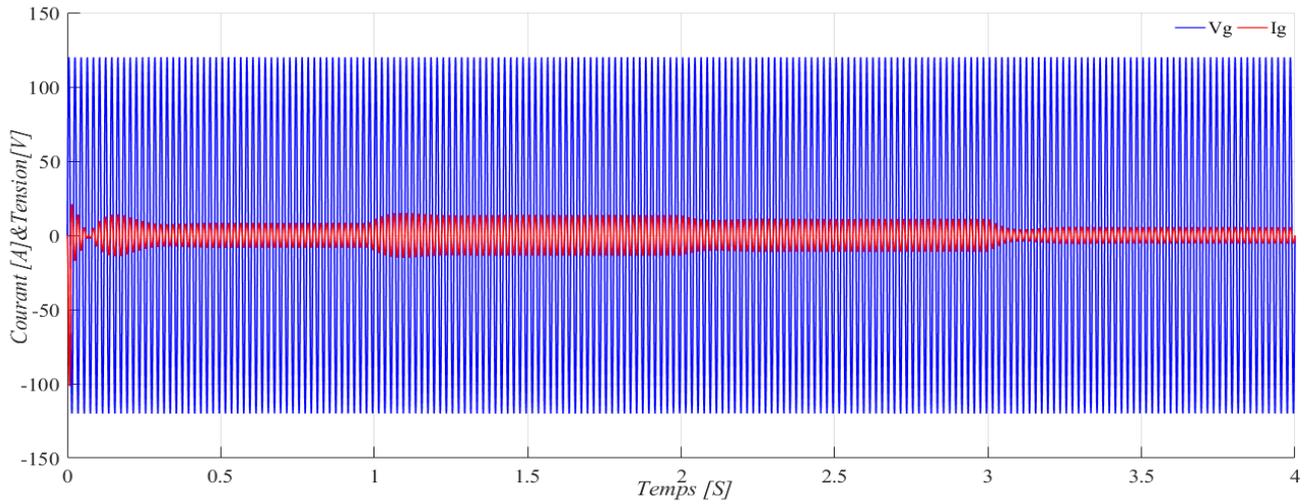
Figure IV- 6 Evolution de la tension du bus continu commandé par un régulateur PI.

Les réponses simulées des tensions des condensateurs sont montrées dans la Figure IV.7. On peut observer que les tensions des condensateurs suivent leurs références avec une précision et une stabilité satisfaisantes, indépendamment des variations de l'irradiance.

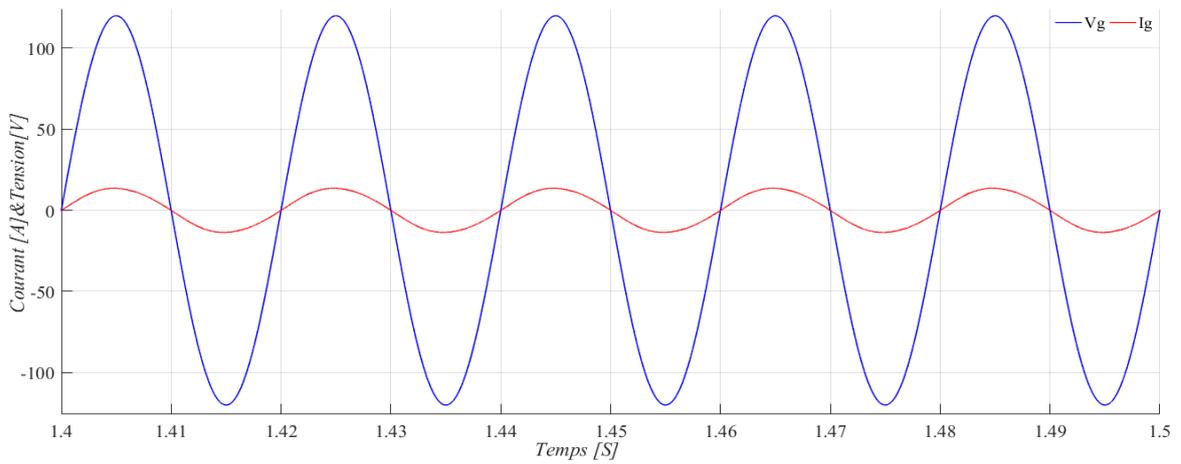


**Figure IV- 7** Evolution de la tension du deux condensateurs.

La Figure IV.8 montre les résultats de simulations de l'évolution de la tension et du courant du réseau, obtenus avec l'algorithme prédictif. On peut noter que l'amplitude de courant injecté est proportionnelle à l'éclairement, quasi sinusoïdal et en phase avec la tension de ligne ce qui signifie que le facteur de puissance est très proche de l'unité.



(a) Zoom sur la tension et le courant entre 1.4 et 1.5 s



(b) Zoom sur la tension et le courant entre 2.7 et 2.75 s

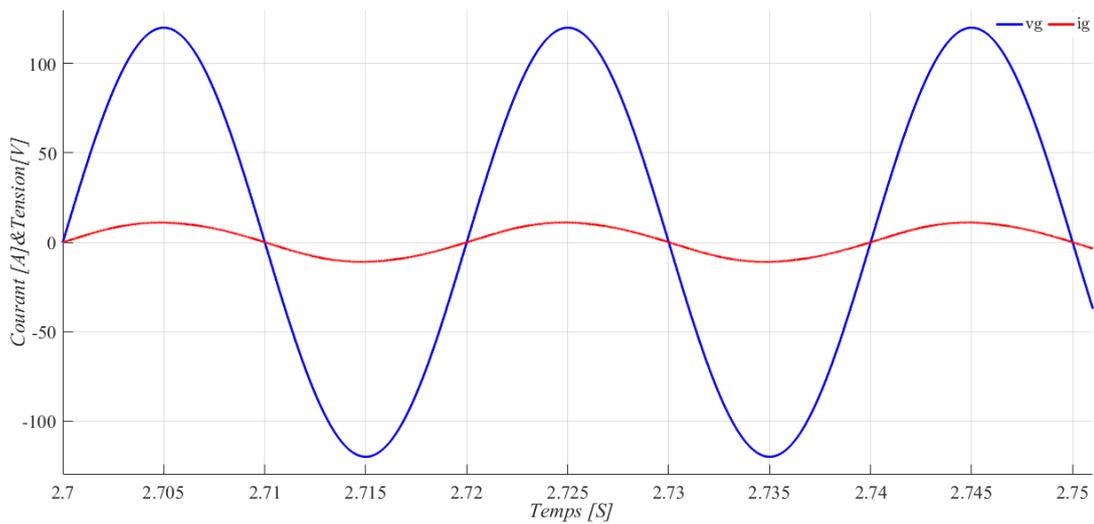
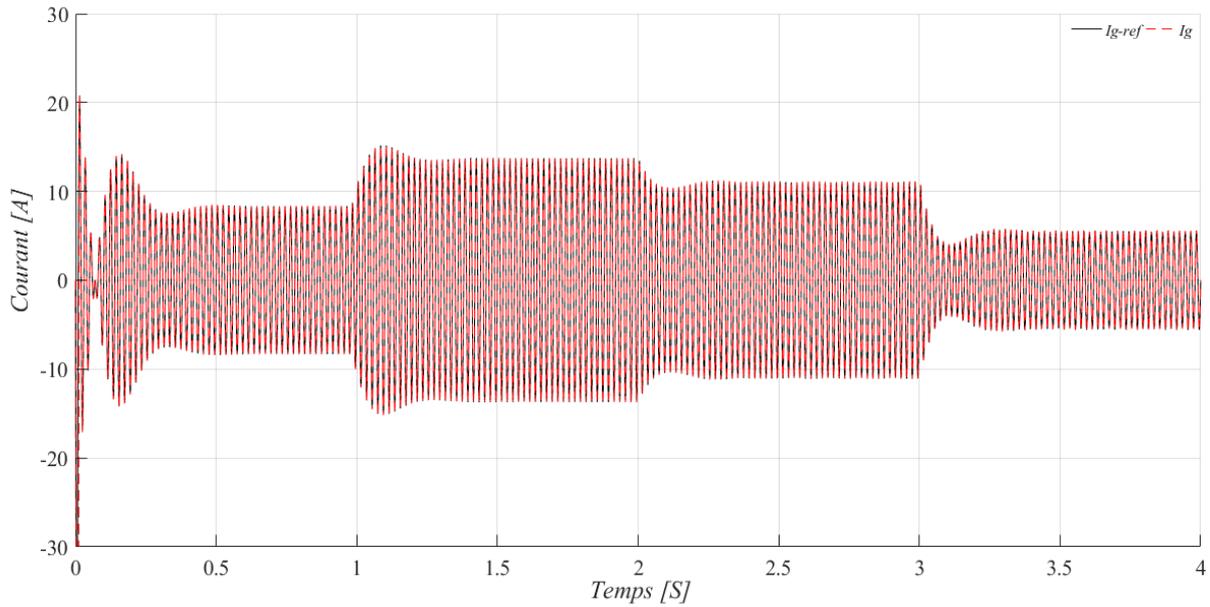
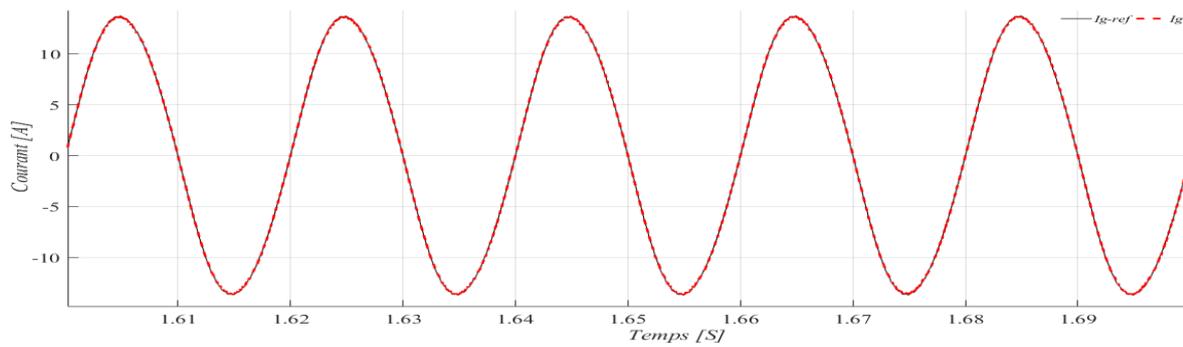


Figure IV- 8 Evolution de la tension et du courant du réseau avec l'onduleur PEC9.

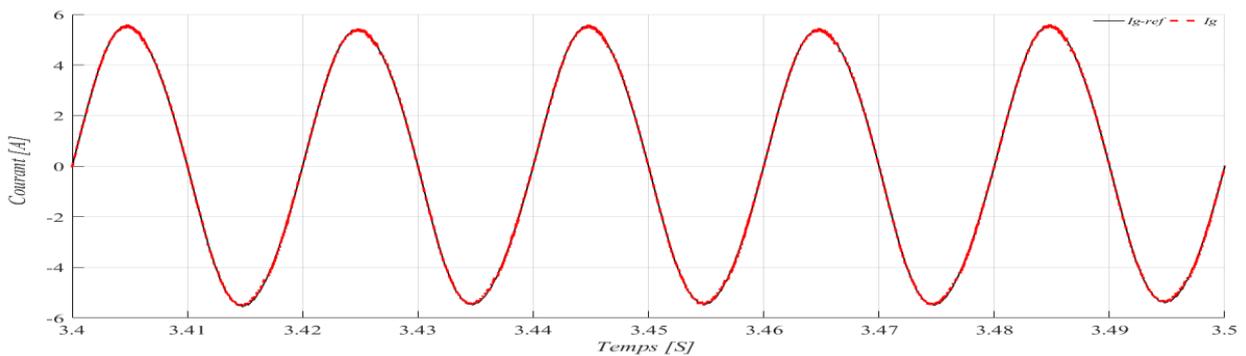
La Figure IV.9 montre la réponse simulée des performances de suivi du courant du réseau pour l'algorithme MPC. On peut voir que l'algorithme MPC suit de manière excellente la référence du courant du réseau sous différents niveaux de l'éclairage.



(a) Zoom sur le courant entre 1.6 et 1.7 s



(b) Zoom sur le courant entre 3.4 et 3.5 s



**Figure IV- 9** Evolution de courant injecté dans le réseau avec un onduleur multiniveaux PEC9, commandé par l'algorithme prédictif.

La réponse simulée de la tension de sortie de PEC9 est présentée dans la Figure IV.10. On peut noter que PEC9 génère une tension de sortie à 9 niveaux, ce qui prouve l'efficacité de l'algorithme MPC proposé.

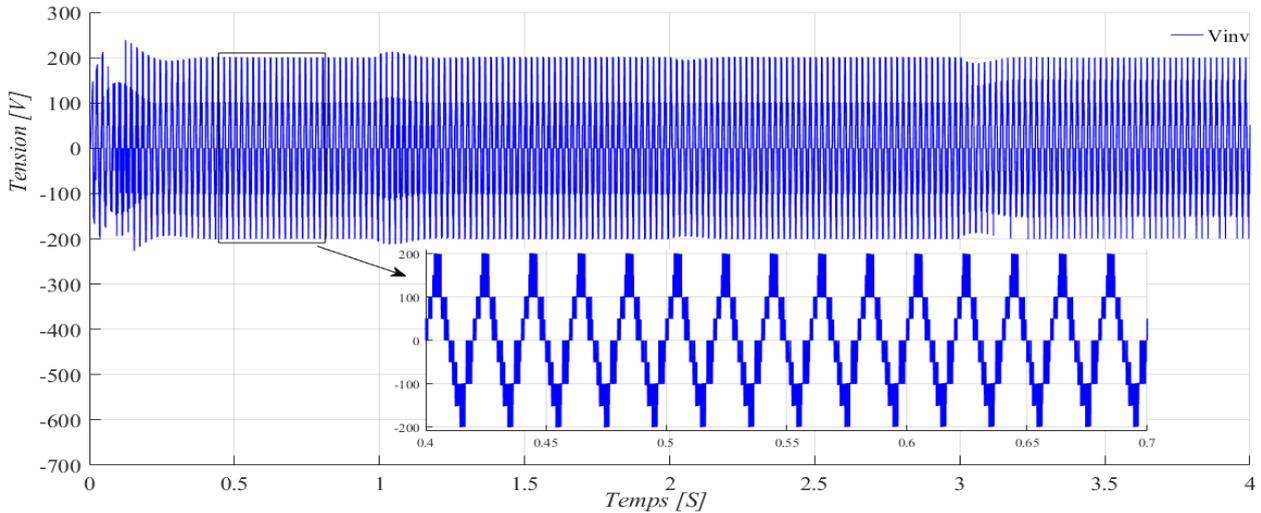


Figure IV- 10 Forme d'onde de la tension de sortie du convertisseur PEC9.

Afin de prouver les performances de la structure de puissance proposée avec un onduleur multiniveaux PEC9, une étude comparative avec un système PV connecté au réseau à l'aide d'un onduleur à deux niveaux en termes de qualité du courant injecté dans le réseau (THDi %) est présentée. La Figure IV.11 montre le système PV connecté au réseau avec son schéma de commande étudié pour la comparaison.

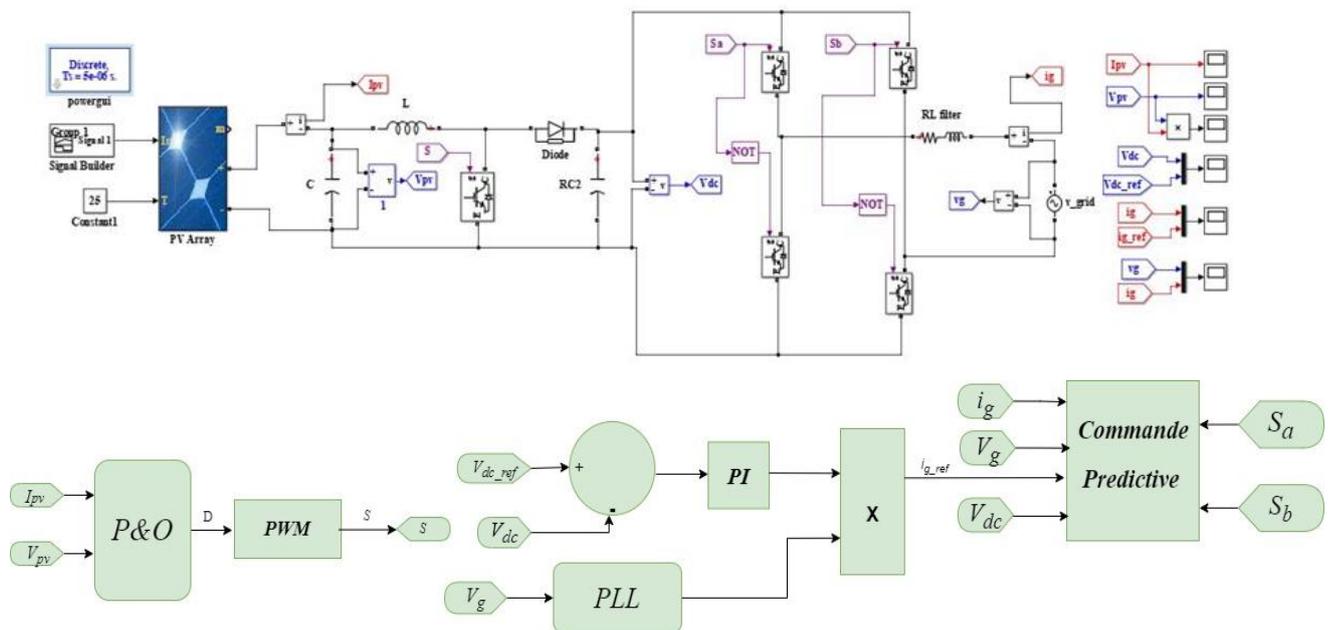


Figure IV- 11 Configuration du système photovoltaïque connecté au réseau avec un onduleur à deux niveaux.

Les Figures IV.12 et IV.13 comparent les performances du système lié à onduleur PEC9 avec un système lié à onduleur de deux niveaux pour différents niveaux d'éclairage. On peut observer que le système lié à onduleur PEC9 offre de bonnes performances en termes de qualité du courant injecté dans le réseau (THDi %). Le Tableau IV.3 résume l'étude comparative.

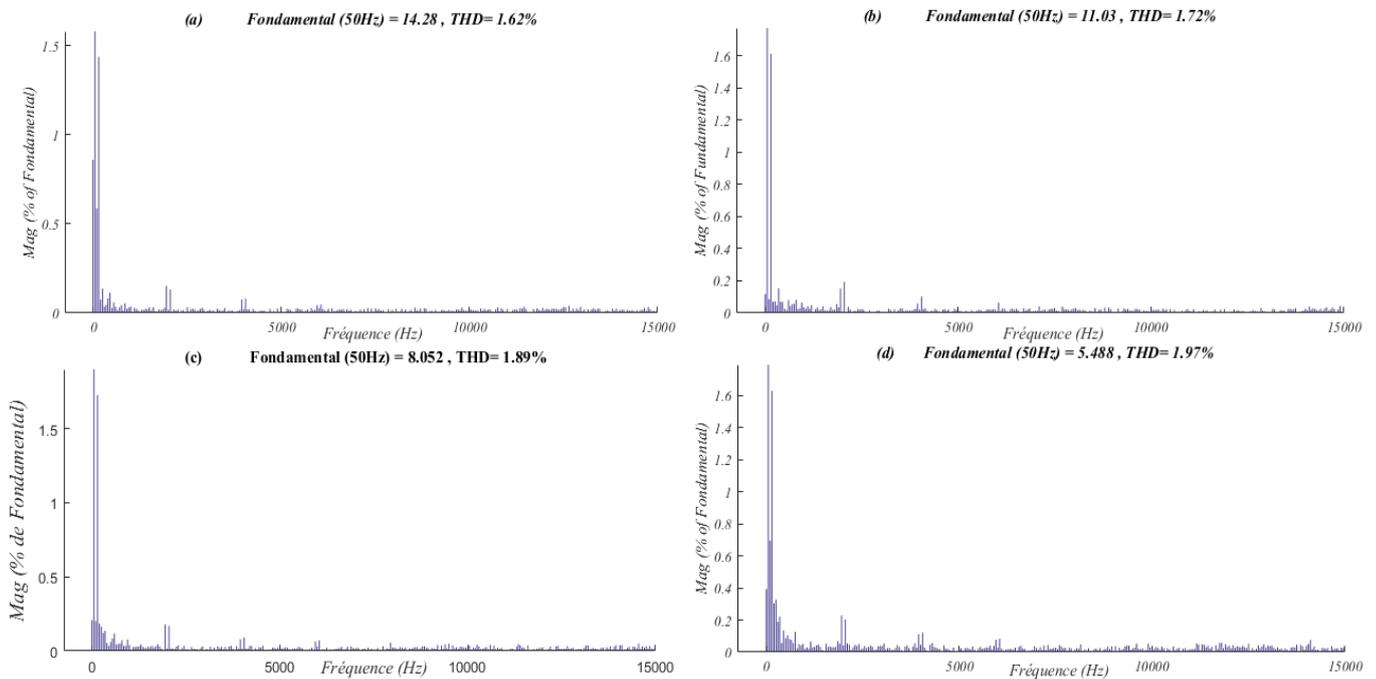


Figure IV- 12 Analyse spectrale du courant du réseau avec onduleur multiniveaux PEC9 pour différents niveaux de l'éclairage. (a)→1000 W/m<sup>2</sup>, (b) →800 W/m<sup>2</sup>, (c) →600 W/m<sup>2</sup>, (d) →400 W/m<sup>2</sup>

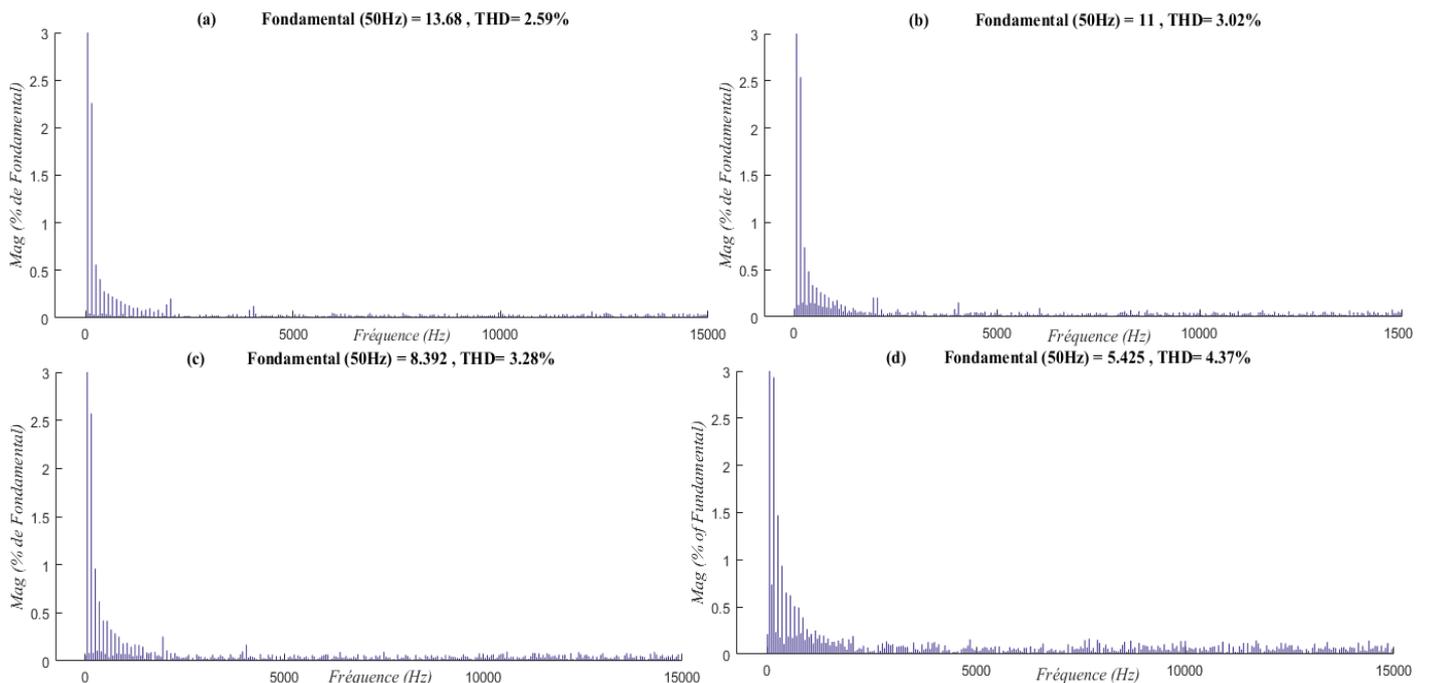


Figure IV- 13 Analyse spectrale du courant du réseau avec onduleur à deux niveaux pour différents niveaux de l'éclairage. (a)→1000 W/m<sup>2</sup>, (b) →800 W/m<sup>2</sup>, (c) →600 W/m<sup>2</sup>, (d) →400 W/m<sup>2</sup>

**Tableau IV. 3** Comparaison du THD % du courant du réseau en cas de variations soudaines d'irradiance.

<b>Eclairement (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>1000</b>	<b>800</b>	<b>600</b>	<b>400</b>
<b>Onduleur PEC9</b>	<b>1.62%</b>	<b>1.72%</b>	<b>1.89%</b>	<b>1.97%</b>
<b>Onduleur à 2 niveaux</b>	<b>2.59%</b>	<b>3.02%</b>	<b>3.28%</b>	<b>4.37%</b>

#### IV.4. CONCLUSION

Dans ce chapitre, un test de schéma de commande proposé pour un système photovoltaïque connecté au réseau avec un onduleur multiniveaux PEC9, a été conduit sur un profil d'éclairement choisi.

Au niveau du panneau photovoltaïque, les résultats de simulation ont montré l'efficacité de la poursuite du point de puissance maximal de la commande MPPT P&O pour différents niveaux d'éclairement. Le régulateur PI du bus continu à prouver sons efficacité quelles que soient les conditions de fonctionnement.

Au niveau du réseau, la commande prédictive est utilisée pour la régulation des courants de référence afin d'injecter le maximum de la puissance active au réseau avec un onduleur multiniveaux PEC9. Pour prouver les performances de la méthode prédictive, une étude comparative avec un onduleur à deux niveaux est effectuée. Les résultats de simulation ont que l'onduleur multiniveaux PEC9 assure une poursuite satisfaisante du courant injecté en comparaison avec l'onduleur à deux niveaux.

# Conclusion générale

---

Ce travail est un mémoire de master en industries électroniques réalisé à l'Université Mohamed El-Bachir El Ibrahimy sur l'optimisation de l'intégration de l'énergie photovoltaïque dans le réseau électrique. L'objectif de ce travail est de concevoir un schéma de contrôle efficace pour un système photovoltaïque monophasé connecté au réseau électrique.

Dans ce contexte, nous avons présenté et modélisé un système photovoltaïque monophasé connecté au réseau, composé principalement d'un ensemble de panneaux photovoltaïques, d'un convertisseur élévateur DC-DC et d'un onduleur multiniveaux PEC9. Le convertisseur PEC9 est une topologie prometteuse pour interfacier le système photovoltaïque au réseau avec un volume et un poids réduits du filtre et une grande efficacité. Il peut fournir une tension de sortie à 9 niveaux avec une seule source DC et sept interrupteurs de puissance. Un schéma de contrôle basé sur l'algorithme P&O de suivi du point de puissance maximale (MPPT) et la commande prédictive est suggéré. Les objectifs du schéma de contrôle proposé sont les suivants :

- Suivre rapidement et avec précision le point de puissance maximale en cas de variations soudaines de l'éclairement en utilisant l'algorithme P&O.
- Générer une tension symétrique synchronisée de 9 niveaux en sortie du PEC9.
- Assurer une haute qualité avec une valeur raisonnable de THD% de courant injecté dans le réseau.

Pour démontrer l'amélioration des performances du système proposé, des modèles de simulation complets ont été développés à l'aide de MATLAB/Simulink. Les résultats obtenus mettent en évidence les avantages significatifs de la topologie PEC9 proposée par rapport à l'onduleur conventionnel à deux niveaux avec la commande prédictive.

Comme perspectives pour les futures promotions on peut citer :

- La réalisation pratique du travail réalisé en simulation.
- Possibilité de connecter cette topologie à différentes autres sources d'énergie renouvelable.

# Références Bibliographiques

---

- [1] Manisha Joshi. Prof.Dr. Mrs.G.A. Vaidya. Modeling and Simulation of Single-Phase Grid Connected Solar Photovoltaic System. Article. IEEE. INDICON. 2014.<https://ieeexplore.ieee.org/document/7030623>.
- [2] Bader Nasser Alajm. Design and Control of Photovoltaic Systems in Distributed Generation. Doctoral thesis. University of Strathclyde. 2013. <https://ethos.bl.uk/OrderDetails.do?uin=uk.bl.ethos.576436>.
- [3] By S. Ashok <https://www.britannica.com/science/solar-energy>
- [4] G. Boyle. Renewable Energy: Power for a Sustainable Future, 2nd ed. Oxford, UK: Oxford University Press, 2004.
- [5] Manisha Joshi. Prof.Dr. Mrs.G.A. Vaidya. Modeling and Simulation of Single-Phase Grid Connected Solar Photovoltaic System. Article. IEEE. INDICON. 2014.<https://ieeexplore.ieee.org/document/7030623>.
- [6] Bader Nasser Alajm. Design and Control of Photovoltaic Systems in Distributed Generation. Doctoral thesis. University of Strathclyde. 2013. <https://ethos.bl.uk/OrderDetails.do?uin=uk.bl.ethos.576436>
- [7] <https://hardwarebee.com/what-is-dc-dc-converters/>
- [8] Vahedi, H. (2016). Modeling, development and control of multilevel converters for power system application (Doctoral dissertation). École de technologie supérieure,Canada.
- [9] M. Sharifzadeh and K. Al-Haddad, "Packed E-Cell (PEC) converter topology operation and experimental validation," IEEE Access, vol. 7, pp. 93049-93061, 2019.
- [10] R. Kadri, Contribution à l'amélioration de la capture de l'énergie solaire photovoltaïque dans l'habitat résidentiel : nouvelles structures de puissance et de commande, Thèse de Doctorat de l'université de Poitiers (France), 2010.
- [11] Behir Boubaker, Khemida Fathi et Guetroune Kheir eddine. Optimisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT floue. 2019. Mémoire de master. Université Echahid Hamma Lakhdar El Oued, Algérie
- [12] Rekioua Djamila, Matagne Ernest. Optimization of photovoltaic power systems. 2012. Springer Verlag.
- [13] SOUISSI & MESSAGIER (2020), Etude comparative des commandes MPPT conventionnelles et avancées pour les applications photovoltaïques, (Master)

- [14] SEBAALY, Fadia, SHARIFZADEH, Mohammad, KANAAN, Hadi Y., *et al.* Multilevel switching-mode operation of finite-set model predictive control for grid-connected packed e-cell inverter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, vol. 68, no 8, p. 6992-7001.
- [15] B. Bendib, H. Belmili, and F. Krim, *A survey of the most used MPPT methods: Conventional and advanced algorithms applied for photovoltaic systems*, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 45, pp. 637–648, 2015.
- [16] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 20, no. 4, pp. 963–973, 2005
- [17] Sahli, A. (2021). Optimisation de la qualité d'énergie dans les Smart grids (Doctoral dissertation). University Ferhat Abbas – Sétif.
- [18] M. Makhoulf, Modélisation Et Optimisation de Systèmes de Production d'énergies renouvelables couples au Réseau, Thèse de doctorat de l'université de Constantine 1, 2012.
- [19] J. Rodriguez and P. Cortés, *Predictive Control of Power Converters and Electrical Drives*, John Wiley. 2012.
- [20] B. Boukezata, Etude et commande d'une chaîne de conversion d'énergie d'un système solaire photovoltaïque, Thèse de doctorat de l'université de Sétif 1, 2017.
- [21] LAIB, Abdelbaset, KRAMA, Abdelbasset, SAHLI, Abdeslem, *et al.* Reconfigurable Model Predictive Control for Grid Connected PV Systems Using Thirteen-Level Packed E-Cell Inverter. *IEEE Access*, 2022, vol. 10, p. 102210-102222.

---

## Abstract

This work describes a single-phase grid-connected photovoltaic (PV) system with nine level PEC topology using the perturb and observe (P&O) MPPT (maximum power point tracking) algorithm and model predictive control (MPC) technique. The studied system consists of two stages: a PV panel with a DC-DC boost converter and PEC9 multilevel inverter with seven pairs of switches. This topology has the ability to generate nine voltage levels with a smaller number of active and passive components comparing with conventional multilevel inverter topologies. The suggested control technique aims to tracking the maximum power from PV panel and to reducing the total harmonic distortion (THD) of the grid injected current. The simulation results show a good tracking performance for the maximum power points of the PV array under sudden irradiance changes. Moreover, the studied grid-connected PV system with the suggested MPC algorithm injects the PV power with high grid current quality compare to two-level inverter in different irradiance changes levels.

**Keywords:** *single-phase grid-connected photovoltaic system, model predictive control, perturb and observe MPPT algorithm.*

## Résumé

Ce travail décrit un système photovoltaïque (PV) monophasé connecté au réseau avec une topologie PEC à neuf niveaux utilisant l'algorithme de perturbation et observation (P&O) MPPT (maximum power point tracking) et la technique de contrôle prédictif (MPC). Le système étudié se compose de deux étages : un panneau PV avec un convertisseur boost DC-DC et un onduleur multiniveaux PEC9 avec sept paires de commutateurs. Cette topologie a la capacité de générer neuf niveaux de tension avec un plus petit nombre de composants actifs et passifs par rapport aux topologies conventionnelles d'onduleurs multi-niveaux. La technique de contrôle suggérée vise à suivre la puissance maximale du panneau PV et à réduire la distorsion harmonique totale (THD) du courant injecté dans le réseau. Les résultats de simulation montrent une bonne performance de suivi pour les points de puissance maximum du générateur photovoltaïque sous des changements soudains d'irradiance. De plus, le système PV connecté au réseau étudié avec l'algorithme MPC suggéré injecte la puissance PV avec une qualité de courant de réseau élevée par rapport au onduleur à deux niveaux dans différents niveaux de changements d'irradiance.

**Mots-clés :** système photovoltaïque monophasé connecté au réseau, contrôle prédictif, algorithme de perturbation et observation MPPT.

## ملخص

يصف هذا العمل نظاماً ما ضوئياً أحادي الطور متصل بالشبكة (PV) مع تسعة طوبولوجيا PEC باستخدام خوارزمية الإضطراب والمراقب MPPT (P & O) (تتبع نقطة الطاقة القصوى) وتقنية التحكم التنبئي النموذجي (MPC) يتكون النظام المدروس من مرحلتين: لوحة PV مع محول تعزيز DC-DC وعاكس متعدد المستويات 9 PEC مع سبعة أزواج من المفاتيح. تتمتع هذه الهياكل بالقدرة على توليد تسعة مستويات من الجهد مع عدد أقل من المكونات النشطة والسلبية مقارنة بطوبولوجيا العاكس التقليدية متعددة المستويات. تهدف تقنية التحكم المقترحة إلى تتبع الطاقة القصوى من اللوحة الكهروضوئية وتقليل التشوه التوافقي الكلي (THD) للتيار المحقون بالشبكة. تُظهر نتائج المحاكاة أداءً تتبّع جيداً لأقصى نقاط طاقة لمجموعة PV تحت تغييرات الإشعاع المفاجئة. عالية على ذلك، فإن النظام الكهروضوئي المتصل بالشبكة المدروس مع خوارزمية MPC المقترحة يضخ الطاقة الكهروضوئية بجودة تيار شبكي عالية مقارنة بعاكس متعدد المستويات 9 PEC في مستويات مختلفة من تغييرات الإشعاع.

الكلمات الرئيسية: النظام الكهروضوئي أحادي الطور المتصل بالشبكة، والتحكم التنبئي النموذجي، والاضطراب ومراقبة خوارزمية

. MPPT

---