

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA  
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : TECHNOLOGIE

Département : Electrotechnique

Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Commande Electrique

## Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

**Etude et simulation d'un onduleur multi-niveaux :  
Application système PV**

Présenté par :

- AYACHI ZAKARIA
- BOUNADEUR ABDELMOUDJIB

Encadrant : MOUHAMMEDI MOUFID

Grade :MCA

Université Badji Mokhtar- Annaba

### Jury de Soutenance :

BAHI TAHAR	PR	Badji Mokhtar-Annaba	Président
MOHAMMEDI MOUFID	MCA	Badji Mokhtar-Annaba	Encadrant
NORA ZERZOURI	MCB	Badji Mokhtar-Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2022/2023

## *REMERCIEMENTS*

*Avant tout, je remercie Allah de tout puissant qui nous donne la foi, du courage et de patience afin d'accomplir ce modeste travail.*

*Je tiens à remercier notre encadreur **Mr. Mohammedi Moufid** d'avoir accepté de moi encadrer et pour les efforts qu'ils ont déployés, pour nous aider, conseiller, encourager et corriger avec une grande gentillesse durant toute cette période.*

*Je remercie les membres du jury qui ont accepté de juger mon travail et pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce dernier.*

*Et enfin je remercie l'ensemble des collègues de ma promotion, et surtout mon binôme qui m'a aidé à réaliser ce travail.*



*Dédicace*

*Au nom de dieu le grand merci revient de me avoir aidés à établir ce mémoire de fin d'étude Mon remerciement à mes parents qui m'en aidé moralement, financièrement et qui étaient toujours patients et compréhensifs envers moi remerciement à mon encadreur Mr Mouhammedi Moufid qui a était toujours là pour moi avec ses conseils et son encouragement je remercie également le chef département et tous les enseignants Mon respect à mon examinateur et au membre de jury qui me fait l'honneur d'apprécier mon travail*

**B. ABDELMOUDJIB**

*Je dédie ce travail à mes très chers parents pour leurs*

*Soutiens inconditionnels.*

*Puisse Dieu, vous procure santé, bonheur et prospérité.*

*A ma sœur et mon frère Oussama qui ont su  
m'encourager*

*Tout au long de ma vie.*

*A tous les membres de la famille ainsi qu'à nos amis.*

*A. ZAKARIA*

# Sommaire

<b>Introduction générale</b> .....	
Chapitre 01.....	
<b>I - 1 Introduction:</b> .....	<b>1</b>
<b>I - 2 Générateur photovoltaïque</b> .....	<b>1</b>
<b>I -2-1 Définition:</b> .....	1
<b>I - 2-2 L'effet photovoltaïque:</b> .....	2
<b>I - 2-2-1 Définition:</b> .....	2
<b>I -2-3 Rayonnement solaire:</b> .....	2
<b>I - 2-4 La cellule photovoltaïque:</b> .....	3
<b>I - 2-4-1 Définition:</b> .....	3
<b>I - 2-4-2 Historique:</b> .....	3
<b>I - 2-4-3 Principe de fonctionnement:</b> .....	4
<b>I - 2-4-4 Technologies des cellules solaires en Silicium</b> .....	5
<b>I - 2-4-5 model équivalent de la cellule:</b> .....	6
<b>I - 2-5 Effet du changement climatique sur les grandeurs électriques des cellules:</b> .....	7
<b>I - 2-5-1 Effet irradiation:</b> .....	7
<b>I - 2-5-2 Effet température:</b> .....	7
<b>I - 2-6 Association des cellules:</b> .....	8
<b>I - 2-6-1 Association des Cellules Photovoltaïques en Série:</b> .....	8
<b>I - 2-6-2 Association des Cellules Photovoltaïques en parallèle:</b> .....	9
<b>I - 2-7 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque:</b> .....	9
<b>I - 2-7-1 Avantages:</b> .....	9
<b>I - 2-7-2 Inconvénients:</b> .....	9
<b>I - 3 ÉTAGE D'ADAPTATION:</b> .....	<b>10</b>
<b>I - 3-1 Convertisseurs DC-DC:</b> .....	10
<b>I - 3-1-1 Structure de base des convertisseurs DC-DC</b> .....	11
<b>I - 3-1-2 Type d'hachures:</b> .....	11
<b>I - 3-1-3 Gain en tension des convertisseurs</b> .....	14
<b>I - 3-1-4 Utilisation des hacheurs dans les systèmes PV</b> .....	14
<b>I - 3-2 Principe de la recherche du point de puissance maximale:</b> .....	14
<b>I - 3-2-1 Algorithme Perturber et observer 'P&amp;O':</b> .....	14

<i>I - 3-2-2 Algorithme Incrément de la conductance, 'INC'</i> .....	15
<i>I - 3-2-3 Algorithme à base de la logique floue</i> .....	16
<i>I - 3-2-4 Comparaison de trois algorithmes de commande MPPT:</i> .....	16
<i>I - 4 Simulation et interprétation des résultats:</i> .....	17
<i>I - 4-1 Résultat du simulation:</i> .....	17
<i>I - 5 Conclusion :</i> .....	19
<b>Chapitre 02</b> .....	
<b>II-1 Introduction:</b> .....	<b>21</b>
<b>II-2 Définition d'un onduleur:</b> .....	<b>21</b>
<i>II- 2 - 1 Types d'onduleurs:</i> .....	22
<i>II- 2 - 1 -1 Les onduleurs non autonomes:</i> .....	22
<i>II- 2 - 1 - 2 Les onduleurs autonomes:</i> .....	22
<i>II- 2 - 2 Critère de choix d'onduleur:</i> .....	22
<i>II- 2 - 2 -1 Premier critère de choix d'un onduleur : sa puissance</i> .....	22
<i>II- 2 - 2 -2 Second critère de choix : le type de défaillance électrique</i> .....	23
<i>II- 2 - 2 -3 Troisième critère de choix : le type d'utilisation</i> .....	23
<i>II- 2 - 3 Domaines d'applications des onduleurs :</i> .....	23
<i>II- 2 - 3 - 1 Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone :</i> .....	23
<i>II- 2 - 3 -2 Alimentation de secours:</i> .....	23
<i>II- 2 - 3 - 3 Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes :</i> .....	24
<i>II- 2 - 3 - 4 Le raccord des panneaux solaires au réseau électrique</i> .....	24
<i>II- 2 - 4 Les avantages d'onduleurs:</i> .....	25
<i>II- 2 - 5 Les inconvénients d'onduleurs:</i> .....	25
<b>II- 3 Définition de l'onduleur multi niveaux :</b> .....	<b>25</b>
<i>II- 3 - 1 Historique des onduleur Multiniveau:</i> .....	25
<i>II- 3 - 2 Avantage des onduleur Multiniveaux:</i> .....	26
<i>II- 3 - 3 Principe de fonctionnement l'onduleur multi-niveaux :</i> .....	26
<i>II- 3 - 4 - 1 Onduleurs multi-niveaux à structure NPC :</i> .....	27
<i>II- 3 - 4 - 2 Onduleurs multi-niveaux à condensateurs flottants :</i> .....	28
<b>II- 4 Fonctionnement des onduleurs deux niveaux et multi-niveaux :</b> .....	<b>30</b>
<i>II- 4 - 1 Onduleur monophasé deux niveaux en pont complet :</i> .....	30
<i>II- 4 - 1- 1 Principe de fonctionnement :</i> .....	30
<i>II- 4 -2 Onduleur monophasé en cascade H :</i> .....	32
<i>II- 4-2-2 Onduleur Monophasé 5 Niveaux En Cascade H:</i> .....	34
<i>II- 4-2-3 Onduleur Monophasé 7 Niveaux En Cascade H:</i> .....	36

<b>II- 4-3 Onduleur condensateur flottant (FC) :</b> .....	39
<b>II- 4-3-1 Onduleur condensateur flottant (FC) 5 Niveaux:</b> .....	39
<b>II- 4-3-2 Onduleur condensateur flottant (FC) 3 Niveaux:</b> .....	41
<b>II- 4-3-3 Onduleur condensateur flottant (FC) 7 Niveaux:</b> .....	43
<b>II- 4-4-1 Onduleur diode flottante 3 Niveaux:</b> .....	45
Chapitre 03.....	
<b>III-1 Introduction:</b> .....	51
<b>III-2 Simulation et résultats:</b> .....	51
<b>III-3 conclusion:</b> .....	59
<b>Conclusion générale:</b> .....	60

## Liste des figures

Figure ( I .1) : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.....	1
Figure ( I .2) : Principe de l'effet photovoltaïque.....	2
Figure ( I .3) : Spectre électromagnétique par et hors atmosphère [10]. ....	2
Figure ( I .4) : Chaîne de production de panneaux photovoltaïque (technologie cristalline) [21].....	3
Figure ( I .5) : Représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque [23]. ....	4
Figure ( I .6) : Principe de fonctionnement [24].....	5
Figure ( I .7) : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle. ....	6
Figure ( I .8) : block d'effet de changement climatique sur les grandeurs électriques d'une cellule .....	7
Figure ( I .9) : effet d'irradiation sur la caractéristique $I=f(V)$ .....	7
Figure ( I .10) : effet d'irradiation sur la caractéristique $P=f(V)$ .....	7
Figure ( I .11) : Effet de la température de la caractéristique $I=f(V)$ .....	8
Figure ( I .12) : Effet de la température de la caractéristique $P=f(V)$ .....	8
Figure ( I .13) : Caractéristique courant tension de $N_s$ cellule en série [14] .....	8
Figure ( I .14) : Caractéristique courant tension de ( $N_p$ ) cellule en parallèle [14] .....	9
Figure ( I .15) : Schéma synoptique du GPV avec étage d'adaptation .....	10
Figure ( I .16) : Schéma de principe d'un hacheur. [35] .....	11
Figure ( I .17) : Hacheur série (abaisseur). [35] .....	11
Figure ( I .18) : Hacheur abaisseur-élevateur. [35].....	12
Figure ( I .19) : Hacheur parallèle (élevateur). ....	12
Figure ( I .20) : Chronogrammes du courant et de la tension d'un hacheur BOOST .....	13
Figure ( I .21) : Schéma électrique d'un hacheur BOOST fermé. ....	13
Figure ( I .22) : Schéma électrique d'un hacheur BOOST ouvert .....	13
Figure ( I .23) : Organigramme de la méthode de perturbation et d'observation .....	15
Figure ( I .24) : Organigramme de la méthode de perturbation et d'observation .....	15
Figure ( I .25) : Organigramme de la méthode de perturbation et d'observation .....	16
Figure ( I .26) : Schéma bloc du système PV .....	17
Figure ( I .27) : Allure d'irradiation .....	17
Figure ( I .28) : Variation de la puissance.....	18
Figure ( I .29) : Variation de la tension .....	18
Figure ( I .30) : Variation de courant .....	18
Figure ( II . 1) : Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC – AC) .....	21
Figure ( II . 2) : Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone .....	23
Figure ( II . 3) : Alimentation de secours.....	24
Figure ( II .4) : Transfert de l'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes.....	24
Figure ( II . 5) : Onduleur à deux niveaux (a), à trois niveaux (b) et à m-niveaux (c). ....	27

Figure ( II . 6): Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux.....	27
Figure ( II . 7): Structure d'un onduleur monophasé à deux niveaux en pont complet.....	30
Figure ( II . 8): La Formes d'ondes de voltage pour un onduleur monophasé a deux niveaux .....	31
Figure ( II . 9): La Formes d'ondes de Courant pour un onduleur a deux niveaux avec $R = 2$ .....	31
Figure ( II . 10): Structure d'un onduleur monophasé à Trois niveaux en cascadié H .....	32
Figure ( II . 11): La Formes d'ondes de voltage pour un onduleur monophasé a Trois niveaux en cascade H ..	33
Figure ( II . 12): La Formes d'ondes de courant pour un onduleur monophasé a Trois niveaux en cascade H ..	33
Figure ( II . 13): Structure d'un onduleur monophasé à Cinq niveaux en cascade H.....	34
Figure ( II . 14): La Formes d'ondes de voltage pour un onduleur monophasé a Cinq niveaux en cascade H..	35
Figure ( II . 15): La Formes d'ondes de courant pour un onduleur monophasé a Cinq niveaux en cascade H ..	36
Figure ( II .16): Structure d'un onduleur monophasé à Sept niveaux en cascade H.....	36
Figure ( II .17): La Formes d'ondes de voltage pour un onduleur monophasé a Sept niveaux en cascade H ..	38
Figure ( II .18): La Formes d'ondes de courant pour un onduleur monophasé a sept niveaux en cascadié H ..	38
Figure ( II .19): Structure d'un onduleur monophasé à Cinq niveaux en condensateur flottants .....	39
Figure ( II . 20): La Formes d'ondes de tension pour un onduleur monophasé a cinq niveaux en condensateur flottant (FC).....	40
Figure ( II . 21): La Formes d'ondes de courant pour un onduleur monophasé a cinq niveaux en condensateur flottant (FC) .....	40
Figure ( II . 22): Structure d'un onduleur monophasé trois niveaux en condensateur flottant.....	41
Figure ( II . 23): La Formes d'ondes de tension pour un onduleur monophasé a trois niveaux en condensateur flottant (FC) .....	42
Figure ( II . 24): La Formes d'ondes de courant pour un onduleur monophasé a trois niveaux en condensateur flottant (FC).....	42
Figure ( II . 25): Structure d'un onduleur monophasé à sept niveaux en condensateur flottant .....	43
Figure ( II . 26): La Formes d'ondes de courant pour un onduleur monophasé a Sept niveaux en condensateur flottant (FC).....	44
Figure ( II . 27): La Formes d'ondes de Tension pour un onduleur monophasé a Sept niveaux en condensateur flottant (FC).....	45
Figure ( II . 28): Structure d'un onduleur monophasé à trois niveaux en diode flottant .....	45
Figure ( II . 29): La Formes d'ondes de tension pour un onduleur monophasé a trois niveaux en diode flottant .....	46
Figure ( II . 30): La Formes d'ondes de courant pour un onduleur monophasé a trois niveaux en diode flottant .....	47
Figure ( II . 31): Structure d'un onduleur monophasé à Cinq niveaux en diode flottant.....	47
Figure ( II . 32): La Formes d'ondes de tension pour un onduleur monophasé a cinq niveaux en diode flottant .....	49
Figure ( II . 33): La Formes d'ondes de courant pour un onduleur monophasé a cinq niveaux en diode flottant .....	49
Figure ( III . 1): onduleur à trois niveaux de type cascade alimenté par un générateur PV .....	51

Figure (III. 2): (a) Forme d'onde de la tension de l'onduleur cascade à trois niveaux avant le filtrage et spectre harmonique .....	51
(b) Forme d'onde de la tension de l'onduleur cascade à trois niveaux après le filtrage et spectre harmonique .....	51
Figure (III. 3): (a) Forme d'onde du courant de l'onduleur cascade à trois niveaux avant le filtrage et spectre harmonique .....	52
(b) Forme d'onde du courant de l'onduleur cascade à trois niveaux après le filtrage et spectre harmonique .....	52
Figure (III. 4): onduleur à cinq niveaux de type cascade alimenté par un générateur PV .....	52
Figure (III. 5): (a) Forme d'onde de la tension de l'onduleur cascade à cinq niveaux avant le filtrage et spectre harmonique .....	53
(b) Forme d'onde de la tension de l'onduleur cascade à cinq niveaux après le filtrage et spectre harmonique .....	53
Figure (III.6): (a) Forme d'onde du courant de l'onduleur cascade à cinq niveaux avant le filtrage et spectre harmonique .....	53
(b) Forme d'onde du courant de l'onduleur cascade à cinq niveaux après le filtrage et spectre harmonique .....	53
Figure (III.7): onduleur à trois niveaux de type condensateurs flottants alimenté par un générateur PV .....	54
Figure (III.8): (a) Forme d'onde de la tension de l'onduleur condensateurs flottants à trois niveaux avant le filtrage et spectre harmonique .....	54
(b) Forme d'onde de la tension de l'onduleur condensateurs flottants à trois niveaux après le filtrage et spectre harmonique .....	54
Figure (III.9): (a) Forme d'onde du courant de l'onduleur condensateurs flottants à trois niveaux avant le filtrage et spectre harmonique .....	55
(b) Forme d'onde du courant de l'onduleur condensateurs flottants à trois niveaux après le filtrage et spectre harmonique .....	55
Figure (III.10): onduleur à cinq niveaux de type condensateurs flottants alimenté par un générateur PV .....	55
Figure (III.11): (a) Forme d'onde de la tension de l'onduleur condensateurs flottants à cinq niveaux avant le filtrage et spectre harmonique .....	56
(b) Forme d'onde de la tension de l'onduleur condensateurs flottants à cinq niveaux après le filtrage et spectre harmonique .....	56
Figure (III.12): (a) Forme d'onde du courant de l'onduleur condensateurs flottants à trois niveaux avant le filtrage et spectre harmonique.....	56
(b) Forme d'onde du courant de l'onduleur condensateurs flottants à trois niveaux après le filtrage et spectre harmonique .....	56
Figure (III.13): onduleur à trois niveaux de type diode flottants alimenté par un générateur PV .....	57
Figure (III.14): (a) Forme d'onde de la tension de l'onduleur diode flottants à trois niveaux avant le filtrage et spectre harmonique .....	57
(b) Forme d'onde de la tension de l'onduleur diode flottants à trois niveaux après le filtrage et spectre harmonique .....	57
Figure (III.14): (a) Forme d'onde du courant de l'onduleur diode flottants à trois niveaux avant le filtrage et spectre harmonique .....	58
(b) Forme d'onde du courant de l'onduleur diode flottants à trois niveaux après le filtrage et spectre harmonique .....	58

## Liste des tableaux

### Chapitre 01

[Tableau \( I .1\) : Comparatif des différentes technologies.](#) ..... Error! Bookmark not defined.

[Tableau \( I .2\) : Gain en tension des convertisseurs.](#)..... Error! Bookmark not defined.

[Tableau \( I .3\) : Rapports de transformation des principaux convertisseurs DC-DC. \[41\]](#) ..... Error! Bookmark not defined.

[Tableau \( I .4\) : Comparaison des techniques MPPT.](#)..... Error! Bookmark not defined.

### Chapitre 02

[Tableau \( II .1\) : les états d'interrupteurs d'onduleur a 2 niveaux.](#)..... Error! Bookmark not defined.

[Tableau \( II .2\) : les états d'interrupteurs d'onduleur a 3 niveaux de type cascade.](#)... Error! Bookmark not defined.

[Tableau \( II .3\) : les états d'interrupteurs d'onduleur a 5 niveaux de type cascade.](#)... Error! Bookmark not defined.

[Tableau \( II .4\) : les états d'interrupteurs d'onduleur a 7 niveaux de type cascade.](#)... Error! Bookmark not defined.

[Tableau \( II .5\) : les états d'interrupteurs d'onduleur a 5 niveaux de type condensateur flottant.](#)  
..... Error! Bookmark not defined.

[Tableau \( II .6\) : les états d'interrupteurs d'onduleur a 3 niveaux de type condensateur flottant.](#)  
..... Error! Bookmark not defined.

[Tableau \( II .7\) : les états d'interrupteurs d'onduleur a 7 niveaux de type condensateur flottant.](#)  
..... Error! Bookmark not defined.

[Tableau \( II .8\) : les états d'interrupteurs d'onduleur a 3 niveaux de type NPC.](#) . Error! Bookmark not defined.

[Tableau \( II .9\) : les états d'interrupteurs d'onduleur a 5 niveaux de type NPC.](#) . Error! Bookmark not defined.

### Chapitre 03

[Tableau \( III .1\) : comparaison le THD des onduleurs a 3 niveaux.](#) ..... Error! Bookmark not defined.

[Tableau \( II .1\) : comparaison le THD des onduleurs a 5 niveaux.](#) ..... Error! Bookmark not defined.

## ملخص :

تم تخصيص هذا العمل لدراسة محاكاة الموجات متعددة المستويات المدمجة في النظام الكهروضوئي فيما يتعلق بشكل أساسي بنوعين من الموجات (NPC,condonsateur flottante,cascade)

تم إجراء دراسة المحاكاة في برنامج ماطالب. يتم عرض نتائج المحاكاة بالإضافة إلى التحليل الطيفي لأنواع الموجات المستخدمة الهدف هو إظهار كيف يمكن أن تؤدي الموجات متعددة المستويات إلى انخفاض في توافقيات الجهد المتبقي

## **Abstract:**

This work is devoted to the simulation study of multilevel inverters integrated in a photovoltaic system mainly concerning the two types of inverters (NPC and flying capacitor and Cascaded).

The simulation study is carried out under the Matlab/Simulink environment. The simulation results are presented as well as the spectral analysis for the different topologies used. The aim is to show how multilevel inverters can lead to a reduction in residual voltage harmonics.

**Keywords:** PV Array, NPC, flying capacitor, Cascaded H Bridge and THD

## **Résumé:**

Le travail de cette mémoire consacrée à l'étude par simulation des onduleurs multiniveaux niveau intégré dans un système photovoltaïque concernant essentiellement les deux types d'onduleurs (NPC et condensateur flottante et Cascade).

L'étude par simulation est effectuée sous l'environnement Matlab/Simulink. Les résultats de simulation sont présentés ainsi que l'analyse spectrale pour les différentes topologies utilisées.

L'objectif visé est de montrer comment les onduleurs multiniveaux peuvent conduire à une réduction des harmoniques résiduels de la tension.

**Mots clé :** Système PV, NPC, condensateur flottante, Cascade H Bridge et THD.

## ***Introduction générale***

La production d'énergie est un défi majeur pour les années futures étant donné que les besoins énergétiques mondiaux ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour soutenir leur économie. De nos jours, une grande partie de la production et de la consommation mondiale d'énergie engendre des effets polluants ou des dérèglements climatiques. La consommation des ressources naturelles (fossile ou fissile) réduit inéluctablement les réserves et compromet leur disponibilité pour les générations futures. Aujourd'hui, le défi mondial est tourné vers les énergies renouvelables, notamment le solaire, l'éolien, l'hydraulique, la géothermie, la biomasse, les énergies renouvelables sont des énergies liées aux cycles du soleil et de la terre [10].

L'énergie solaire est la source la plus importante par ce que les convertisseurs photovoltaïques convertissent directement l'énergie des rayonnements solaires en énergie électrique.

L'utilisation des convertisseurs statiques dans l'industrie est devenue un champ extrêmement vaste, car les équipements industriels utilisent de plus en plus d'entraînement à vitesse variable. Les onduleurs de tension sont largement utilisés pour la commande des machines alternatives.

Un onduleur de tension est un convertisseur statique alimenté soit par une source continue soit par un Système PV soit par une batterie d'accumulateur pour fournir une tension ou courant alternatifs. Ces tensions de sortie sont très riches en harmoniques, d'où la nécessité de les réduire. Outre cela les onduleurs conventionnels (à deux niveaux) sont limités aux applications de faibles et de moyennes puissances seulement [11].

Dans le cadre de la recherche des méthodes de réduction des harmoniques, plusieurs travaux ont été réalisés sur deux axes. Le premier est l'utilisation des topologies multiniveaux de l'onduleur, alors que le second porte sur la commande de l'ouverture et la fermeture des semi-conducteurs formant l'onduleur. Dans les applications de fortes puissances, la structure à multiniveaux est plus adaptée, par rapport à la structure à deux niveaux, du fait que les tensions et les courants de sortie présentent un taux de distorsion harmoniques nettement inférieur.

L'objectif principal de mon projet vise à étudier et comparer les différentes structures des onduleurs multiniveaux (NPC et condensateur flottant et Cascade) utilisées dans les systèmes photovoltaïques.

Pour ce faire, le mémoire est organisé en trois chapitres et une conclusion générale.

Le premier chapitre décrit le généralité sur les systèmes photovoltaïques se compose de générateur PV et Etage d'adaptation qui contient une partie puissance (hacheur boost) et une partie de commande (MPPT, Nous terminons ce chapitre par une simulation d'un système PV.

Le deuxième chapitre est consacré de l'étude et la simulation des différentes topologies des onduleurs multiniveaux (3, 5 et 7 niveaux). Pour cela, on présente les différentes séquences de commutation.

Le troisième chapitre est consacré à la simulation des topologies des onduleurs multiniveaux intégré dans un système photovoltaïque. Les résultats de simulation sont présentés ainsi que l'analyse spectrale pour la topologie utilisée. L'étude par simulation est effectuée sous l'environnement Matlab/Simulink.

Finalement, nous terminons notre travail par une conclusion générale qui résume notre étude dans sa partie théorique et de simulation.

## *Chapitre 01:*

### *Généralité sur les système PV*

## I - 1 Introduction:

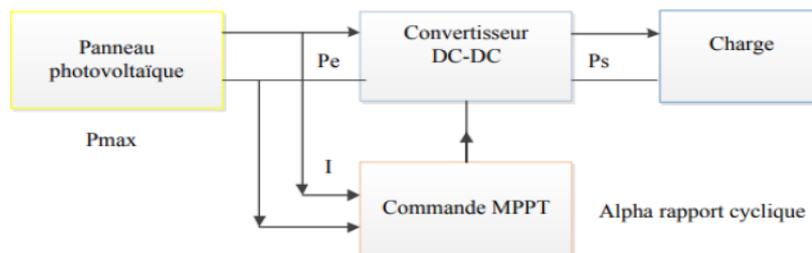
Le mot « Photovoltaïque » est la combinaison de deux mots : « photo », mot d'origine grecque qui signifie lumière ; et « voltaïque », qui vient de « volt » et représente l'unité utilisée pour mesurer le potentiel électrique [1].

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie provenant des photons, comprise dans le rayonnement solaire, en énergie électrique, par le biais de capteurs fabriqués avec des matériaux sensibles aux longueurs d'ondes du visible (nommés cellules PV) [2].

Les cellules solaires sont généralement associées en série et en parallèle, puis encapsulées sous verre pour obtenir un module photovoltaïque. Un générateur PV est constitué de modules interconnectés pour former une unité produisant une puissance continue élevée compatible avec le matériel électrique usuel.

Les modules PV sont habituellement branchés en série-parallèle pour augmenter la tension et l'intensité à la sortie du générateur [4].

Les modules interconnectés sont montés sur des supports métalliques et inclinés suivant l'angle désiré en fonction du lieu, cet ensemble est souvent désigné par champ de modules



**Figure ( I .1) :** Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.

D'après le schéma de principe, un système photovoltaïque, de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique représenté par la figure ( I .1), ce chapitre peut être décomposé en deux grandes parties :

- Générateur PV
- Etage d'adaptation qui contient une partie puissance (hacheur boost) et une partie de commande (MPPT).

## I - 2 Générateur photovoltaïque

### I-2-1 Définition:

Un générateur photovoltaïque est un système complet assurant la production et la gestion de l'électricité fournie par les capteurs photovoltaïques. L'énergie est stockée dans des accumulateurs et/ou transformée en courant alternatif suivant le type d'application.

**I - 2-2 L'effet photovoltaïque:**

**I - 2-2-1 Définition:**

L'effet photovoltaïque est un phénomène physique propre à certains matériaux appelés "semi-conducteurs", dont le plus communément utilisé est le silicium, un élément présent en grande quantité dans le sable. [4]

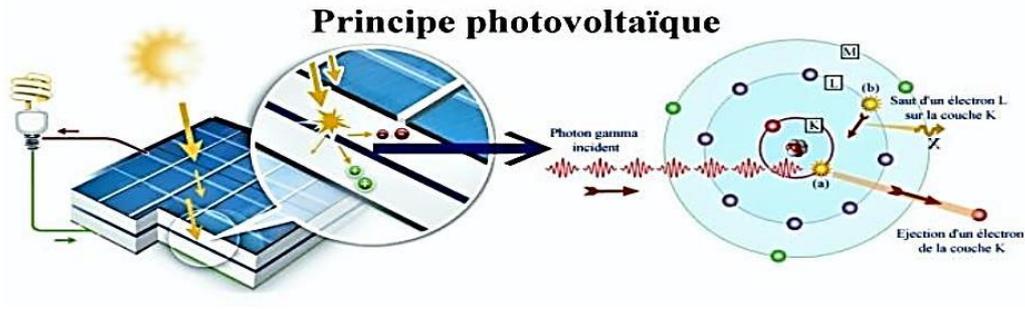


Figure ( I .2) : Principe de l'effet photovoltaïque.

**I -2-3 Rayonnement solaire:**

Les rayons solaires arrivent en permanence sur Terre et chauffent la surface de notre planète, sans cet apport d'énergie, la terre serait glaciale.

Le soleil émet un rayonnement de type électromagnétique. La lumière blanche nous parvient en très peu de temps (elle met en moyenne environ 8 minutes et 19 secondes à nous parvenir) car il se déplace à la vitesse de la lumière, soit 299 792 458 m/s.

Le rayonnement solaire est composé de plusieurs types de rayons, certains sont filtrés ou arrêtés par l'atmosphère et les nuages, alors que d'autres ne le sont pas. Les rayons solaires sont aussi appelés les radiations (voir figure I.3).

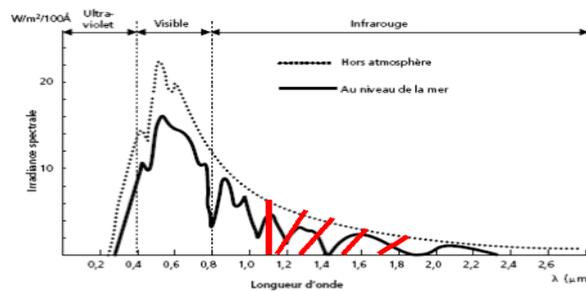


Figure ( I .3) : Spectre électromagnétique par et hors atmosphère [10].

## I - 2-4 La cellule photovoltaïque:

### I - 2-4-1 Définition:

La cellule photovoltaïque est l'élément qui permet de convertir l'énergie solaire en énergie électrique. Un panneau solaire photovoltaïque peut être constitué de certaines cellules photovoltaïques, Une cellule photovoltaïque (ou photopile) est un dispositif qui transforme l'énergie lumineuse en courant électrique. La cellule photovoltaïque est le composant électronique semi-conducteur qui compose un panneau solaire photovoltaïque et qui exposé à la lumière, produit de l'électricité. [2]

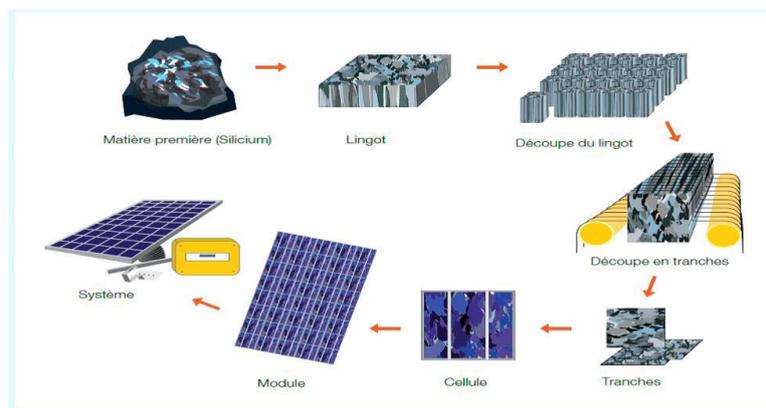


Figure ( I .4) : Chaîne de production de panneaux photovoltaïque (technologie cristalline)  
[21]

### I - 2-4-2 Historique:

Quelques dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque.

**1839:** Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.

**1875:** Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.

Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.

**1905 :** Albert Einstein a écrit que la lumière pouvait entrer à l'intérieur des atomes, et que la collision entre les photons et les atomes pouvait faire sortir des électrons de leurs orbites et permettre la création d'un courant électrique.

**1912 :** Albert Einstein sera le premier à expliquer le phénomène d'effet photovoltaïque, et reçoit le prix Nobel de physique en 1921 pour cette explication.

**1954:** Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.

**1958:** Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

**1973:** La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.

**1983:** La première voiture alimentée par l'énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie.

**1995:** Des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés, au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001.

Actuellement la production mondiale de l'électricité à base d'énergie solaire est d'environ : 185.9 TWh.

### **I - 2-4-3 Principe de fonctionnement:**

Pour passer de l'effet photovoltaïque à l'application pratique, il est nécessaire de trouver des matériaux qui permettent d'optimiser les deux phases essentielles de ce principe :

- Absorption de la lumière incidente.
- Collection des électrons en surface.

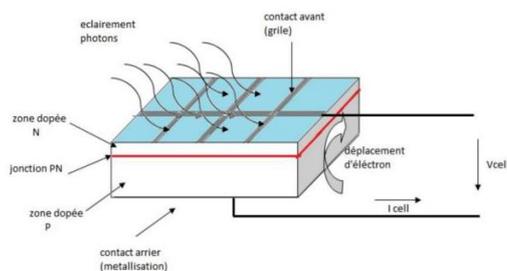
Les cellules PV sont fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs qui sous l'effet de la lumière sont capables de conduire l'électricité ou de la transporter.

Une des faces de la cellule est dopée **n** (par exemple du phosphore possédant 5 électrons sur sa dernière couche ainsi l'atome susceptible à libérer un électron). L'autre face est dopée **p** (par exemple du bore qui possède lui 3 électrons seulement sur sa périphérie, ainsi l'atome manque un électron pour la réalisation des liaisons, le bore va donc capter un électron dans le reste du matériau).

Des électrodes métalliques sont placées sur les 2 faces pour permettre de récolter les électrons et de réaliser un circuit électrique voir figure 1.7.

La face supérieure de la cellule est traitée de manière à optimiser la quantité de lumière entrant dans la cellule au moyen de traitement de surface, par l'application d'une couche anti réflexion.

L'effet photovoltaïque se manifeste quand un photon est absorbé dans un matériau composé de semi-conducteurs dopés p (positif) et n (négatif), dénommé comme jonction p-n (ou n-p). Sous l'effet de ce dopage, un champ électrique est présent dans le matériau de manière permanente (comme un aimant possède un champ magnétique permanent). Quand un photon incident (grain de lumière) interagit avec les électrons du matériau, il cède son énergie  $h\nu$  à l'électron qui se retrouve libéré de sa bande de valence et subit donc le champ électrique intrinsèque. Sous l'effet de ce champ, l'électron migre vers la face supérieure laissant place à un trou qui migre en direction inverse. Des électrodes placées sur les faces supérieure et inférieure permettent de récolter les électrons pour rejoindre les trous de la face antérieure à travers un circuit extérieur créant ainsi un courant électrique continu qu'on appelle la photo courant, les électrons sont délivrés sous la tension créée dans la jonction PN qu'on appelle la photo tension (comme montrée sur la figure I.5) [22].



**Figure ( I .5) :** Représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque [23].

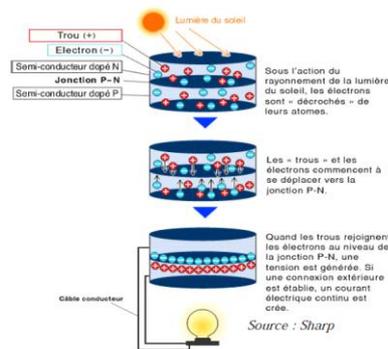


Figure ( I .6) : Principe de fonctionnement [24].

**I - 2-4-4 Technologies des cellules solaires en Silicium**

Il existe trois technologies principales des cellules solaires à base de silicium : cellule en silicium monocristallin, multi cristallin et cellule en silicium amorphe avec une quatrième technologie qui consiste à la mise en contact des deux matériaux, appelé cellule hétérojonction, elle est reçue par dépôt de silicium amorphe hydrogéné ultrafines sur le substrat cristallin (mono et poly), chaque type de cellules a un rendement et un coût.

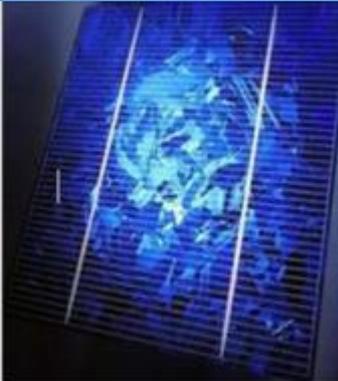
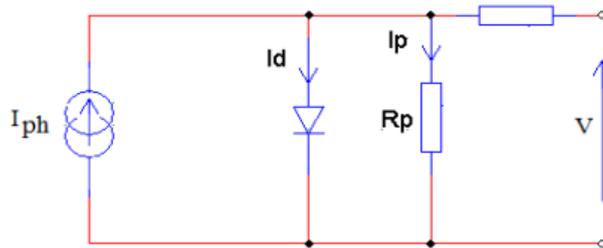
Type	Silicium Monocristalline	Silicium Poly Cristalline	Silicium Amorphe
Topologie			
Durée de vie	35 ans	35 ans	10 ans
Rendement	12 à 16% jusqu'à 23% en laboratoire	11 à 15% jusqu'à 20% en laboratoire	8 à 10% jusqu'à 13% en laboratoire
Avantages	Bon rendement en soleil direct	Bonne rendement en soleil direct (moins que monocristallin mais plus que l'amorphe)	Bon rendement en diffus
Inconvénients	Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux ...etc.) et prix élevée	Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux ...etc.) et prix élevée	Mauvais rendement en plein soleil
Principales utilisations	Aérospatial, module toits, façades	Dans les zones chaudes toits, façades et générateurs	Appareils électroniques intégration dans les bâtiments

Tableau ( I .1) : Comparatif des différentes technologies.

**I - 2-4-5 model équivalent de la cellule:**



**Figure ( I .7) :** Schéma équivalent d’une cellule photovoltaïque réelle.

Une cellule PV peut se modéliser à partir de l’équation définissant le comportement statique de la jonction PN d’une diode classique. Ainsi, la figure (1.7) illustre le schéma électrique équivalent d’une cellule PV réelle. Dans cette équation, on prend en compte le courant de court-circuit et les différentes résistances modélisant les pertes dues à la connectique.

En statique, le comportement d’une cellule PV constituée d’une jonction PN à base de silicium peut être décrit par l’équation suivante :

$$I = I_{ph} - I_d - I_p$$

Avec I: le courant fourni par la cellule

$$I_{sc} = I_{scr} \times \left(\frac{G}{1000}\right)$$

*Iscr*: Ou courant de court-circuit de référence

$$I_p = v + \frac{I \times R_s}{R_p}$$

*I<sub>p</sub>* : courant dérive par la résistance parallèle

$$I_d = I_0 \left[ \exp \left( v + \frac{I \times R_s}{n \times V_T} \right) - 1 \right]$$

*I<sub>d</sub>* : courant traversant la diode

$$I_0 = I_{sc} \left[ \exp \left( \frac{V_{OC}}{n V_T} \right) - 1 \right], \text{ le courant de saturation inverse d'une diode}$$

$$V_T = \frac{K}{T \times e}, \text{ tension thermique}$$

*ou e*: Charge d’électron ( $1.602 \times 10^{-19} C$ )

*K*: Constante de Boltzmann ( $1.381 \times 10^{-23} J / K$ )

*η*: Facture de non idéalité de la jonction comprise entre 1 et 5 dans la pratique

*T*: La température effective de la cellule de kelvin

En utilisant les équations ci-dessus, on peut en déduire l’expression du courant délivré par la cellule photovoltaïque.

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp \left( v + \frac{I \times R_s}{n \times V_T} \right) - 1 \right] - v + \frac{I \times R_s}{R_p}$$

### I - 2-5 Effet du changement climatique sur les grandeurs électriques des cellules:

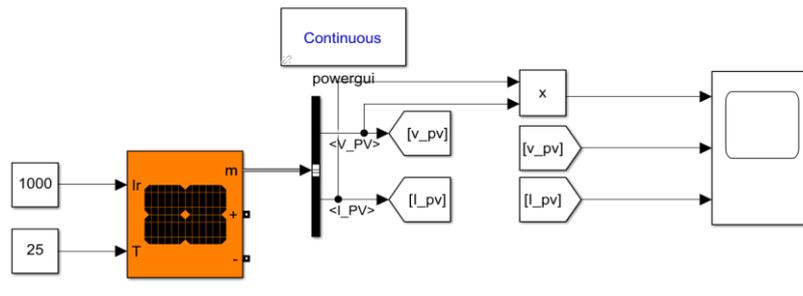


Figure ( I .8) : block d'effet de changement climatique sur les grandeurs électriques d'une cellule

#### I - 2-5-1 Effet irradiation:

Les figures représentent un exemple de la courbe I(V) et P(V) d'un panneau pour différents irradiation :

- Sur la courbe I(V) On remarque que la valeur du courant est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement, par contre la tension ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclaircissement. (Figure I.9).
- Sur la courbe P(V), on remarque que la puissance maximum délivrée par la cellule augmente avec l'irradiation. (Figure I.10).

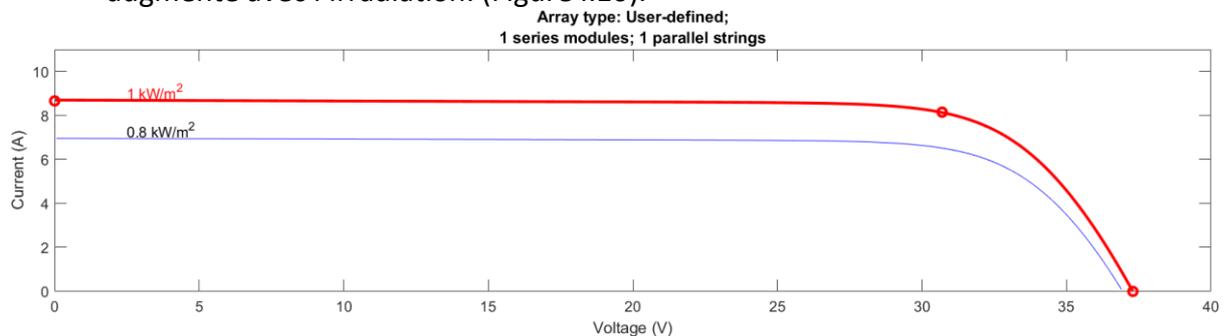


Figure ( I .9) : effet d'irradiation sur la caractéristique I=f(V)

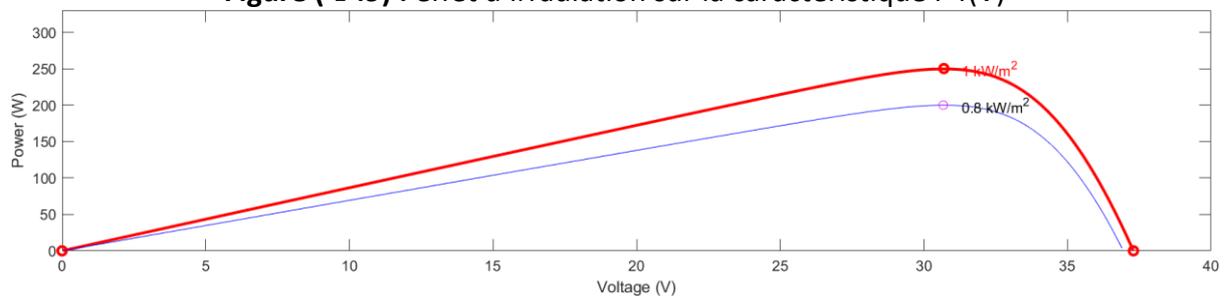


Figure ( I .10) : effet d'irradiation sur la caractéristique P=f(V)

#### I - 2-5-2 Effet température:

Les figures représentent un exemple de la courbe I(V) et P(V) d'un panneau pour différentes températures :

- Quand la température diminue, la tension à vide augmente, mais le courant de court-circuit diminue dans des proportions moindres (Figure I.11).

- La tension à vide et la puissance maximum diminuent très faiblement lorsque la température augmente (Figure I.12).

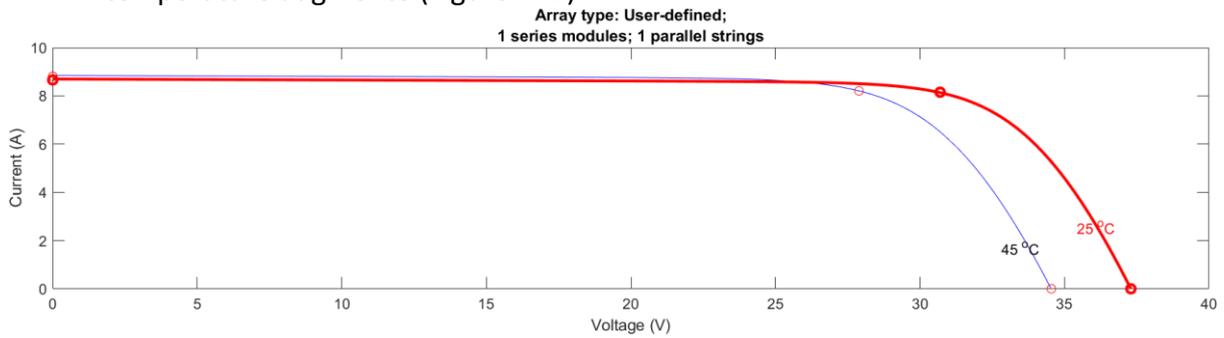


Figure ( I .11) : Effet de la température de la caractéristique  $I=f(V)$

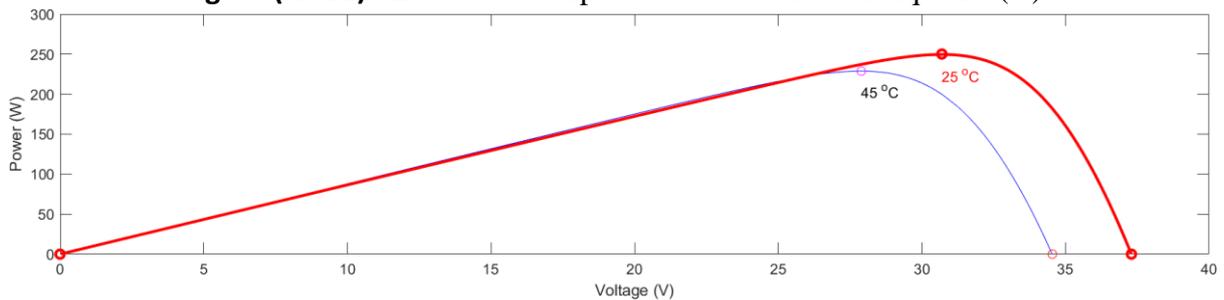


Figure ( I .12) : Effet de la température de la caractéristique  $P=f(V)$

### I - 2-6 Association des cellules:

#### I - 2-6-1 Association des Cellules Photovoltaïques en Série:

Une association de  $N_s$  cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque et donc accroître la puissance, *figure ( I .13)*. Les cellules sont alors traversées pour le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, l'équation résume les caractéristiques électriques d'une association de  $N_s$  cellules en séries.

$$V_{co} = N_s \cdot V_{CO}$$

$V_{co}$ : tension en circuit-ouvert

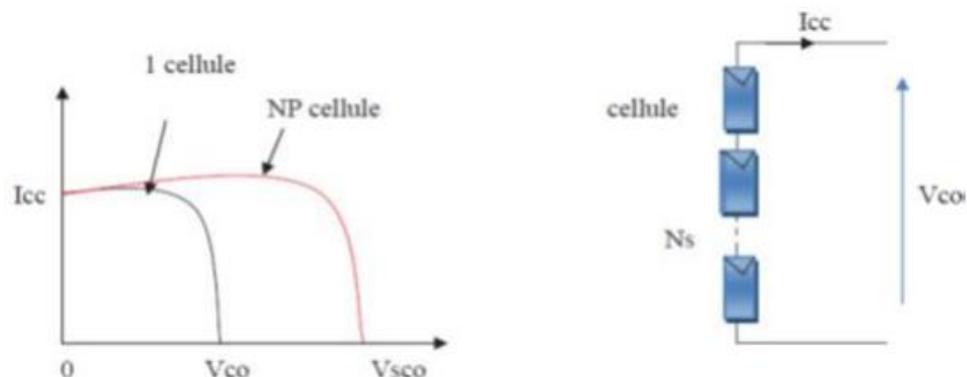


Figure ( I .13) : Caractéristique courant tension de  $N_s$  cellule en série

### **I - 2-6-2 Association des Cellules Photovoltaïques en parallèle:**

D'autre part une association parallèle de  $N_p$  est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectés en parallèle les cellules ont soumis la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants. Avec :

$$I_{CC} = N_p \cdot I_{CC}$$

$I_{CC}$ : courant de court-circuit

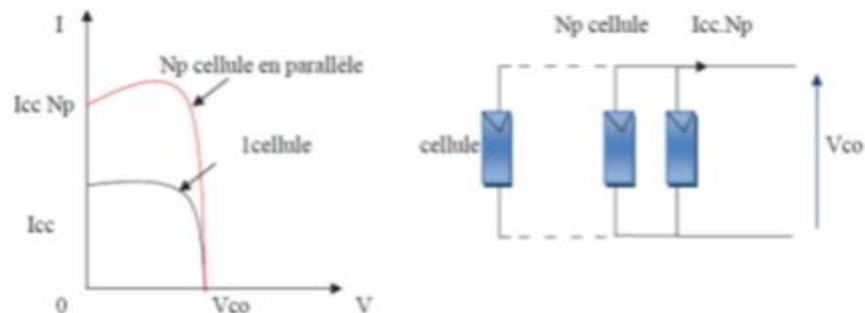


Figure ( I .14) : Caractéristique courant tension de ( $N_p$ ) cellule en parallèle.

### **I - 2-7 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque:**

#### **I - 2-7-1 Avantages:**

- ✓ D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- ✓ Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.
- ✓ Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- ✓ La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

#### **I - 2-7-2 Inconvénients:**

- ✓ La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- ✓ Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne

sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.

- ✓ Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.
- ✓ Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes

### ***I - 3 ÉTAGE D'ADAPTATION:***

Un GPV présente des caractéristiques  $I(V)$  non linéaires avec des PPM variable. Ces caractéristiques dépendent entre autre du niveau d'éclairement et de la température de la cellule. De plus, selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le GPV débite, nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode connexion directe.

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le GPV et la charge comme décrit dans la figure I.18. Cet étage, se compose d'un circuit de puissance de topologie DC/DC (hacheur), menu d'un circuit de commande où il y'aura un algorithme qui permette à suivre le point de puissance maximale (MPPT).

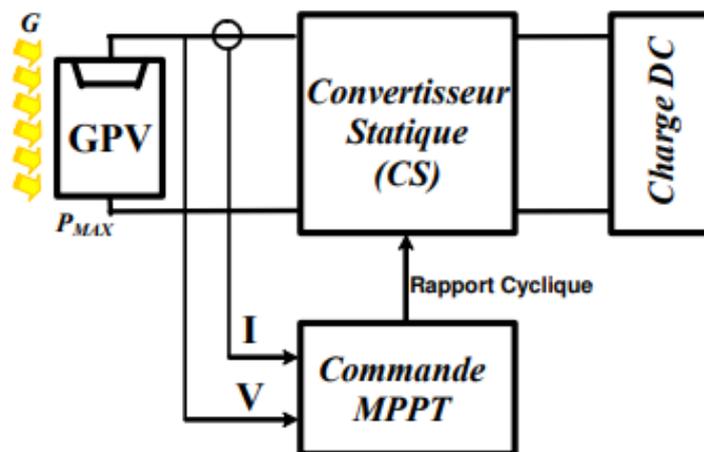


Figure ( I .15) : Schéma synoptique du GPV avec étage d'adaptation

#### ***I - 3-1 Convertisseurs DC-DC:***

Un Convertisseur DC-DC est un dispositif électrique qui permet de transformer une tension continue de valeur fixe en une tension continue réglable (Figure I.16). Il est constitué d'un interrupteur qui peut être un transistor (pour des faibles puissances) ou un thyristor (pour grande puissance).

Un hacheur est un abaisseur de tension lorsque l'interrupteur est placé en série avec la charge. Il est élévateur de tension lorsque l'interrupteur est placé en parallèle avec la charge.

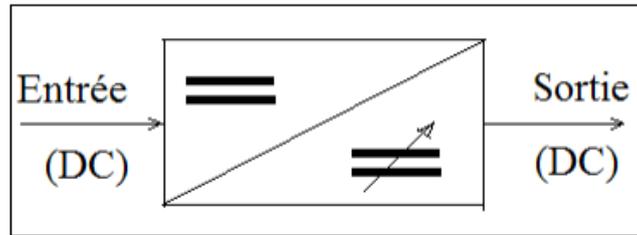


Figure ( I .16) : Schéma de principe d'un hacheur.

### I - 3-1-1 Structure de base des convertisseurs DC-DC

Nous considérons dans la présentation des montages hacheurs que :

- ✓ La source d'entrée du convertisseur est une source de tension continue  $V_e$ .
- ✓ La sortie est également considérée comme une source de tension continue  $V_s$ .
- ✓ La charge est assimilable à une résistance  $R$ .
- ✓ Le circuit d'un hacheur se compose essentiellement de condensateur, inductance et de semi-conducteur. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle ces convertisseurs ont un bon rendement.
- ✓ Les semi-conducteurs sont :
  - Les diodes.
  - Les interrupteurs commandables.

### I - 3-1-2 Type d'hachures:

Il existe plusieurs types des convertisseurs DC- DC qui regroupent des convertisseurs à isolement galvanique entre l'entrée et la sortie et des convertisseurs qui présentent une borne commune entre l'entrée et la sortie.

Dans les convertisseurs à stockage d'énergie, trois types des convertisseurs statiques sont distinguées :

- Hacheur abaisseur « Buck converter »
- Hacheur élévateur « Boost converter »
- Hacheur abaisseur élévateur « Buck-Boost converter »

#### I - 3-1-2-1 Hacheur BUCK:

Le convertisseur BUCK peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur dévolteur ou hacheur série. C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant. L'interrupteur  $K$  peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage).

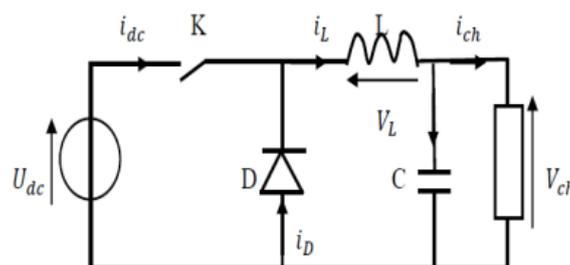


Figure ( I .17) : Hacheur série (abaisseur).

**I - 3-1-2-2 Hacheur BUCK-BOOST:**

Un convertisseur BUCK-BOOST est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible ou plus grande valeur mais de polarité inverse. C'est un convertisseur indirect DC-DC à stockage inductif. La source d'entrée est de type tension continue (filtrage capacitif en parallèle avec une source de tension) et la charge de sortie continue de type source de tension (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage).

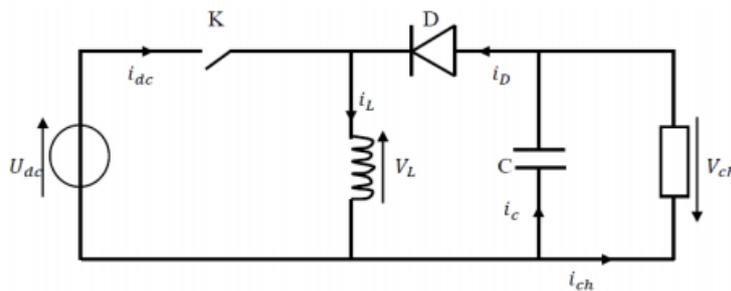


Figure ( I .18) : Hacheur abaisseur-élevateur.

**I - 3-1-2-3 Hacheur BOOST:**

Ce dernier est un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de hacheur parallèle. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure. C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage).

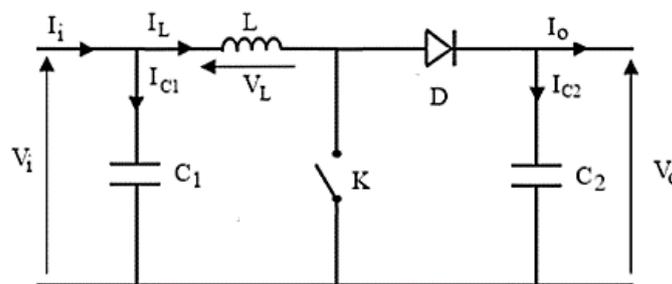


Figure ( I .19) : Hacheur parallèle (élevateur).

**I - 3-1-2-3-1 Fonctionnement:**

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée  $\alpha T_e$ , le courant dans l'inductance croît linéairement (figure. I.23). La tension aux bornes de K est nulle. Pendant le temps  $t = [\alpha T_e, T_e]$ , l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. On a alors  $V_k = V_0$ . En écrivant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on arrive à  $V(1-\alpha) = V_i$

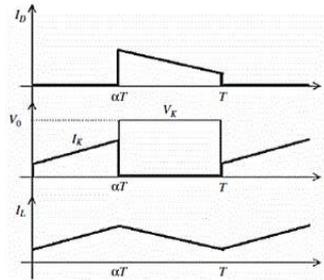


Figure ( I .20) : Chronogrammes du courant et de la tension d'un hacheur BOOST

**I - 3-1-2-3-2 Modèle mathématique équivalent:**

Afin de pouvoir synthétiser les fonctions du hacheur survolteur à l'état d'équilibre, il est nécessaire de présenter les schémas équivalents du circuit à chaque position de l'interrupteur K. Celui de la figure (I.24), présente le circuit équivalent du BOOST lorsque K est fermé c'est-à-dire entre  $[0, \alpha Te]$ .

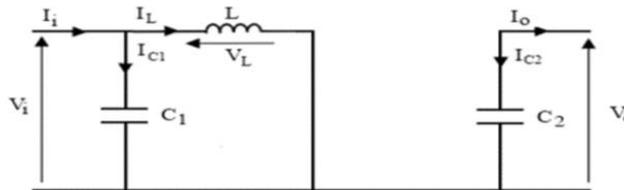


Figure ( I .21) : Schéma électrique d'un hacheur BOOST fermé.

L'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donne :

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dvi(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t)$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = -I_0(t)$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t)$$

À l'état ouvert de l'interrupteur K, le circuit équivalent au fonctionnement du BOOST est le suivant :

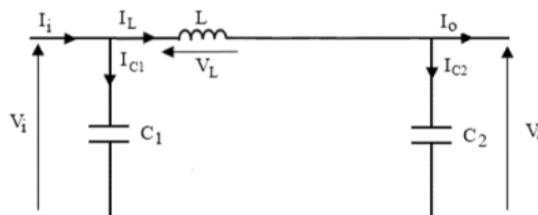


Figure ( I .22) : Schéma électrique d'un hacheur BOOST ouvert

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dvi(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t)$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = I_L - I_0(t)$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_0(t)$$

### I - 3-1-3 Gain en tension des convertisseurs

	BOOST	BUCK	BUCK-BOOST
Gain de tension	$\frac{1}{1-D}$	D	$\frac{D}{1-D}$
Courant de source	Continu	Discontinu	Discontinu

Tableau ( I .2) : Gain en tension des convertisseurs.

### I - 3-1-4 Utilisation des hacheurs dans les systèmes PV

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

La topologie boost est employée pour augmenter la tension. Les systèmes de production de l'énergie emploient un convertisseur boost pour augmenter la tension de sortie au niveau de service avant l'étage de l'onduleur. Puis, il y a des topologies capables d'augmenter et de diminuer la tension telle que le buck-boost ...ect.

Le tableau 2.2 résume les principaux rapports de transformation en fonction du rapport cyclique pour les différentes structures de convertisseurs statiques avec et sans isolement galvanique. Où D désigne le rapport cyclique du convertisseur

Convertisseurs	Rapport de transformation en fonction de D	Isolement galvanique
Buck	D	Non
Boost	$\frac{1}{1-D}$	Non
Buck-Boost	$\frac{-D}{1-D}$	Non

Tableau ( I .3) : Rapports de transformation des principaux convertisseurs DC-DC. [41]

### I - 3-2 Principe de la recherche du point de puissance maximale:

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

#### I - 3-2-1 Algorithme Perturber et observer 'P&O':

Le principe de cet algorithme est d'effectuer une perturbation sur la tension du panneau PV tout en agissant sur le rapport cyclique D. En effet, suite à cette perturbation, on calcule la puissance fournie par le panneau PV à l'instant k, puis on la compare à la précédente de l'instant (k - 1). Si la puissance augmente, on s'approche du point de puissance maximale, 'PMP' et la variation du rapport cyclique est maintenue dans le même sens. Au contraire, si la puissance diminue, on s'éloigne du point de puissance maximale, 'PMP'. Alors, on doit inverser le sens de la variation du rapport cyclique.

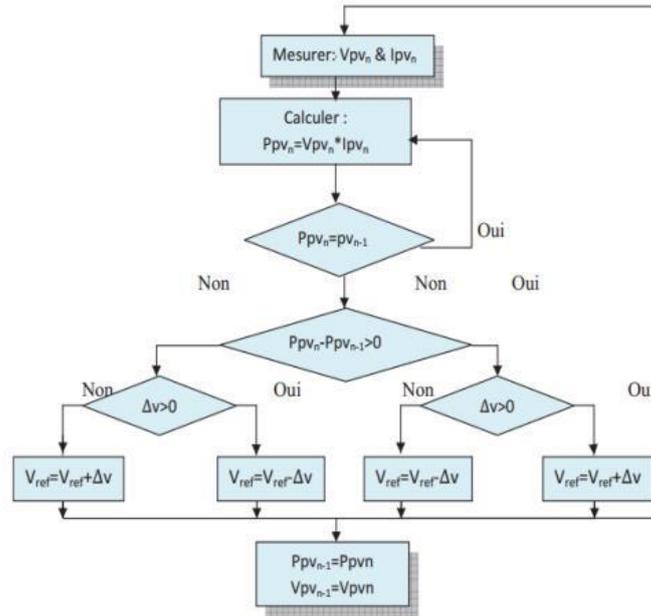


Figure ( I .23) : Organigramme de la méthode de perturbation et d’observation

**I - 3-2-2 Algorithme Incrément de la conductance, ‘INC’**

Le principe de cet algorithme est basé sur la connaissance de la valeur de la conductance  $G = I \times V$  et sur l’incrément de la conductance ( $dG$ ) pour en déduire la position du point de fonctionnement par rapport au point de puissance maximale, ‘PMP’. Si l’incrément de conductance ( $dG$ ) est supérieur à l’opposé de la conductance ( $dG$ ), on diminue le rapport cyclique. Par contre, si l’incrément de conductance est inférieur à l’opposé de la conductance, on augmente le rapport cyclique. Ce processus est répété jusqu’à atteindre le point de puissance maximale, ‘PMP’.

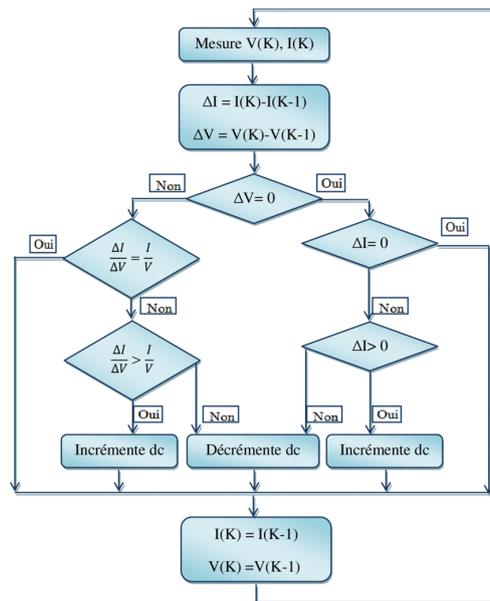
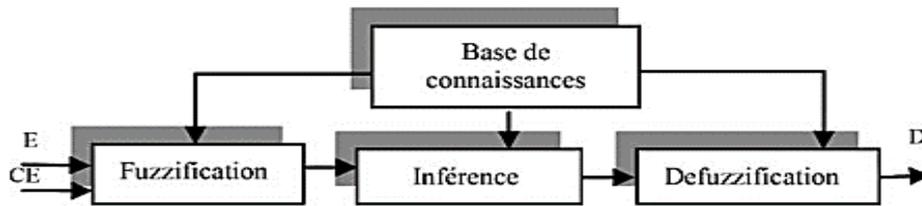


Figure ( I .24) : Organigramme de la méthode de perturbation et d’observation

**I - 3-2-3 Algorithme à base de la logique floue**

Récemment, la commande à base de la logique floue a été utilisée dans les systèmes de poursuite du point de puissance maximale. Cette commande offre l’avantage d’être une commande robuste et qui ne nécessite pas la connaissance exacte du modèle mathématique du système.



**Figure ( I .25) :** Organigramme de la méthode de perturbation et d’observation

En particulier, cette commande est mieux adaptée aux systèmes non linéaires. Le fonctionnement de cet algorithme se fait en trois blocs : la fuzzification, l’inférence et la défuzzification.

**I - 3-2-4 Comparaison de trois algorithmes de commande MPPT:**

Le tableau suivant résume les principales spécifications des différents algorithmes MPPT précédemment étudiés. Nous avons évalué et comparé ces algorithmes en termes de connaissance technique des paramètres du panneau PV, complexité, rapidité et précision.

Algorithme MPPT	P&O	INC	LF
Type de capteurs utilisés	1 Tension 1 Courant	1 Tension 1 Courant	1 Courant
Identification des paramètre du panneau PV	Non Nessecaire	Non nessecaire	Oui nessecaire
Complexité	Basee	Moyenne	Haute
Vit. convergence	Moyenne	Moyenne	Très rapide
Avantage	Classique et simple	Comporte mieux lors d’un changement rapide des conditions météorologique.	-Un algorithme Robuste et efficace. -Fonctionne au point optimal sans Oscillations. -Un bon Comportement en état transitoire.
Inconvénients	Mauvais comportement suite à un changement brusque de l’éclairément (nuages).	Plus complexe à P&O	Plus complexe que les algorithmes classiques. - L’efficacité de cet algorithme dépend énormément du tableau d’inférence.

**Tableau ( I .4) :** Comparaison des techniques MPPT

**I - 4 Simulation et interprétation des résultats:**

Dans cette partie de simulation on a utilisé un module photovoltaïque et un hacheur boost caractérisé par :  $L = 3.7e-03$  H  $C = 1000e-06$  F avec  $R_{ch} = 6$  Ohms

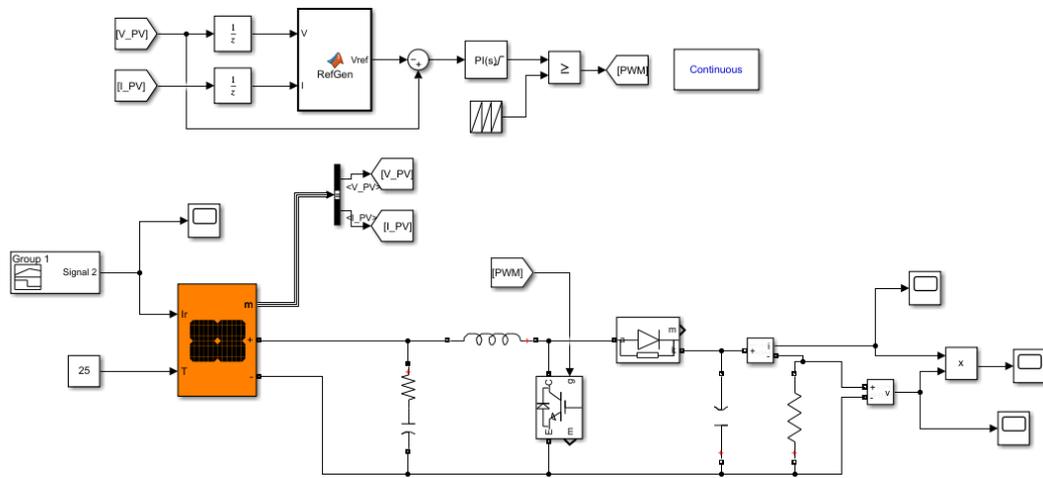


Figure ( I .26) : Schéma bloc du système PV

**I - 4-1 Résultat de la simulation:**

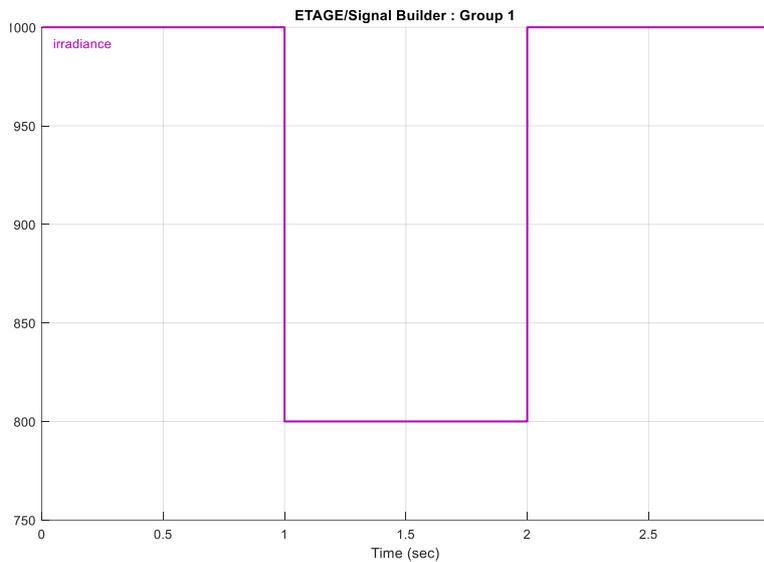


Figure ( I .27) : Allure d'irradiation

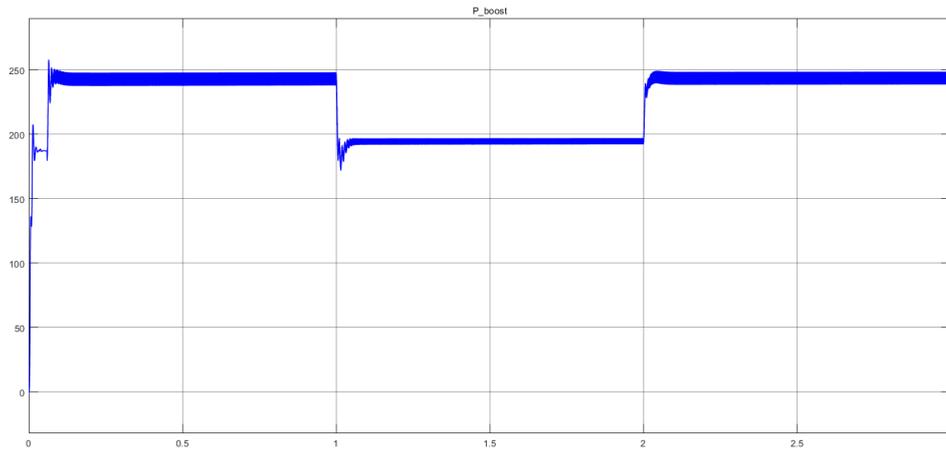


Figure ( I .28) : Variation de la puissance

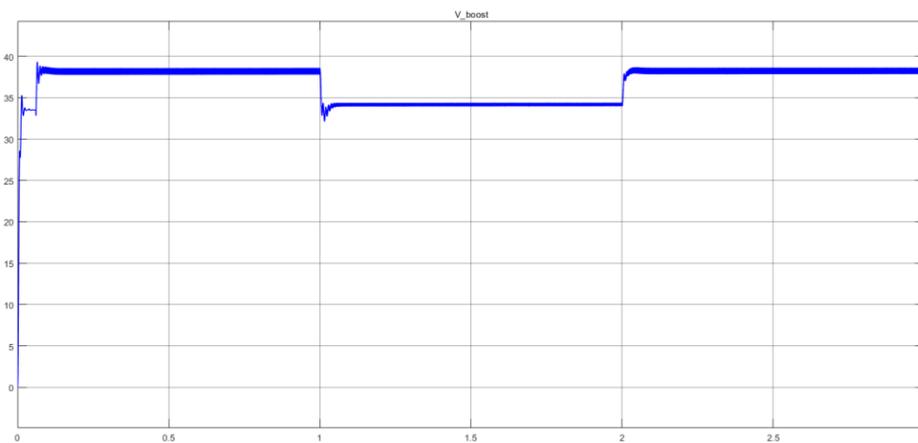


Figure ( I .29) : Variation de la tension

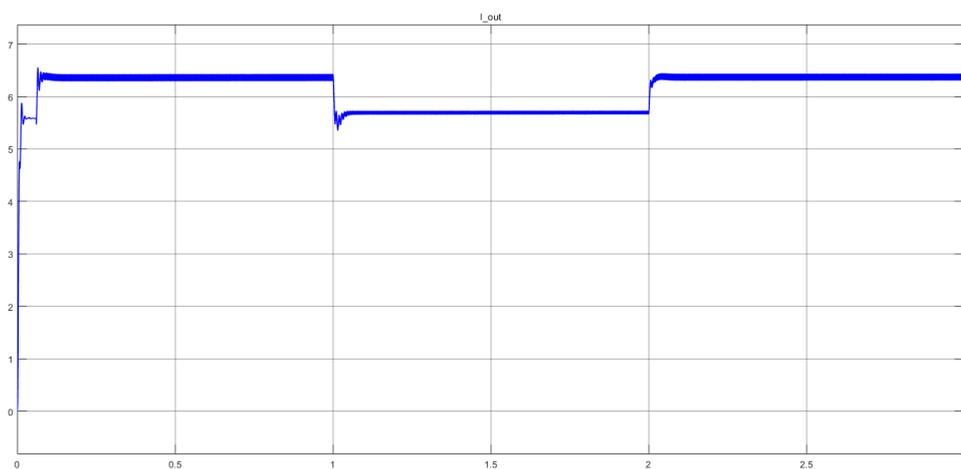


Figure ( I .30) : Variation de courant

***I - 5 Conclusion :***

Ce chapitre nous a permis de donner une vue générale sur les systèmes photovoltaïques, (un petit rappel sur la description des éléments d'un système photovoltaïque, il est décomposé en deux grand partie : -générateur PV, - Etage d'adaptation qui contient une partie puissance (hacheur boost) et une partie de commande (MPPT)). Aussi le module photovoltaïque et leurs performances. Ainsi que leurs avantages et inconvénients.

Dans le chapitre 2, on présentera les différentes topologies de l'onduleurs multi-niveaux et leurs principes de fonctionnement avec leur schéma de principe ainsi que les avantages et inconvénients

## *Chapitre 02 :*

*Etude et simulation des différents  
topologies des onduleurs multiniveaux*

## II-1 Introduction:

Au début des années 90, l'évolution des propriétés des semi-conducteurs de puissance a stimulé la croissance du marché des convertisseurs dédiés aux applications moyenne et forte puissance allant de quelques kilowatts à plusieurs mégawatts dans la gamme du kilovolt. Cette évolution a influencé principalement le domaine de l'industrie, mais a également eu un impact significatif sur les systèmes de génération d'énergie électrique.

Cette augmentation incessante des niveaux de puissance mis en jeu s'est traduit par une hausse des niveaux de tension et de courant, et a nécessité le développement de semi-conducteurs de plus en plus performants. Depuis les débuts de l'électronique de puissance, ces derniers (les semi-conducteurs), pour la plupart à base de silicium, ont été utilisés : diodes, transistors bipolaires, MOSFETs, thyristors, GTOs, IGBTs, etc.

Les onduleurs de tension sont une fonction fondamentale de l'électronique de puissance. On les retrouve dans le plus large éventail d'applications, dont la plus connue est sans aucun doute le domaine de la variation de vitesse des moteurs à courant alternatif. Le développement puissant de cette fonctionnalité repose d'une part sur le développement de composants semi-conducteurs entièrement contrôlables, puissants, robustes et rapides et d'autre part sur l'utilisation quasi universelle des techniques dites de modulation. Étendue et les progrès de la micro-informatique.

## II-2 Définition d'un onduleur:

Un onduleur est un convertisseur statique qui convertit la tension continue en tension alternative avec une fréquence et une amplitude variables. Les onduleurs peuvent être utilisés pour alimenter des équipements nécessitant une tension alternative, tels que des moteurs électriques, des systèmes de climatisation, des éclairages, etc. Il se compose de plusieurs composants tels que des transistors, des diodes, des condensateurs, etc. qui aident à générer des formes d'onde sinusoïdales à partir d'une source de tension continue. Selon l'application et l'utilisation, les onduleurs peuvent avoir des puissances de sortie et des fréquences différentes.

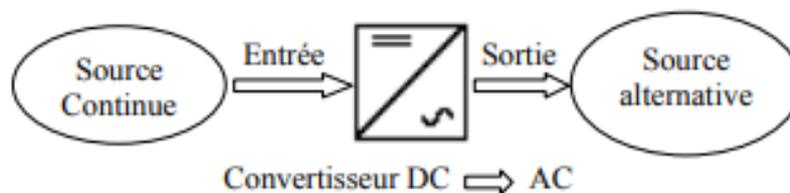


Figure ( II . 1): Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC – AC)

## **II- 2 - 1 Types d'onduleurs:**

### **II- 2 - 1 -1 Les onduleurs non autonomes:**

L'onduleur non autonome est un circuit qui utilise un pont redresseur à thyristors (pont de Graze) pour convertir le courant alternatif du réseau en courant continu, puis le module pour générer un courant alternatif de la fréquence requise. Ce type d'onduleur est souvent utilisé pour récupérer de l'énergie lors du freinage des moteurs électriques. Cependant, il est de plus en plus remplacé par des convertisseurs IGBT ou GTO pour des applications à plus grande échelle telles que les variateurs de vitesse statiques pour moteurs à courant continu et alternatif, les cyclo convertisseurs synchrones et asynchrones et l'inversion de courant pour les dispositifs de machines d'une puissance de plusieurs mégawatts.

### **II- 2 - 1 - 2 Les onduleurs autonomes:**

Un onduleur est dit autonome s'il utilise l'énergie de ses propres circuits auxiliaires pour commuter des thyristors ou d'autres semi-conducteurs. Dans ce cas, nous contrôlons la fréquence et la forme d'onde de la tension de sortie. Il existe deux types d'onduleurs autonomes :

- Les onduleurs de tension alimentée par une source de tension continu.
- Les onduleurs de courant alimentés par une source de courant continu.

#### **II- 2 - 1 - 2 - 1 Les onduleurs de tension:**

Un onduleur de tension est un dispositif électronique qui capable de transformer la tension d'une source d'énergie continue (par exemple une batterie) en une tension alternative de fréquence déterminée. En d'autres termes, il convertit une tension continue en une tension alternative. Les onduleurs de tension sont utilisés dans une variété d'applications, notamment dans les systèmes d'alimentation de secours pour fournir une alimentation électrique continue et stable en cas de coupure de courant. Ils sont également utilisés pour alimenter des équipements électroniques tels que les ordinateurs, les téléviseurs et les systèmes de climatisation qui fonctionnent en courant alternatif.

#### **II- 2 - 1 - 2 - 2 Les onduleurs de courant:**

Un onduleur de courant, également appelé variateur de courant, est un type d'onduleur qui permet de contrôler la vitesse d'un moteur électrique en modifiant le courant qui le traverse. Contrairement à un onduleur de tension qui régule la tension électrique fournie à un équipement électrique, un onduleur de courant modifie la fréquence du courant alternatif pour contrôler la vitesse d'un moteur. Les onduleurs de courant sont utilisés dans une variété d'applications industrielles, notamment dans les entraînements de moteurs à vitesse variable, les contrôleurs de servomoteurs et les convertisseurs de fréquence.

## **II- 2 - 2 Critère de choix d'onduleur:**

### **II- 2 - 2 -1 Premier critère de choix d'un onduleur : sa puissance**

La puissance est le premier critère de choix d'un onduleur. En effet, un onduleur doit avoir une puissance suffisante pour suppléer une panne de courant. La puissance d'un onduleur est

exprimée en Volts Ampères (VA). La conversion rapide et approximative des V.A en watts est obtenue par le calcul suivant : Nombre de V.A = Nombre de Watts/0,66. Pour savoir la puissance dont on a besoin, on fait la somme des consommations de tout le matériel qui doit être connecté à l'onduleur.

### **II- 2 - 2 -2 Second critère de choix : le type de défaillance électrique**

Pour choisir un onduleur, il faut aussi avoir en tête le type de problème qu'il faudra régler. Ainsi, si on veut pallier aux coupures de courant, il est possible d'utiliser l'un des trois types d'onduleurs. Pour faire face aux chutes de tension

### **II- 2 - 2 -3 Troisième critère de choix : le type d'utilisation**

Le type d'utilisation est également un critère important, sinon le plus important, pour choisir un onduleur. Chaque type d'onduleur convient à une catégorie d'activités en particulier.

### **II- 2 - 3 Domaines d'applications des onduleurs :**

Les onduleurs ont été conçus essentiellement pour fonctionner dans les domaines d'applications suivants :

#### **II- 2 - 3 - 1 Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone :**

La vitesse d'un moteur synchrone est directement liée à la pulsation des courants statiques qui le traversent. Pour modifier sa vitesse, il est donc nécessaire de modifier la fréquence des tensions d'alimentation. Pour ce faire, il est nécessaire de redresser la tension du réseau électrique, puis de la convertir en une tension alternative de fréquence désirée.

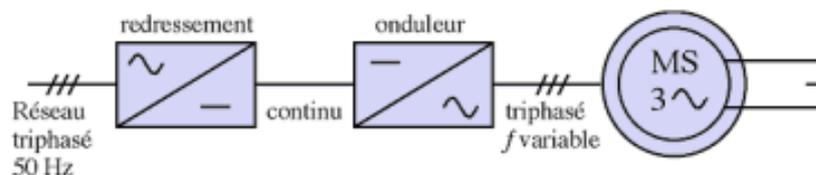


Figure ( II . 2): Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone

#### **II- 2 - 3 -2 Alimentation de secours:**

En cas de panne électrique, un onduleur permet de maintenir l'alimentation électrique des équipements à l'aide de batteries. En informatique professionnelle, l'utilisation d'un onduleur est essentielle pour prévenir la perte de données en cas de coupure de courant.

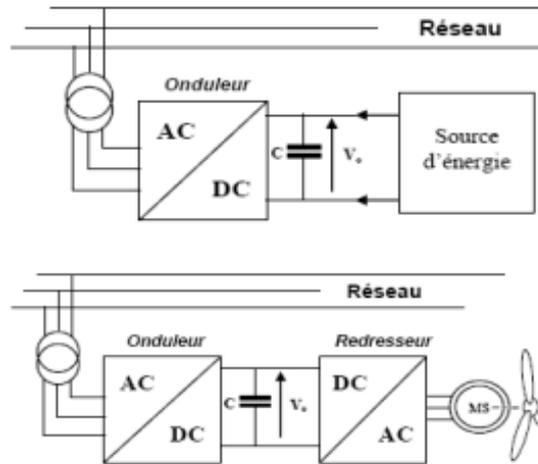


Figure ( II . 3): Alimentation de secours

**II- 2 - 3 - 3 Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes :**

La France fournit de l'énergie électrique à la Grande-Bretagne, mais la fréquence du réseau anglais est 60 Hz. Il faut donc adapter la fréquence.

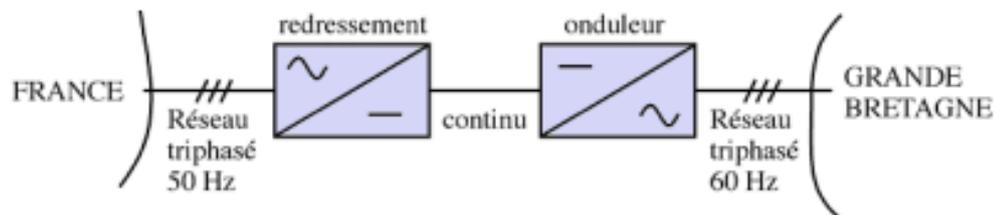
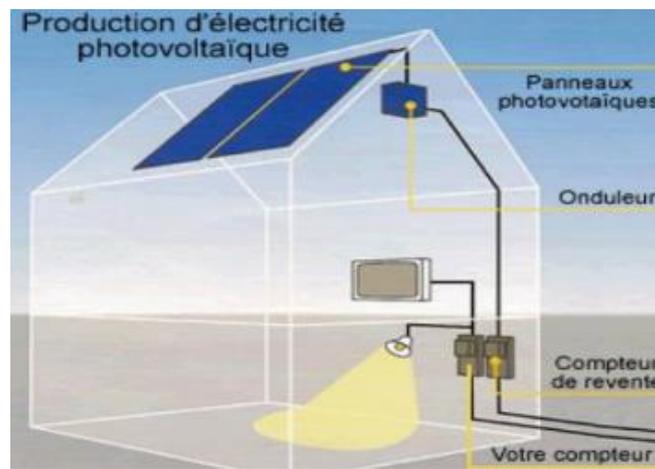


Figure ( II .4): Transfert de l'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes

**II- 2 - 3 - 4 Le raccord des panneaux solaires au réseau électrique**



### **II- 2 - 4 Les avantages d'onduleurs:**

- Le principal avantage de l'onduleur est de protéger des installations électriques contre les coupures brusques ou intempestives du courant. Ces coupures peuvent endommager ces installations, faire laisser inachevé un travail qu'on a commencé ou faire perdre des données ou des textes en cours de traitement.
- Le coût de mise en place est faible.
- Le montage de l'onduleur centralisé est vraiment simple.
- L'usage est simple et sans inconvénients majeurs.
- En cas de panne, le service après-vente est facile à réaliser car tout est centralisé.
- La possibilité d'augmenter la productivité globale de l'installation grâce à l'ajout de strings.
- La compatibilité avec les batteries de nombreuses marques.

### **II- 2 - 5 Les inconvénients d'onduleurs:**

- En cas de détérioration du câblage, la sécurité de l'édifice peut être compromise avec un risque d'incendie.
- En cas de problème sur panneaux, la perte de production est probable.
- Le dimensionnement de l'onduleur centralisé doit-être fait de manière professionnelle.
- La durée de vie du matériel (environ 10 ans) et les garanties sont courtes (de 5 à 7 ans).

### **II- 3 Définition de l'onduleur multi niveaux :**

L'onduleur de tension multi-niveaux possède trois ou plusieurs niveaux. Par leur structure, Les onduleurs à trois niveaux sont réversibles. Ils peuvent fonctionner en onduleur pour transférer l'énergie de la source de tension continue à la source de courant alternatif ou bien fonctionner en redresseur et assurer alors le transfert énergétique dans le sens inverse.

#### **II- 3 - 1 Historique des onduleur Multiniveau:**

L'histoire de la conversion multi-niveaux commence au début des années 70. La première structure décrite est une mise en série de pont en H pour synthétiser une tension de sortie alternative sous forme d'escalier. Puis au début des années 80 est apparu le convertisseur clampé par le neutre (NPC). Cette structure est considérée comme le premier convertisseur multi-niveau pour des applications de moyennes puissances. Puisque l'onduleur NPC double effectivement le niveau de tension sans exiger une tension assorti précise, la topologie NPC a régné dans les années 80. L'application de l'onduleur NPC et de son extension aux convertisseurs multi-niveaux a été publiée par. Depuis, de nombreuses études ont été proposées pour étudier ses propriétés et les évolutions possibles de cette structure.

Bien que l'onduleur multi-niveau en cascade ait été inventé le premier, ses applications n'ont pas régné jusqu'au milieu des années 90. Deux brevets importants ont été publiés pour indiquer la supériorité des onduleurs en cascade pour l'entraînement des moteurs. En raison de la grande demande des onduleurs de haute puissance et de moyenne tension, l'onduleur multi-niveau en cascade a tiré d'énorme intérêt.

Dans les années 90, les recherches sont tournées vers de nouvelles structures et ils sont portées vers les convertisseurs multicellulaires série, aussi connus dans la littérature sous le

nom de Flying Capacitor (FC). Et c'est à la fin des années 90 qu'est né le convertisseur multicellulaire superposé, cette structure est une suite de la réflexion sur les convertisseurs multicellulaires série. Ces structures peuvent être considérées comme les structures de base de la conversion multi-niveaux. Beaucoup de propriétés de ces structures de base sont communes avec les nouvelles structures découvertes.

### **II- 3 - 2 Avantage des onduleur Multiniveaux:**

Un convertisseur multi-niveau offre plusieurs avantages par rapport à un convertisseur conventionnel à deux niveaux utilisant la modulation de largeur d'impulsion (MLI) à haute fréquence de commutation. Les caractéristiques techniques attrayantes d'un convertisseur multi-niveau peuvent être résumées comme suit :

- Les convertisseurs multi-niveaux ont la capacité de générer des tensions de sortie avec une très faible déformation de la forme d'onde en escalier, ce qui améliore la qualité de l'alimentation électrique. En outre, ils permettent également de réduire les efforts de montée en tension ( $dv/dt$ ), ce qui peut réduire les problèmes d'interférences électromagnétiques. Ainsi, les convertisseurs multi-niveaux sont particulièrement utiles pour les applications qui nécessitent une haute qualité de forme d'onde et une faible interférence électromagnétique, comme les systèmes d'alimentation de précision, les entraînements de moteurs et les équipements de télécommunications.
- Les convertisseurs multi-niveaux produisent généralement une plus petite tension de mode commun (MC) que les convertisseurs conventionnels à deux niveaux utilisant la modulation de largeur d'impulsion (MLI) à haute fréquence de commutation. Cela signifie que les efforts sur les roulements d'un moteur connecté à un onduleur multi-niveau peuvent être réduits. De plus, grâce à l'utilisation de stratégies de modulation avancées, il est possible d'éliminer complètement la tension de mode commun produite par les convertisseurs multi-niveaux. Cela peut être particulièrement important pour les applications qui nécessitent une faible interférence électromagnétique et un fonctionnement à faible bruit, tels que les systèmes de contrôle de mouvement et les équipements de traitement de données sensibles.
- Les convertisseurs multi-niveaux ont la capacité de tirer un courant d'entrée avec une faible distorsion.
- Les convertisseurs multi-niveaux peuvent fonctionner à la fois à la fréquence fondamentale et à la haute fréquence de commutation MLI. Il convient de noter qu'une fréquence de commutation plus faible est généralement associée à une perte de commutation plus faible, ce qui se traduit par un rendement plus élevé.[5]

### **II- 3 - 3 Principe de fonctionnement l'onduleur multi-niveaux :**

Dans cette paragraphe on va introduire le principe général du comportement multiniveau, la figure en bas montre un diagramme schématique d'une phase d'un convertisseur avec différents nombres de niveaux, pour lesquels l'action des semi-conducteurs de puissance est représentée par un commutateur idéal avec plusieurs positions. Un convertisseur à deux niveaux génère une tension de sortie avec deux valeurs (niveaux) par rapport à la borne négative de la source : position P1 :  $V_{NO} = E$ , Position P2 :  $V_{NO} = 0$ , tandis que le convertisseur à trois niveaux génère trois tensions, les trois positions (P1, P2 et P3) de l'interrupteur de la figure, permettent d'avoir respectivement trois niveaux de tension ( $E$ ,  $-E$  et  $0$ ) et ainsi de suite

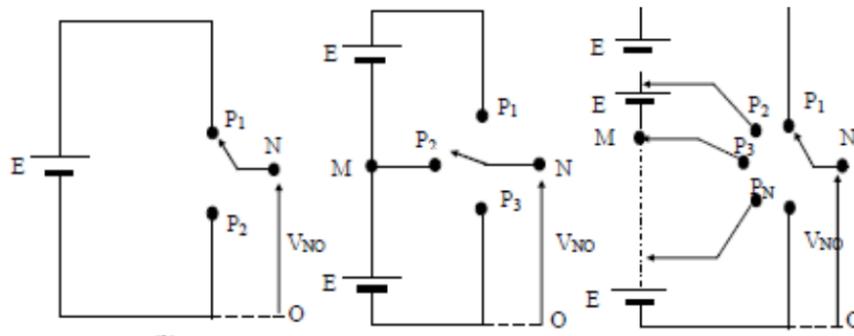


Figure ( II . 5): Onduleur à deux niveaux (a), à trois niveaux (b) et à m-niveaux (c).

### II- 3 - 4 Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux :

On dit qu'un onduleur est un onduleur multiniveau quand il possède trois ou plusieurs niveaux. Le but de cette partie de notre recherche est de donner une vue générale des trois topologies de base des onduleurs multi-niveaux :

- ✓ La topologie a diode de bouclage (NPC).
- ✓ La topologie au condensateur flotteur (à cellules imbriquées).
- ✓ La topologie en cascade (pont H).

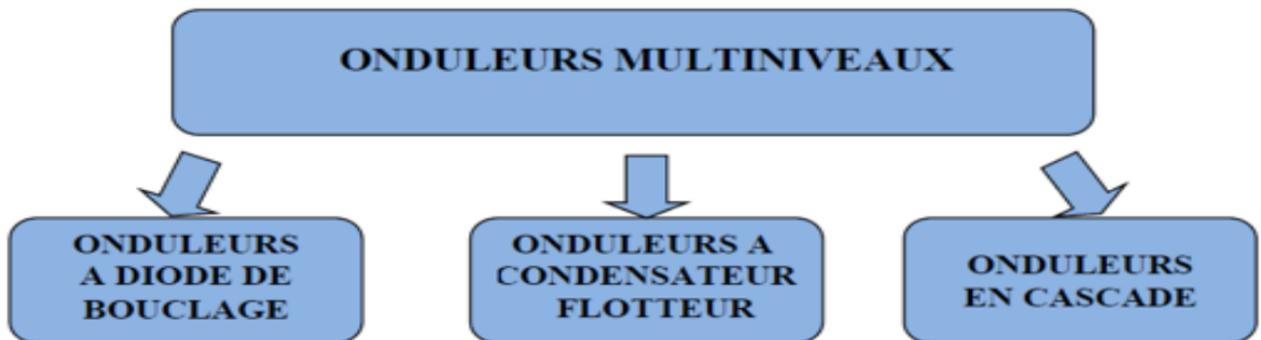


Figure ( II . 6): Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux.

#### II- 3 - 4 - 1 Onduleurs multi-niveaux à structure NPC :

Cette structure d'onduleur multi-niveaux a été introduite par A. Nabae et H. Akagi en 1981. L'objectif était de réduire l'amplitude des harmoniques injectés par l'onduleur dans la charge pour des applications de type alimentation des moteurs. Cette structure, connue sous le nom de convertisseur clampé par le neutre, n'utilise pas de transformateur d'isolement et la répartition de la tension d'entrée continue sur les différents interrupteurs en série est assurée par les diodes (clamps) connectée à des points milieu capacitifs.

##### **Avantage :**

Cette topologie présente plusieurs avantages dont quelques-uns sont énumérés ci-dessous :

- ✓ Les composants de puissance à semi-conducteur bloquent une tension inverse égale seulement à la moitié de la tension de la source continue.
- ✓ Cette topologie peut être généralisée et les principes employés dans la topologie d'onduleur à trois niveaux peuvent être étendus pour l'utilisation dans des topologies avec n'importe quel nombre de niveaux
- ✓ Toutes les phases partagent le même bus continu.
- ✓ La fréquence fondamentale assure un haut rendement.
- ✓ La méthode de contrôle est relativement simple.
- ✓ La forme d'onde de trois niveaux résulte dans une meilleure qualité spectrale par rapport à celle d'un onduleur triphasé classique, ce qui rend les filtres passifs peu volumineux.

#### **Inconvénients :**

Cependant, cette topologie présente plusieurs difficultés techniques dans les cas de grande puissance tel que :

- ✓ Pour les topologies avec plus de trois niveaux, les diodes de bouclage peuvent augmenter les contraintes en tension jusqu'à une valeur égale à  $E(N-1)/N$ . Donc, les connexions des diodes en série pourraient être exigées et cela complique la conception et soulève des questions de fiabilité et du coût de réalisation.
- ✓ Cette topologie exige des diodes de bouclage à vitesse de commutation élevée qui doivent être capable de supporter le courant de la pleine charge.
- ✓ Différents calibres pour les appareils de commutation sont nécessaires en raison de leur conduction cyclique

### **II- 3 - 4 - 2 Onduleurs multi-niveaux à condensateurs flottants :**

Dans la topologie multi-niveau proposée par T. Meynard et H. Foch 1992. La structure de ce convertisseur est similaire à celle de l'onduleur à diode de bouclage mais au lieu d'utiliser des diodes de blocage, l'onduleur utilise des condensateurs à leur place. D'où l'appellation « Onduleur à Condensateurs Flottants ». Cette structure est proposée pour résoudre d'une part le problème de balancement de tension, et d'autre part le nombre excessif des diodes.

#### **Avantage :**

Ce type de convertisseur présente plusieurs avantages :

- ✓ Le concept de condensateur Flottant peut-être appliquée à un certain nombre de convertisseurs de différents types, DC /AC ou AC/ DC.
- ✓ La plupart des stratégies de modulation sont facilement appliquée à cette topologie
- ✓ Les tensions sur les condensateurs sont automatiquement équilibrées par cette stratégie de modulation conventionnelle. Si désiré, les tensions de condensateur peuvent être activement contrôlées par une modification appropriée des signaux de commande.
- ✓ Le concept peut être facilement appliqué à d'autres types de convertisseurs, aussi bien pour un transfert unidirectionnel de la puissance que bidirectionnel.
- ✓ Sa modularité permet une extension et une adaptation aisées des stratégies de commande à un nombre élevé de niveaux.
- ✓ Les condensateurs n'étant jamais mis en série entre niveaux différents, le problème du déséquilibre de leur tension n'existe plus.

#### **Inconvénients :**

Cette topologie présente quelque inconvénient, tel que :

- ✓ La topologie exige beaucoup de condensateurs à haute tension beaucoup plus nombreux que d'autres topologies. Ces condensateurs doivent conduire le courant de pleine charge pendant au moins une partie du cycle de commutation. Heureusement si la fréquence de commutation est élevée, ces condensateurs peuvent généralement être relativement faibles en valeur de la capacité.
- ✓ La topologie n'en est pas intrinsèquement tolérante aux pannes.
- ✓ Contrairement au premier cas qui ne nécessite que (N-1) capacité. De plus il est évident que des courants de grandes valeurs efficaces circuleront à travers ces condensateurs
- ✓ Il y a un potentiel de résonance parasite entre les condensateurs découplés.

### **II- 3 - 4 -3 Onduleurs multi-niveaux à structure cascadié :**

Cette famille est la première décrite dans la littérature comme une structure de conversion multi-niveaux. En effet la mise en cascade de plusieurs structures à trois niveaux permet d'avoir en sortie une forme d'onde de tension multi-niveaux.

Les cellules  $\gamma$  sont connectées en étoile, cependant il est également possible de les connecter en triangle. Chaque cellule de l'onduleur est alimentée par une source continue E et elle est composée de quatre interrupteurs qui sont unidirectionnels en tension et bidirectionnels en courant : il s'agit d'associations classiques d'un transistor et d'une diode en antiparallèle. Les sources doivent être galvaniquement isolées les unes des autres, afin d'éviter un court-circuit lors de leur mise en série.

#### **Avantage :**

L'onduleur multi-niveaux en cascade est une structure de convertisseurs d'énergie, il présente l'idée d'employer des sources séparées à courant continu pour produire une forme d'onde d'une tension alternative

- ✓ Pour atteindre le même nombre de niveaux de tension, ce type de convertisseur nécessite moins de composants.
- ✓ Contrairement à l'onduleur à diode de bouclage et à condensateur flottant, aucune diode supplémentaire n'est nécessaire.
- ✓ La tension de sortie totale de phase est une sommation des tensions produites par chaque onduleur monophasé.
- ✓ Les petites sources à courant continu sont généralement impliquées, ce qui entraîne moins de problèmes de sécurité.
- ✓ Le nombre de niveaux possibles de tension de sortie est plus du double du nombre de sources à courant continu ( $N=2s+1$ )

#### **Inconvénients :**

- ✓ Pour un système à trois phases, il faudra plus de commutateurs que dans un onduleur traditionnel
- ✓ Nécessité d'équilibrer les sources DC entre les différents niveaux.
- ✓ Besoin de plusieurs connecteurs/câbles pour connecter les sources DC

#### **➤ Autres topologies :**

Outre les trois topologies de base discutées précédemment, d'autres topologies de convertisseurs multi-niveaux ont été proposées, mais la plupart d'entre elles sont à base de circuits "hybrides", combinaisons de deux topologies de base ou de légères variations de celles-ci. Ces topologies sont :

- ✓ Le convertisseur asymétrique hybride.

- ✓ Le convertisseur avec des ponts en cascade et sources CC/CC avec isolement.
- ✓ Le convertisseur avec commutation douce.
- ✓ Les convertisseurs reliés par transformateur.
- ✓ Le convertisseur Diode/Capacitor-Clamped : variante de l'onduleur NPC.
- ✓ Le convertisseur multi-niveau généralisé.

## II- 4 Fonctionnement des onduleurs deux niveaux et multi-niveaux :

### II- 4 - 1 Onduleur monophasé deux niveaux en pont complet :

Dans un premier temps nous allons étudier la forme de la tension et du courant aux bornes de la charge si les interrupteurs sont commandés périodiquement par paire.

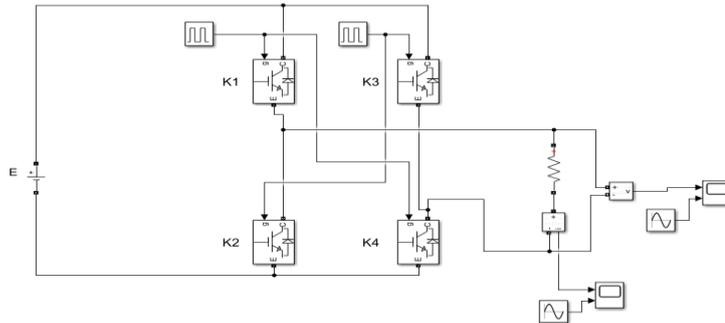


Figure ( II . 7): Structure d'un onduleur monophasé à deux niveaux en pont complet

#### II- 4 - 1- 1 Principe de fonctionnement :

Pour un convertisseur à deux niveaux de tensions. Nous avons deux séquences de fonctionnement possible permettant de générer les deux niveaux de tensions :

##### ➤ Séquence 1 : Génération de niveau maximum :

Dans ce cas, les interrupteurs K1, K4 sont passants et K2, K3, sont bloqués donc la tension de sortie est égale a +E

##### ➤ Séquence 2 : Génération de niveau minimum :

Dans ce cas, les interrupteurs K2, K3 sont passants et K1, K4 sont bloqués donc la tension de sortie est égale a - E

Le tableau ci-dessous résume les états de commutation des interrupteurs lors des deux Séquences de fonctionnement :

K1	k2	k3	k4	La tension de la sortie
1	0	0	1	+E
0	1	1	0	-E

Tableau ( II .1) : les états d'interrupteurs d'onduleur a 2 niveaux.

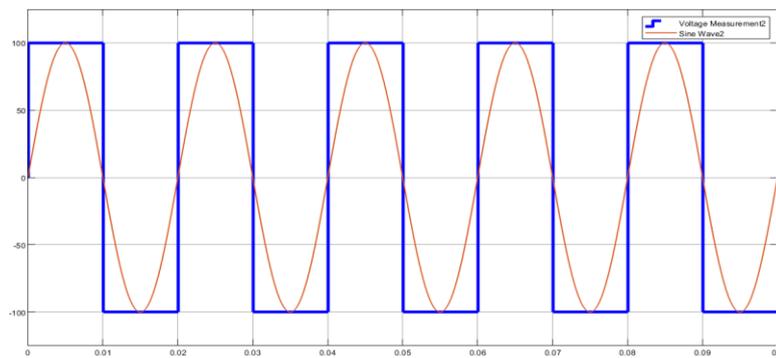


Figure ( II . 8): La Formes d'ondes de voltage pour un onduleur monophasé a deux niveaux

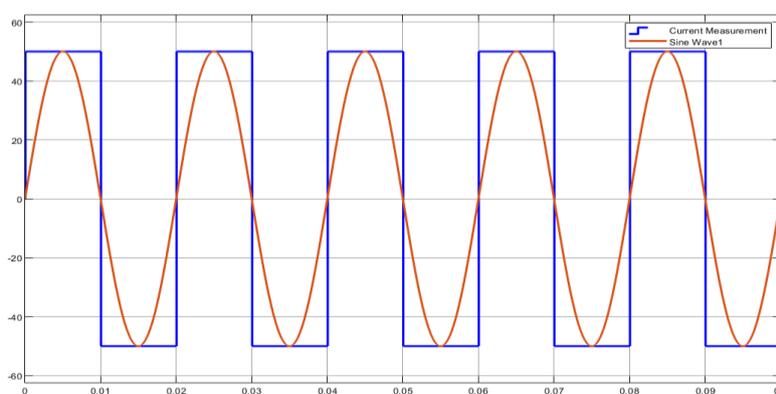


Figure ( II . 9): La Formes d'ondes de Courant pour un onduleur monophasé a deux niveaux avec  $R = 2$

**Remarque:**

Le courant est égal à 50 A cause de la résistance qui est égale à  $R = 2$

D'après la loi d'ohm :

$$V = RI$$

Avec:

$$V=100v$$

$$R= 2 \Omega$$

Donc pour calculer le courant on doit diviser la tension sur la résistance

$$I = V/R$$

$$I = 100/2 = 50A$$



### ➤ Séquences 3 :

Dans ce cas, les interrupteurs K2, K3 sont passants et K1, K4 sont bloqués ce qui donne la tension égale a -E

K1	k2	k3	k4	La tension de sortie
1	0	0	1	+E
0	1	0	1	0
1	0	1	0	0
0	1	1	0	-E

Tableau ( II .2) : les états d'interrupteurs d'onduleur a 3 niveaux de type cascade.

### II- 4-2-1-3 Résultats de la simulation:

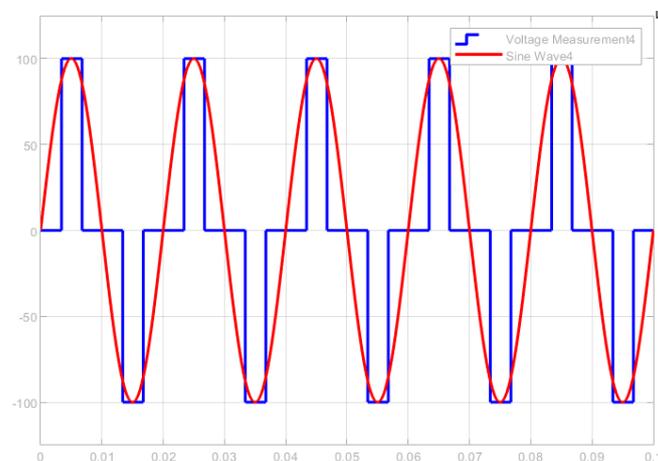


Figure ( II . 11): La Formes d'ondes de voltage pour un onduleur monophasé a Trois niveaux en cascade H

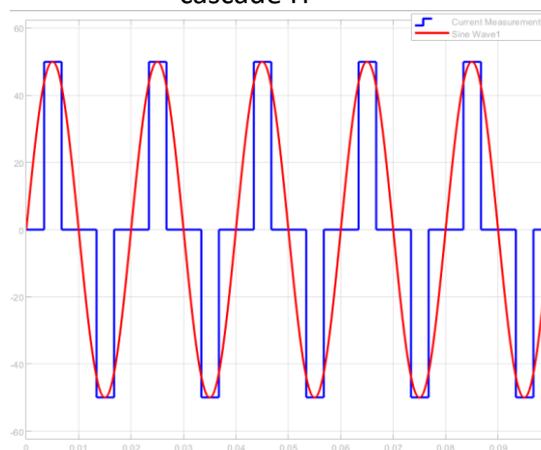


Figure ( II . 12): La Formes d'ondes de courant pour un onduleur monophasé a Trois niveaux en cascade H

## II- 4-2-2 Onduleur Monophasé 5 Niveaux En Cascade H:

### II- 4-2-2-1 Schéma:

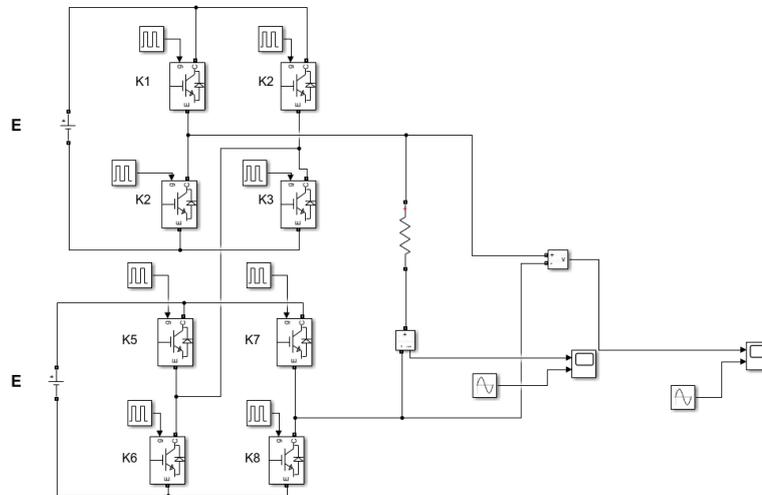


Figure ( II . 13): Structure d'un onduleur monophasé à

Cinq niveaux en cascade H

Avec

$$E = 100 \text{ V}$$

$$\text{Et } R = 2 \Omega$$

### II- 4-2-2-2 Principe de fonctionnement:

La structure d'un bras d'onduleur cinq niveaux de type cascade en pont H est l'association en cascade de deux onduleurs classiques monophasés en pont complet. De telle sorte que la tension à la sortie de l'onduleur obtenue est la somme des tensions de sortie des deux onduleurs classiques.

Pour générer les cinq niveaux ce onduleur passe par cinq séquence :

#### ➤ Séquences 1 :

K1, K4, K5 et K8 sont passants et K2, K3, K6 et K7 sont bloqués. Alors s le premier pont monophasé (celui du haut) donne une tension de sortie E et second pont monophasé (celui du bas) donne également E comme tension de sortie. Ce qui donne 2E

#### ➤ Séquences 2 :

K1, K4, K6 et K8 sont passants et K2, K3, K5et K7 sont bloqués, ce que veut dire le premier pont donne une tension de Sortie égale a E mais le deuxième pont donne une tension de sortie égale à 0. Donc la tension de sortie total d'onduleur dans cette séquence est égale a E

➤ **Séquences 3 :**

K2, K4, K6 et K8 sont passants et K1, K3, K5 et K7 sont bloqués, On a alors 0 comme tension de sortie dans les deux ponts monophasés montés en cascade. Et la tension de sortie du pont en H obtenue est égale à 0

➤ **Séquences 4 :**

K2, K3, K6 et K8 sont passants et K1, K4, K5 et K7. Dans ce cas la tension est égale a -E

➤ **Séquences 5 :**

K2, K3, K6 et K7 sont passants et K1, K4, K5 et K8 sont bloqués, dans ce cas la tension est égale a - 2E

Les cinq états ou séquences de commutation possibles sont résumés au tableau suivant :

K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	La tension de sortie
1	0	0	1	1	0	0	1	2E
1	0	0	1	0	1	0	1	E
0	1	0	1	0	1	0	1	0
0	1	1	0	0	1	0	1	-E
0	1	1	0	0	1	1	0	-2E

Tableau ( II .3) : les états d'interrupteurs d'onduleur a 5 niveaux de type cascade.

**II- 4-2-2-3 Résultat de simulation:**

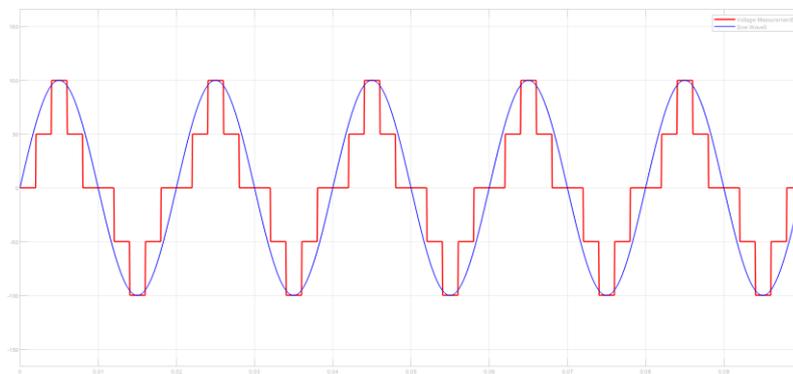


Figure ( II . 14): La Formes d'ondes de voltage pour un onduleur monophasé a Cinq niveaux en cascade H

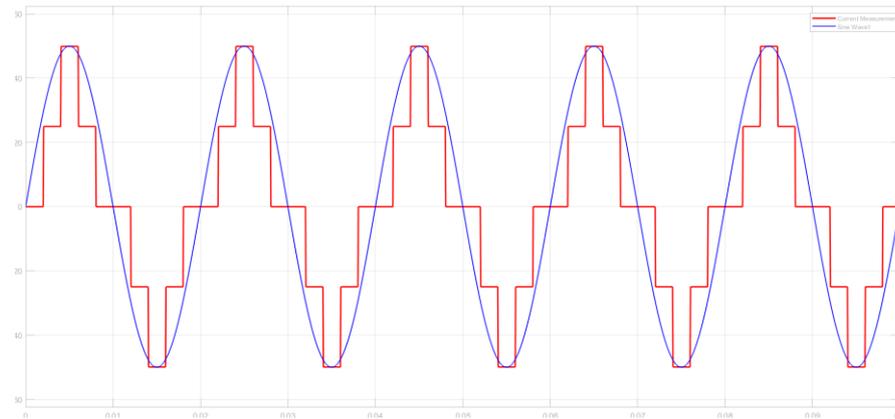


Figure ( II . 65): La Formes d'ondes de courant pour un onduleur monophasé a Cinq niveaux en cascade H

### II- 4-2-3 Onduleur Monophasé 7 Niveaux En Cascade H:

#### II- 4-2-3-1 Schéma:

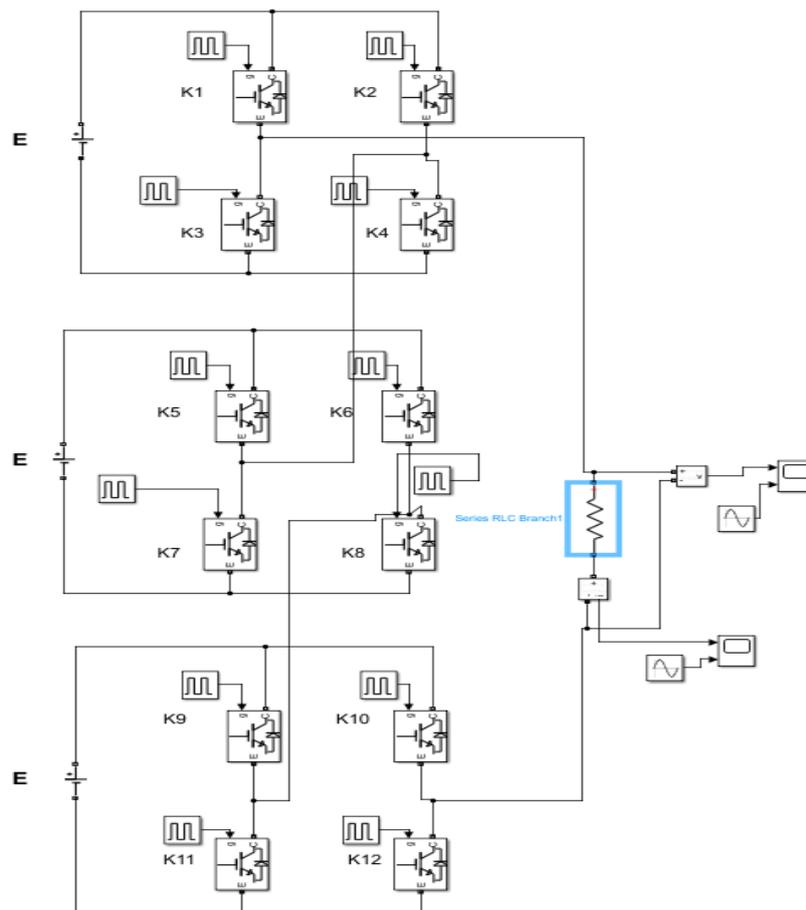


Figure ( II .16): Structure d'un onduleur monophasé à Sept niveaux en cascade H

Avec  $E = 100$  et  $R = 2$

### ***II- 4-2-3-2 Principe de fonctionnement:***

La structure d'un bras d'onduleur Sept niveaux de type cascade en pont H est l'association en cascade de Trois onduleurs classiques monophasés en pont complet. De telle sorte que la tension à la sortie de l'onduleur obtenue est la somme des tensions de sortie des Trois onduleurs classiques.

Pour générer les Sept niveaux de tension ce onduleur passe par Sept séquence :

➤ ***Séquences 1 :***

K1 k4 k5 k8 k9 k12 sont passante et les reste bloqué; ce qui donne une tension de sortie égale à  $3E$

➤ ***Séquences 2 :***

K1 k4 k7 k8 k9 k12 sont passante et les reste bloque ce qui donne une tension de sortie égale à  $2E$

➤ ***Séquences 3 :***

K1 k4 k7 k8 k11 k12 sont passante et les reste bloque ce qui donne une tension égale à  $E$

➤ ***Séquences 4 :***

K1 k3 k5 k7 k9 k11 sont passante alors que les reste bloque ce qui donne une tension égale à  $0$

➤ ***Séquences 5 :***

K2 k3 k5 k6 k9 k10 sont passante et les reste bloque ce qui donne une tension égale a  $-E$

➤ ***Séquences 6 :***

K2 k3 k6 k7 k9 k10 sont passante et les reste bloque ce qui donne une tension de  $-2E$

➤ ***Séquences 7 :***

K2 k3 k6 k7 k10 k11 sont passante et les reste bloque ce qui donne une tension de sortie  $-3E$

K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12	Tension de sortie
1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	3E
1	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	2E
1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1	E
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0
0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	-E
0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	-2E
0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	-3E

Tableau ( II .4) : les états d'interrupteurs d'onduleur a 7 niveaux de type cascade.

**II- 4-2-3-3 résultat de simulation:**

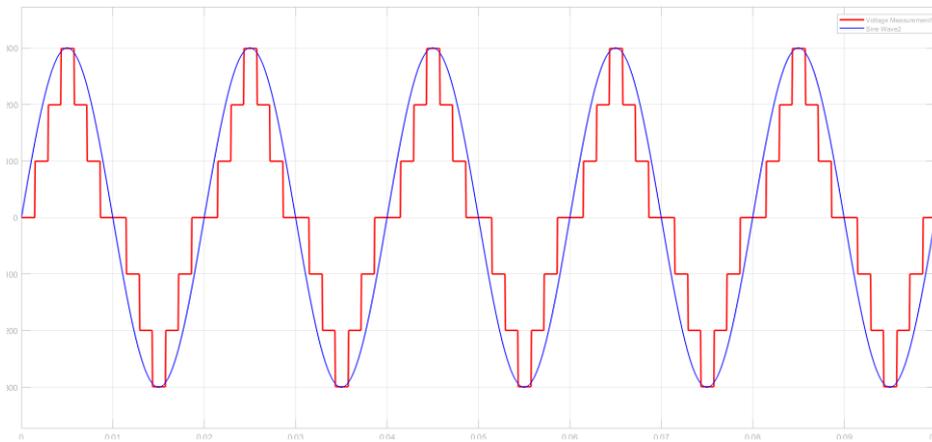


Figure ( II .17): La Formes d'ondes de voltage pour un onduleur monophasé a Sept niveaux en cascade H

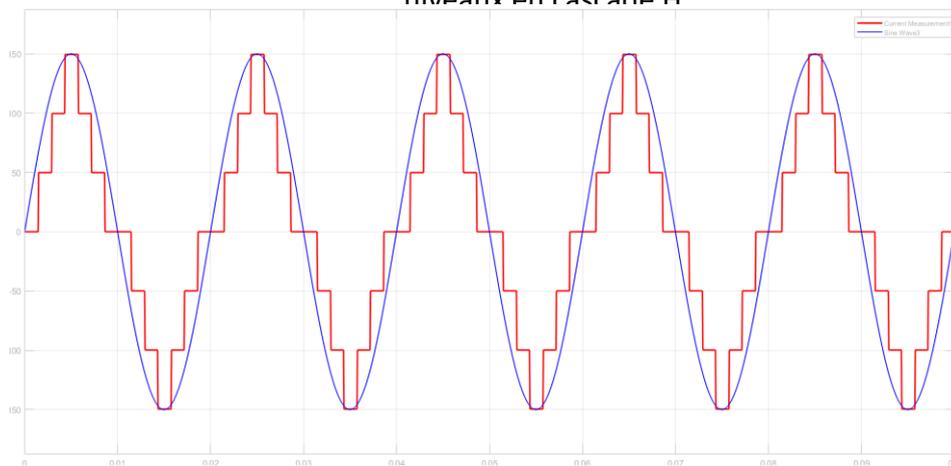


Figure ( II .18): La Formes d'ondes de courant pour un onduleur monophasé a sept niveaux en cascadié H

## II- 4-3 Onduleur condensateur flottant (FC) :

### II- 4-3-1 Onduleur condensateur flottant (FC) 5 Niveaux:

#### II- 4-3-1-1 Schéma:

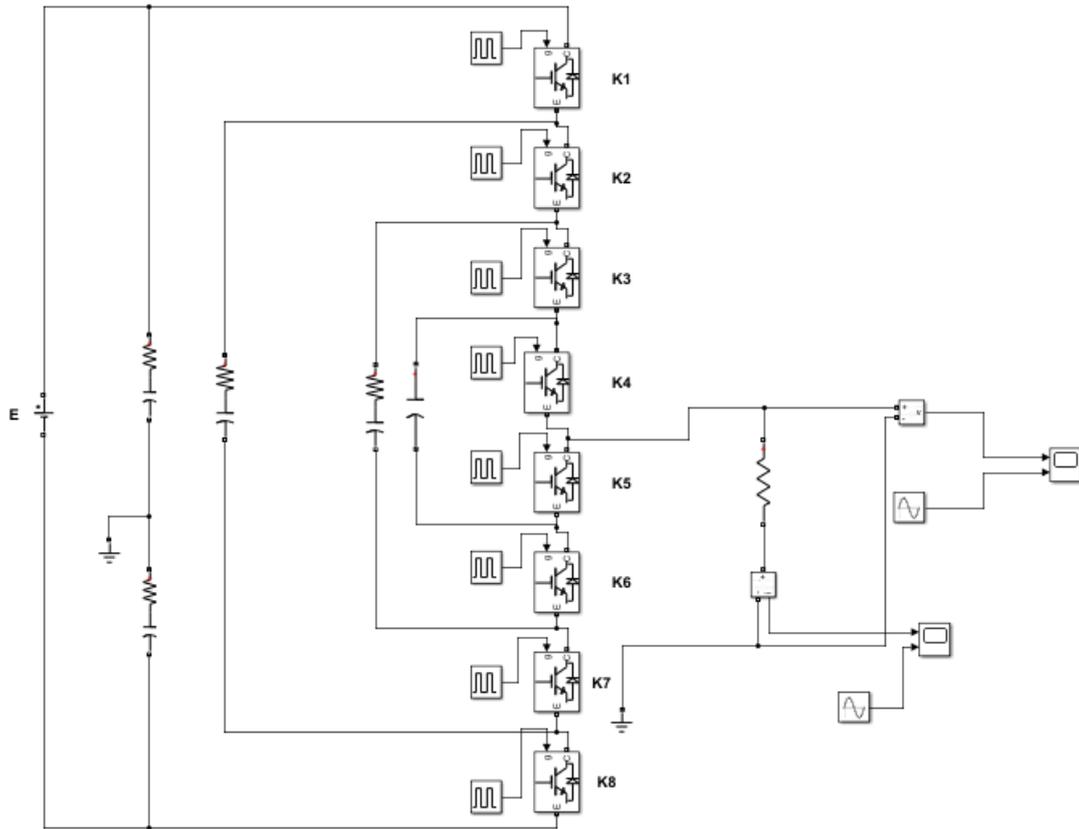


Figure ( II .19): Structure d'un onduleur monophasé à Cinq niveaux en condensateur flottants

Avec  $E = 200 \text{ V}$ ,  $R = 2\Omega$

#### II- 4-3-1-2 Principe de Fonctionnement:

Le concept principal de cet onduleur est d'utiliser des condensateurs connectés en série Les condensateurs transfèrent une quantité limitée de tension à appareils électriques.

Pour faire les 5 niveaux cet onduleur passe par cinq séquence :

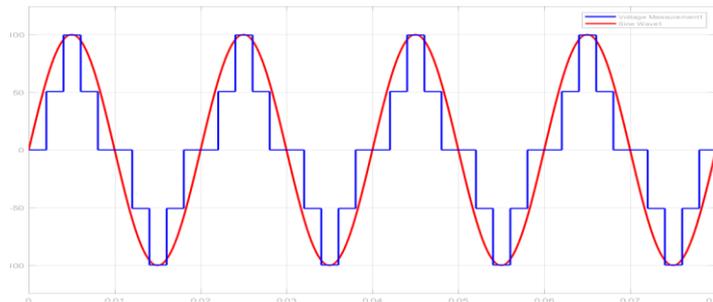
- **Séquence 1** : K1, K2, K3 et K4 sont passants et K5, K6, K7 et K8 sont bloqués ce qui donne la tension de sortie  $E/2$
- **Séquence 2** : K2, K3, K4 et K5 sont passants et K6, K7, K8 et K1 sont bloqués, ce qui donne la tension de sortie vaut  $E/4$

- **Séquence 3** : K3, K4, K5 et K6 sont passants et K7, K8, K1 et K2 sont bloqués, la tension de sortie vaut 0
- **Séquence 4** : K4, K5, K6 et K7 sont passants et K8, K1, K2 et K3 sont bloqués la tension de sortie vaut :  $-E/4$
- **Séquence 5** : K5, K6, K7 et K8 sont passants et K1, K2, K3 et K4 sont bloqués la tension de sortie vaut :  $-E/2$

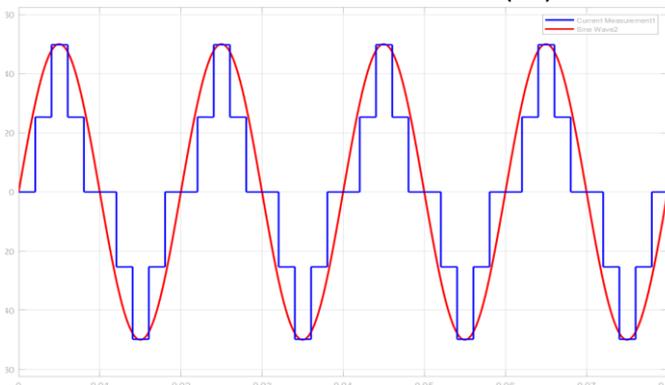
k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8	La tension de sortie
1	1	1	1	0	0	0	0	$E/2$
0	1	1	1	1	0	0	0	$E/4$
0	0	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	1	1	1	1	0	$-E/4$
0	0	0	0	1	1	1	1	$-E/2$

**Tableau ( II .5) :** les états d'interrupteurs d'onduleur a 5 niveaux de type condensateur flottant.

**II- 4-3-1-3 Résultats de simulation:**



**Figure ( II . 20) :** La Formes d'ondes de tension pour un onduleur monophasé a cinq niveaux en condensateur flottant (FC)



**Figure ( II . 21) :** La Formes d'ondes de courant pour un onduleur monophasé a cinq niveaux en condensateur flottant (FC)

## II- 4-3-2 Onduleur condensateur flottant (FC) 3 Niveaux:

### II- 4-3-2-1 Schéma:

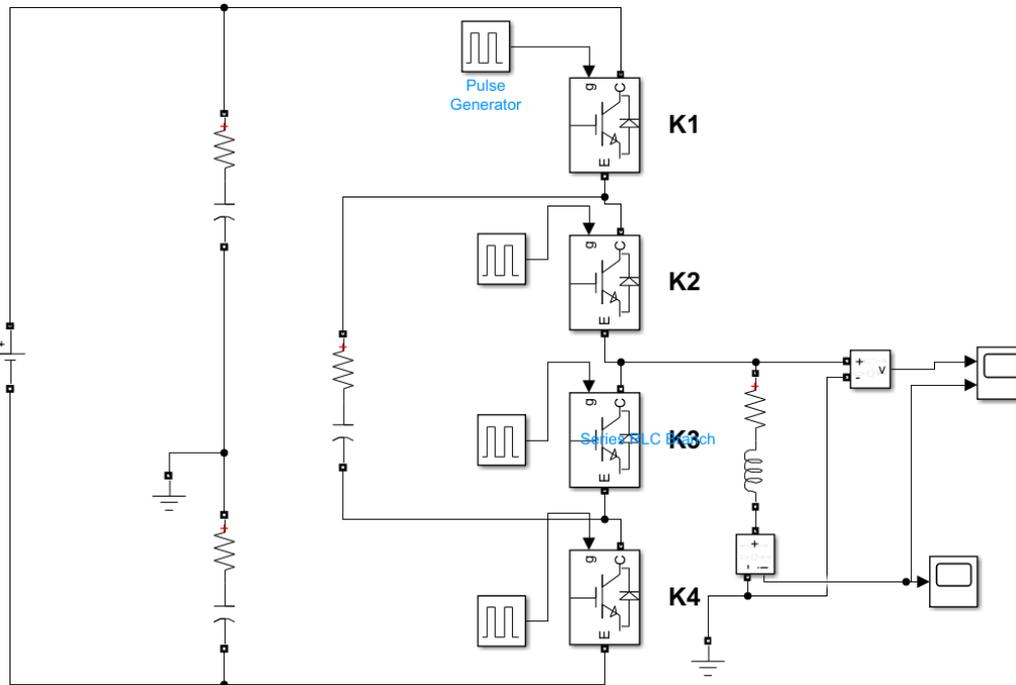


Figure ( II . 22): Structure d'un onduleur monophasé trois niveaux en condensateur flottant

### II- 4-3-2-2 Principe de Fonctionnement:

Pour générer les trois niveaux de tension cet onduleur passe par trois séquence

➤ **Séquence 1:**

Dans cette Séquence K1 et K2 sont passant, et K2 et K3 sont bloqué ce qui donne une tension de  $E/2$

➤ **Séquence 2:**

Dans cette Séquence tous les interrupteurs sont bloqué ce qui donne une tension de 0

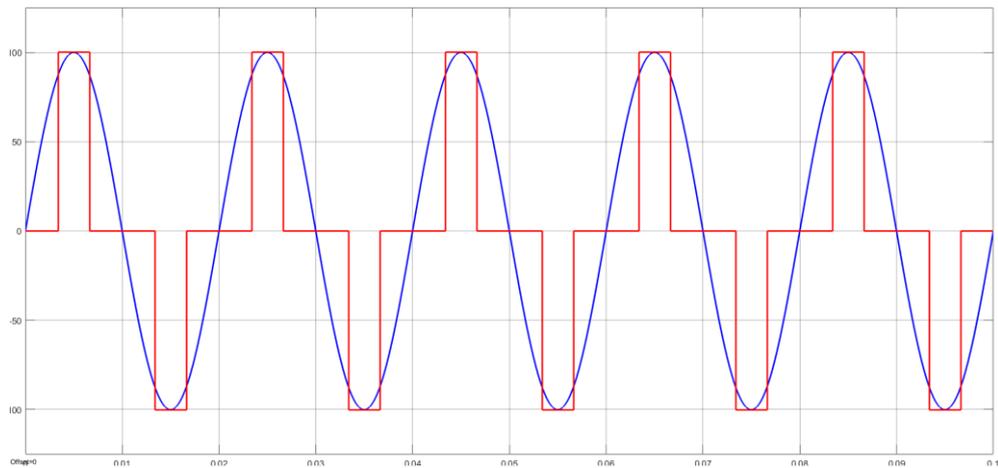
➤ **Séquence 3:** K2 et K3 sont passant alors que K1 et K2 sont bloqué ce qui donne une tension de  $-E/2$

On peut résumer les états d'interrupteur dans ce tableau:

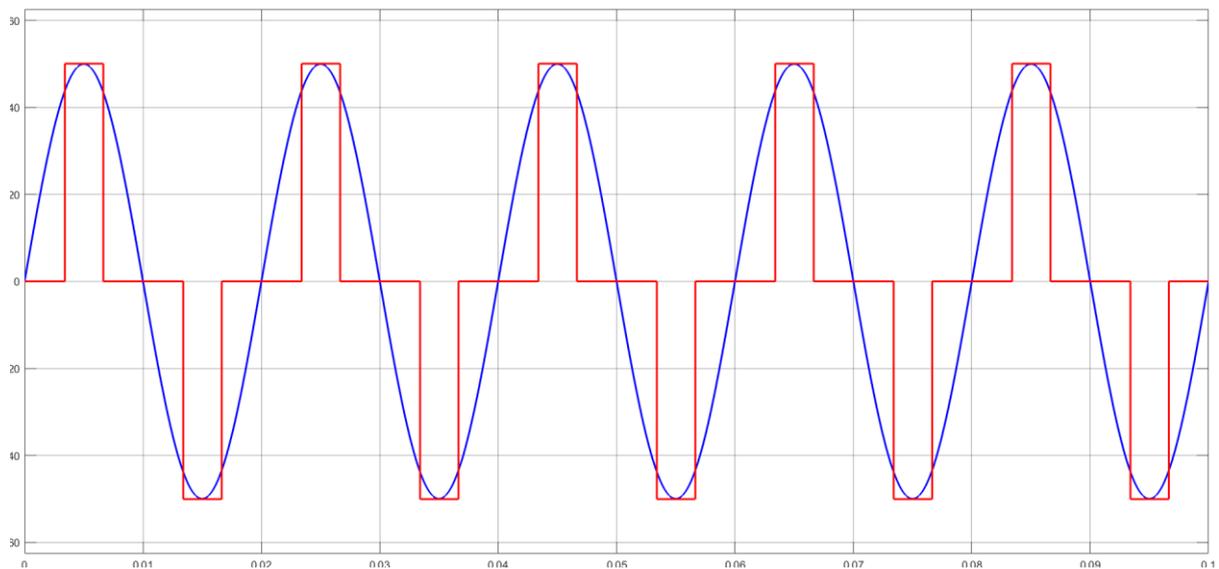
K1	K2	K3	K4	Tension de sortie
1	1	0	0	$+E/2$
0	0	0	0	0
0	0	1	1	$-E/2$

**Tableau ( II .6) :** les états d'interrupteurs d'onduleur a 3 niveaux de type condensateur flottant.

### II- 4-3-2-3 Résultats de simulation



**Figure ( II . 23):** La Formes d'ondes de tension pour un onduleur monophasé a trois niveaux en condensateur flottant (FC)



**Figure ( II . 24):** La Formes d'ondes de courant pour un onduleur monophasé a trois niveaux en condensateur flottant (FC)

### II- 4-3-3 Onduleur condensateur flottant (FC) 7 Niveaux:

#### II- 4-3-3-1 Schéma:

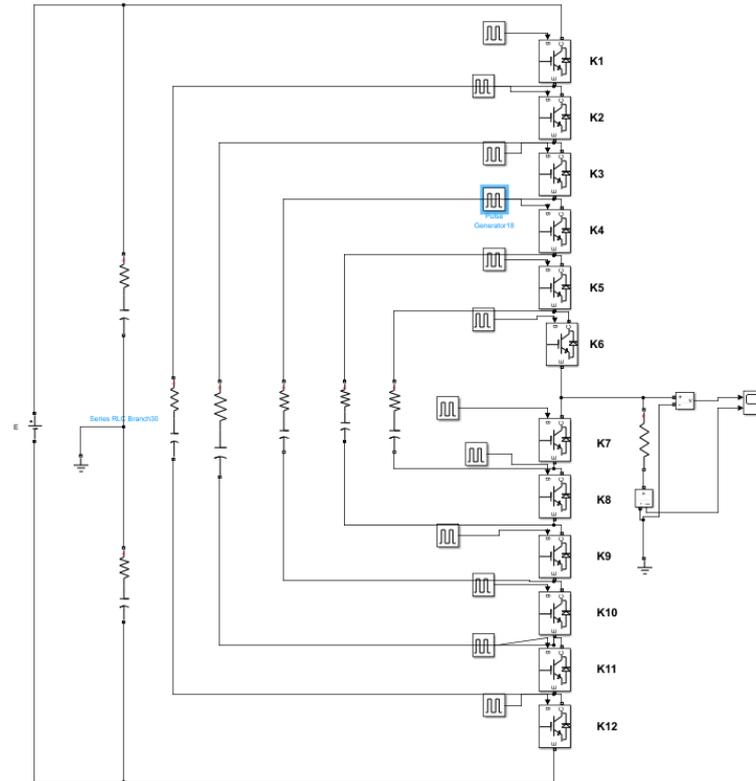


Figure ( II . 25): Structure d'un onduleur monophasé à sept niveaux en condensateur flottant

#### II- 4-3-3-2 Principe de fonctionnement:

Cet onduleur est composé de 12 interrupteurs, et pour faire ces sept niveaux il passe par 7 séquences:

➤ **Séquence 1 :**

K1 K2 K3 K4 K5 K6 sont ouverts alors que les restes sont fermés, ce qui donne une tension de sortie égale à  $E/2$

➤ **Séquence 2 :**

K1 K2 K3 K4 K5 K7 sont passants alors que les restes sont fermés, ce qui donne une tension de sortie égale à  $E/3$

➤ **Séquence 3 :**

K1 K2 K3 K4 K7 K8 sont passants alors que les restes bloquent ce qui donne une tension de sortie égale à  $E/6$

➤ **Séquence 4 :**

K1 K2 K3 K7 K8 K9 sont passant alors que les reste sont bloqué ce qui donne une tension égale à 0

➤ **Séquence 5 :**

K1 K2 K7 K8 K9 k10 sont passant et les resté bloque ce qui donne une tension de sortie égale à  $-E/6$

➤ **Séquence 6 :**

K1 k7 k8 k9 k10 k11 sont passant les restes bloque ce qui donne une tension de  $-E/3$

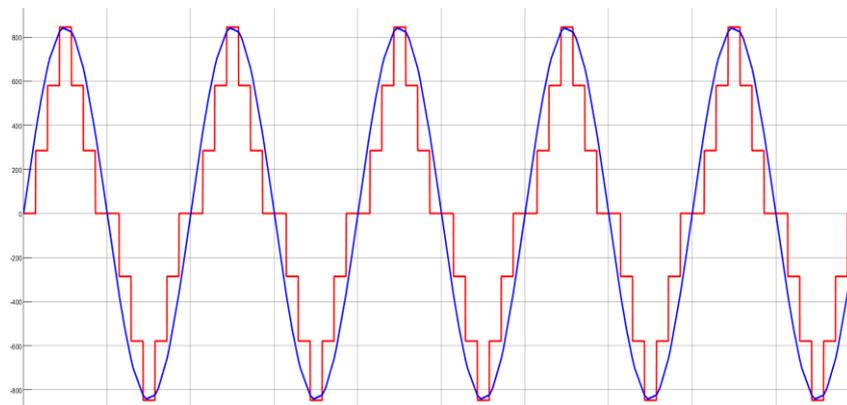
➤ **Séquence 7 :**

K1 k2 k3 k4 k5 k6 sont bloqué alors que les resté sont passant, ce qui donne une tension de sortie égale à  $-E/2$

K1	K2	k3	k4	k5	k6	k7	k8	k9	k10	k11	k12	Tension de sortie
1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	$E/2$
1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	$E/3$
1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	$E/6$
1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	$-E/6$
1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	$-E/3$
0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	$-E/2$

**Tableau ( II .7) :** les états d'interrupteurs d'onduleur a 7 niveaux de type condensateur flottant.

**II- 4-3-3-3 Résultats de simulation:**



**Figure ( II . 26):** La Formes d'ondes de courant pour un onduleur monophasé a Sept niveaux en condensateur flottant (FC)

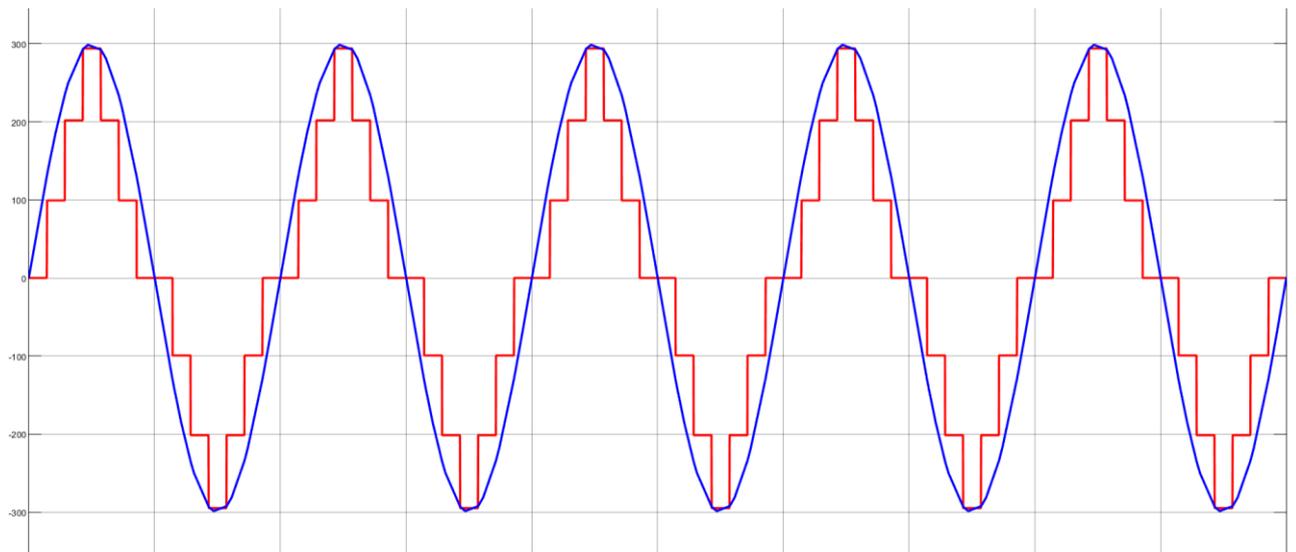


Figure ( II . 27): La Formes d'ondes de Tension pour un onduleur monophasé a Sept niveaux en condensateur flottant (FC)

**II- 4-4 Onduleur diode flottante (NPC, Neutral point clamped):**

**II- 4-4-1 Onduleur diode flottante 3 Niveaux:**

**II- 4-4-1-1 Schéma:**

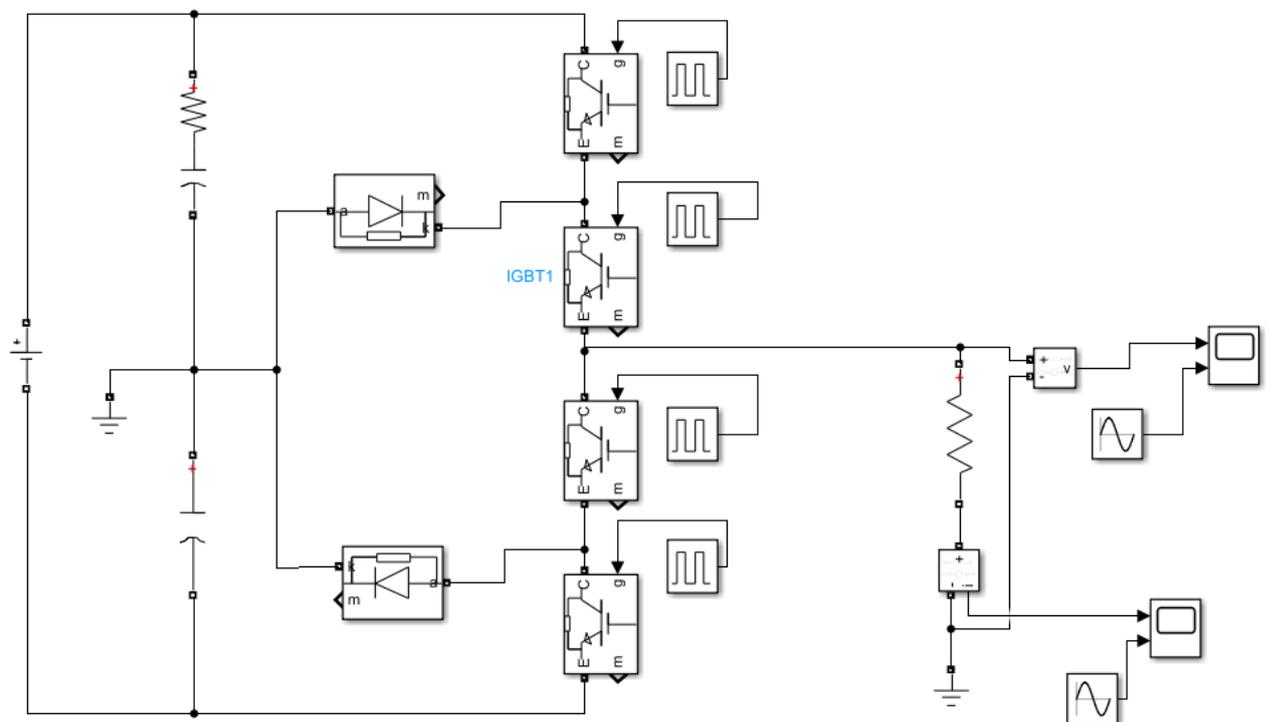


Figure ( II . 28): Structure d'un onduleur monophasé à trois niveaux en diode flottant

### II- 4-4-1-2 Principe de fonctionnement:

#### ➤ Séquences 1

Dans ce cas, les interrupteurs K1, K2 sont passants et K3, K4, ce qui donne la tension de sortie  $+E/2$

#### ➤ Séquences 2

Les interrupteurs K2, K3 sont passants et K1, K4 sont bloqués ce qui nous donne une tension de sortie égale à 0

#### ➤ Séquences 3

Dans ce cas, les interrupteurs K1, K2 sont bloqués et K3, K4 sont passants ce qui nous donne une tension de sortie égale à  $-E/2$

K1	K2	K3	K4	Tension de sortie
1	1	0	0	$+E/2$
0	1	1	0	0
0	0	1	1	$-E/2$

Tableau ( II .8) : les états d'interrupteurs d'onduleur a 3 niveaux de type NPC.

### II- 4-4-1-3 Résultat de simulation:

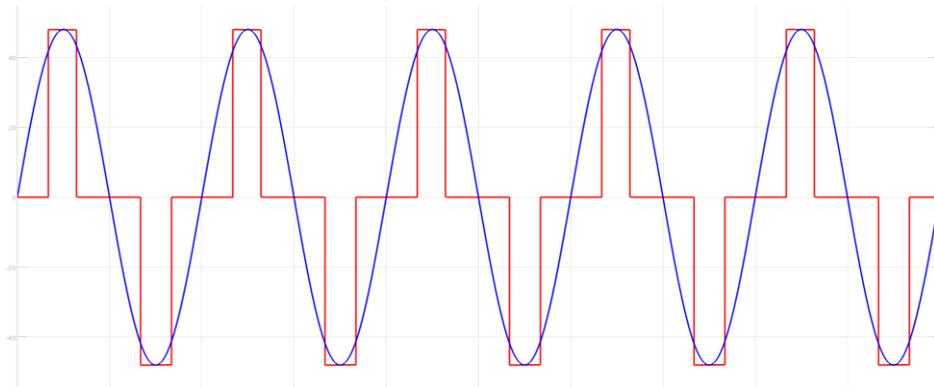


Figure ( II . 29): La Formes d'ondes de tension pour un onduleur monophasé a trois niveaux en diode flottant

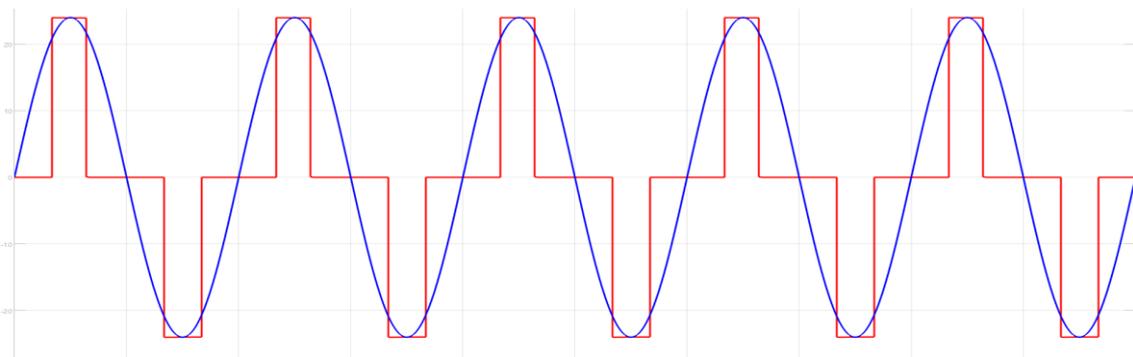


Figure ( II . 30): La Formes d'ondes de courant pour un onduleur monophasé a trois niveaux en diode flottant

### II- 4-4-2Onduleur diode flottante 5 Niveaux:

#### II- 4-4-2-1Schéma:

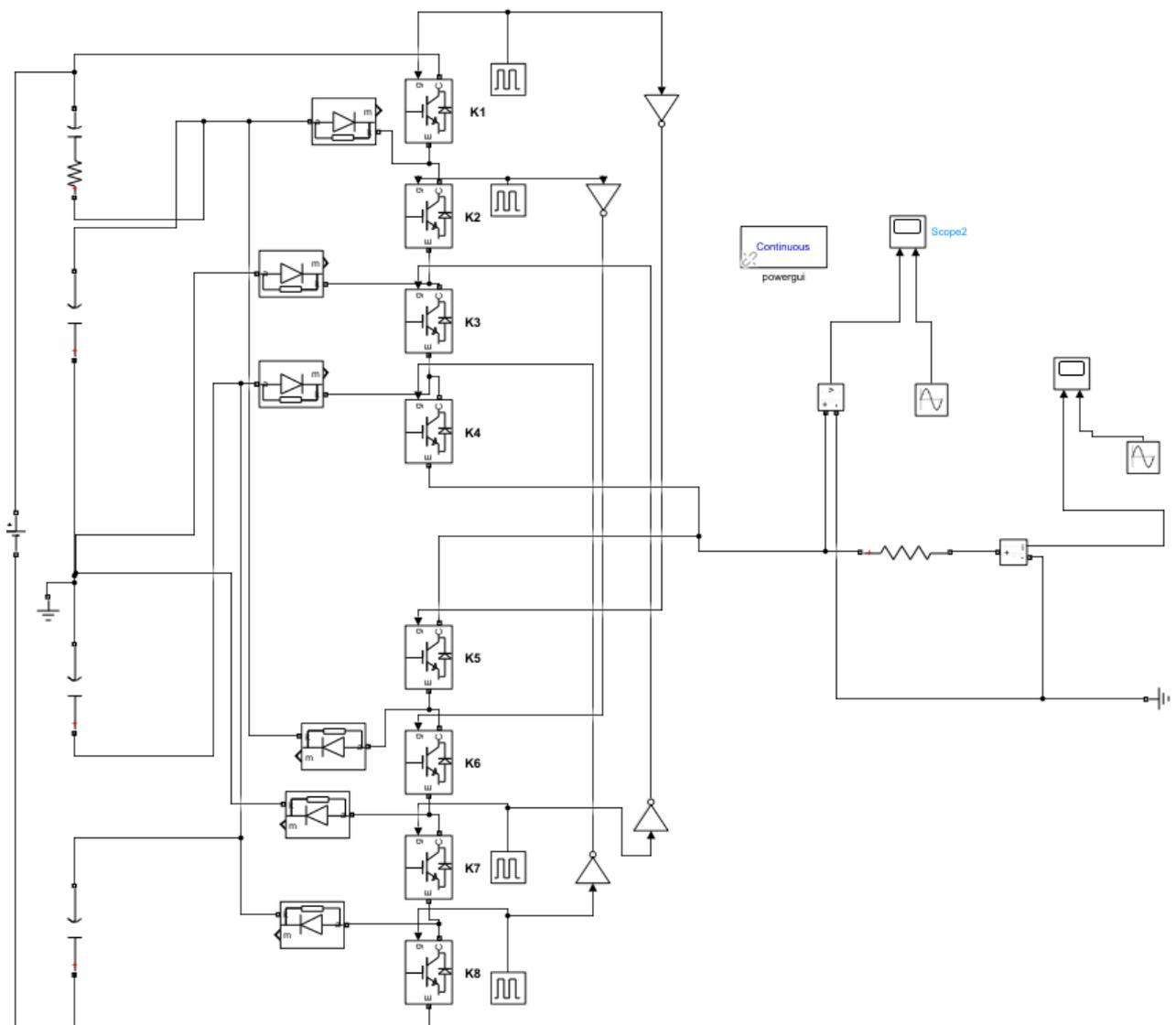


Figure ( II . 31): Structure d'un onduleur monophasé à Cinq niveaux en diode flottant

#### II- 4-4-2-2Principe de Fonctionnement:

##### ➤ Séquences 1:

K1, K2, K3 et K4 sont passants et K5, K6, K7 et K8 sont bloqués, ce qui donne une tension de sorties égale à  $E/2$

➤ **Séquences 2:**

K2, K3, K4 et K5 sont passants et K6, K7, K8 et K1 sont bloqués, ce qui donne une tension de sortie égal à  $E/4$

➤ **Séquences 3**

K3, K4, K5 et K6 sont passants et K7, K8, K1 et K2 sont bloqués, ce qui donne une tension de sortie égal à 0

➤ **Séquences 4**

K4, K5, K6 et K7 sont passants et K8, K1, K2 et K3 sont bloqués, ce qui donne une tension -  $E/4$

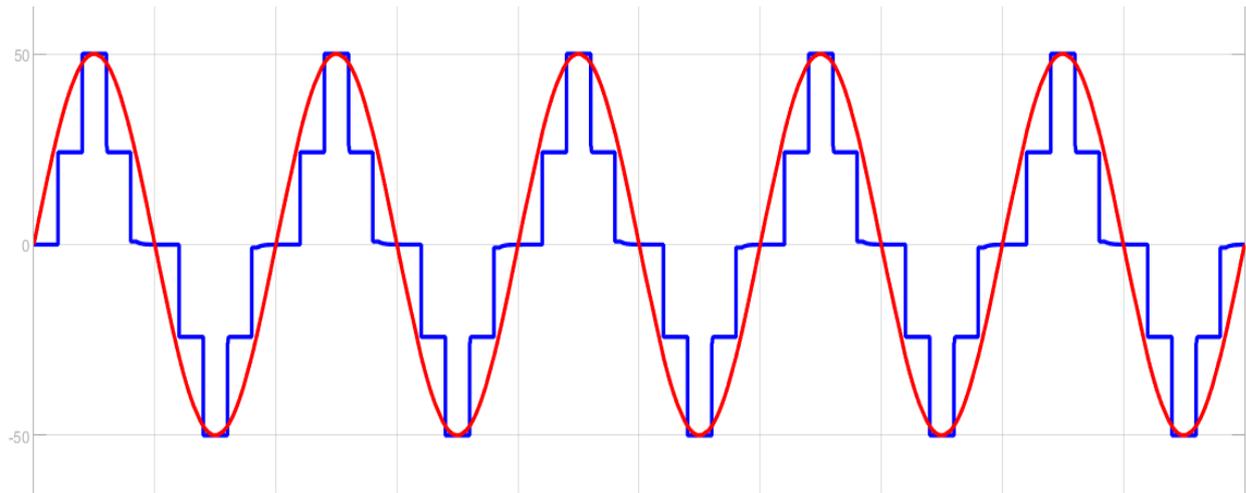
➤ **Séquences 5**

K5, K6, K7 et K8 sont passants et K1, K2, K3 et K4 sont bloqués, ce qui donne une tension de sortie  $-E/2$

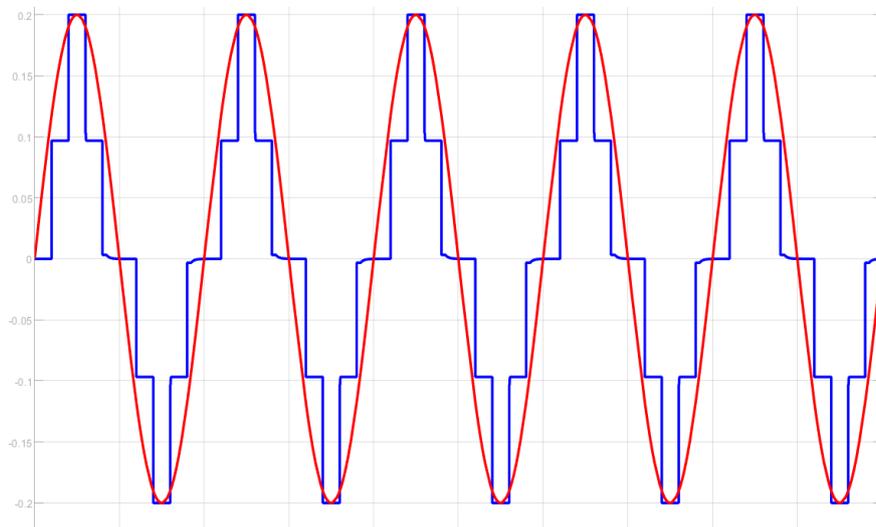
K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	Tension de sortie
1	1	1	1	0	0	0	0	$E/2$
0	1	1	1	1	0	0	0	$E/4$
0	0	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	1	1	1	1	0	$-E/4$
0	0	0	0	1	1	1	1	$-E/2$

Tableau ( II .9) : les états d'interrupteurs d'onduleur a 5 niveaux de type NPC.

**II- 4-4-2-3 Résultat de Simulation :**



**Figure ( II . 32):** La Formes d'ondes de tension pour un onduleur monophasé a cinq niveaux en diode flottant



**Figure ( II . 33):** La Formes d'ondes de courant pour un onduleur monophasé a cinq niveaux en diode flottant

### **II-5 Conclusion:**

Dans ce chapitre, on a présenté les différentes topologies des onduleurs multiniveaux. Avec 3,5 et 7 niveaux.

L'étude de l'onduleur multiniveaux qui présente notre intérêt dans cette étude. Les différentes topologies de base de ce dernier sont données toute en exposant leurs avantages à savoir:

- La topologie NPC permet de réduire le taux de distorsion harmonique, et l'augmentation du niveau des tensions générées;
- La topologie a condensateur flottant aussi permet la réduction du taux de distorsion mais elle constitue un grand nombre de condensateur;
- La topologie en cascade ou le nombre de niveaux possible de tension de sortie et plus du double de nombre de sources à courant continu.

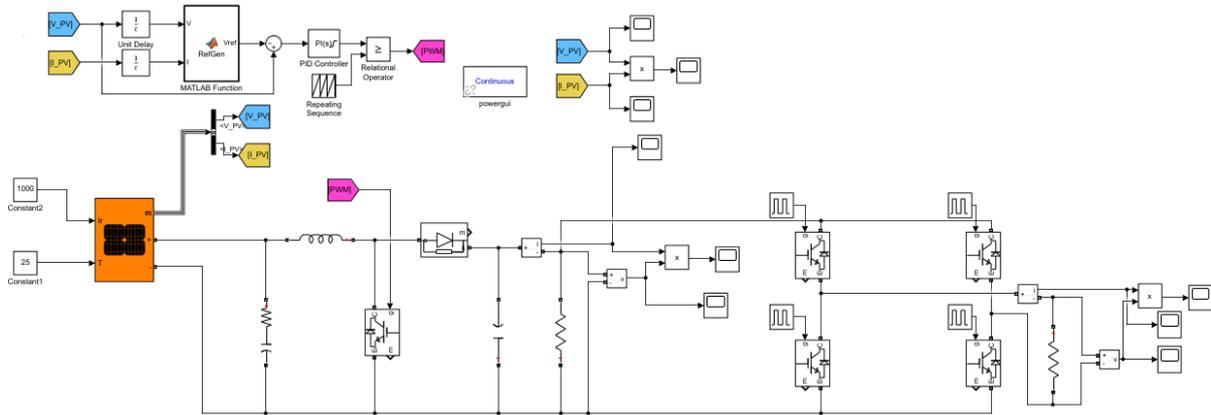
## *Chapitre 03 :*

### *Simulation du système PV-onduleur multiniveaux*

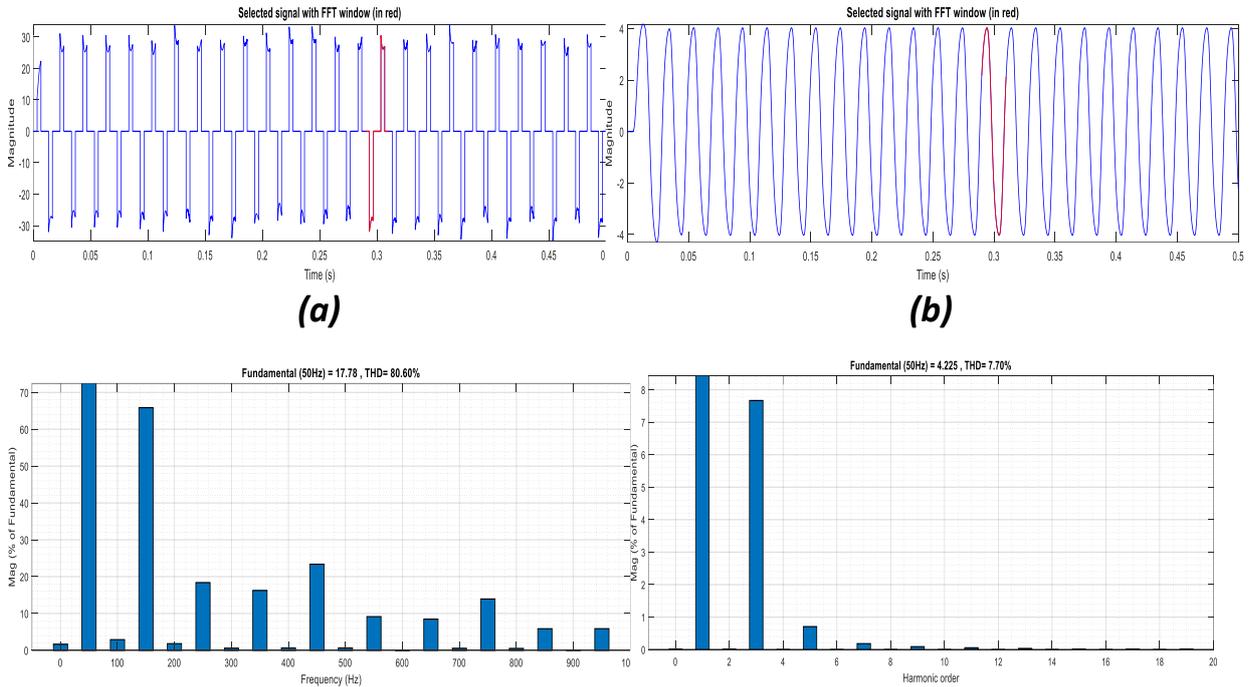
**III-1 Introduction:**

Ce chapitre est consacré à la simulation de l'onduleur multiniveaux intégré dans un système photovoltaïque. Les résultats de simulation sont présentés ainsi que l'analyse spectrale pour sa topologie (cascade H, flying capacitor, neutral point clamped). L'étude par simulation est effectuée sous l'environnement Matlab/Simulink.

**III-2 Simulation et résultats:**



**Figure ( III . 1):** onduleur à trois niveaux de type cascade alimenté par un générateur PV



**Figure ( III . 2): (a)** Forme d'onde de la tension de l'onduleur cascade à trois niveaux avant le filtrage et spectre harmonique

**(b)** Forme d'onde de la tension de l'onduleur cascade à trois niveaux après le filtrage et spectre harmonique

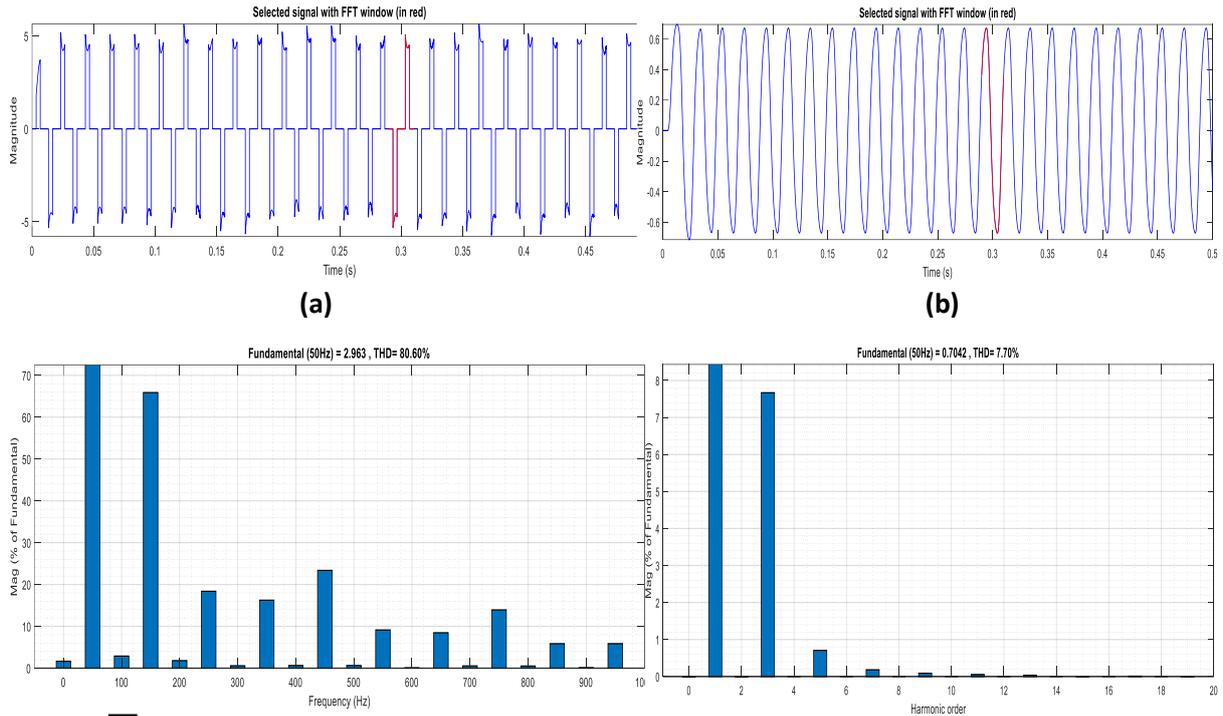


Figure (III. 3): (a) Forme d'onde du courant de l'onduleur cascade à trois niveaux avant le filtrage et spectre harmonique

(b) Forme d'onde du courant de l'onduleur cascade à trois niveaux après le filtrage et spectre harmonique

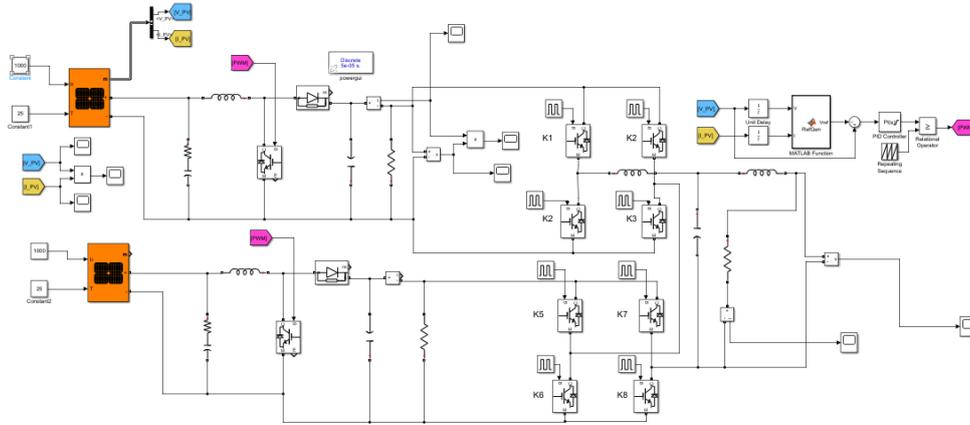
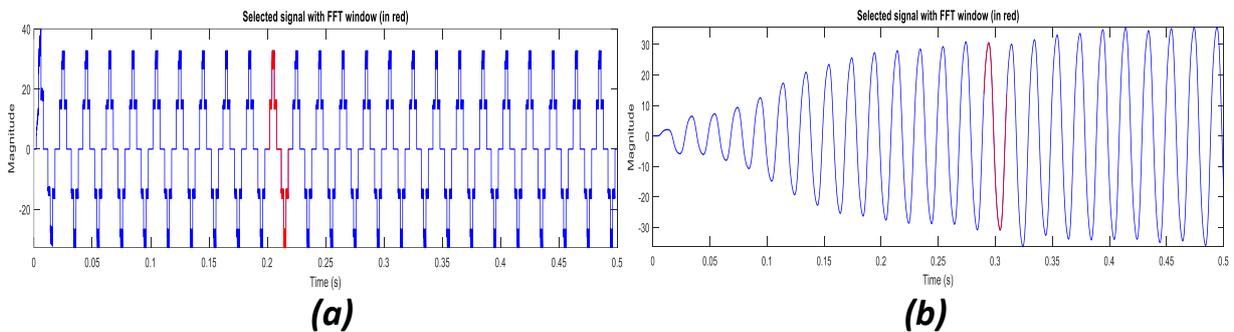
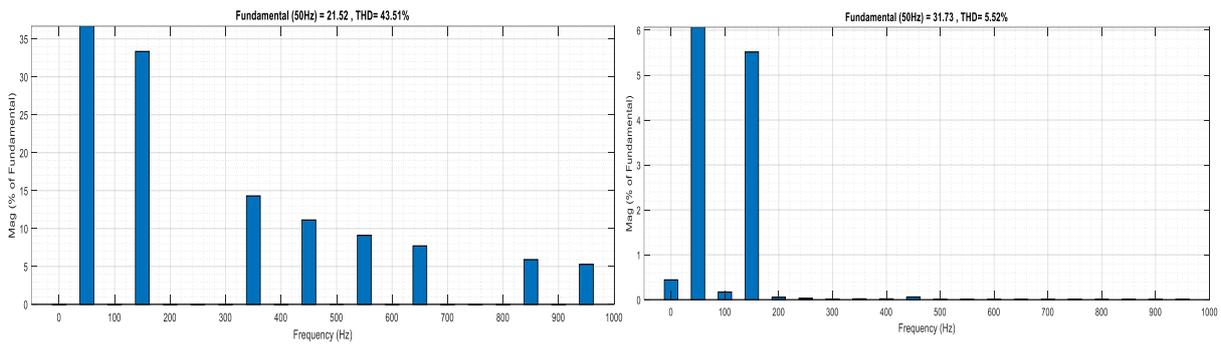


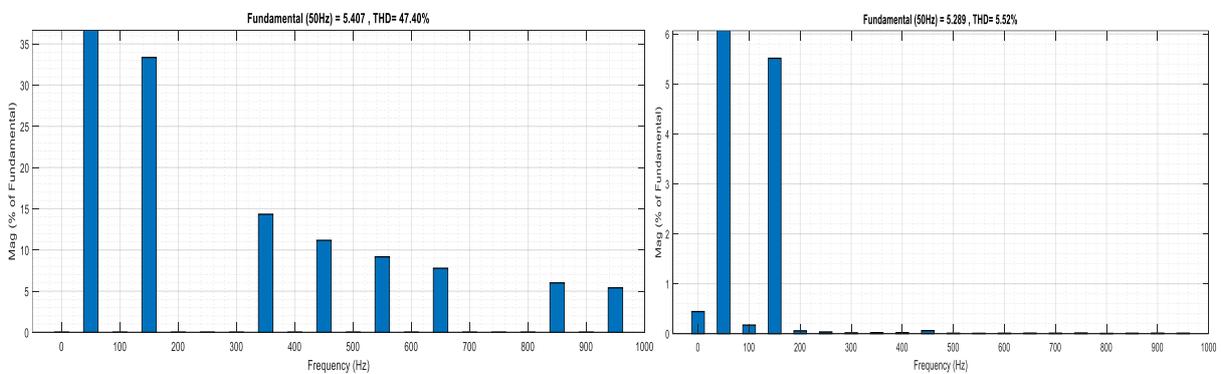
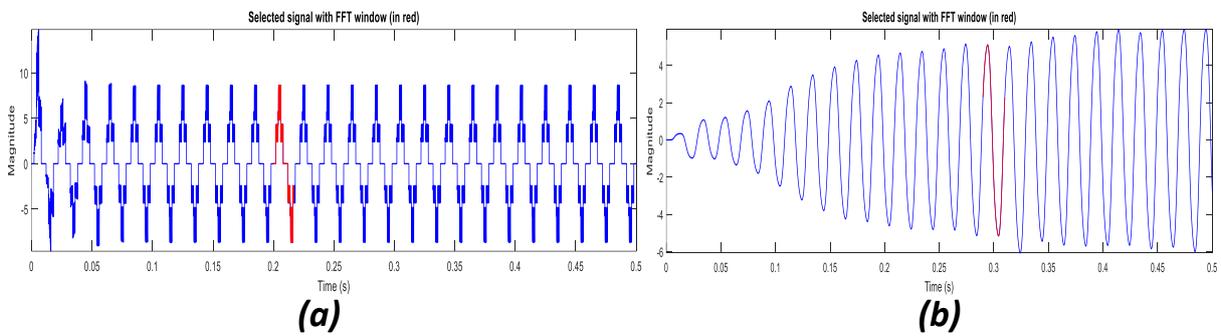
Figure (III. 4): onduleur à cinq niveaux de type cascade alimenté par un générateur PV





**Figure (III.5): (a)** Forme d'onde de la tension de l'onduleur cascade à cinq niveaux avant le filtrage et spectre harmonique

**(b)** Forme d'onde de la tension de l'onduleur cascade à cinq niveaux après le filtrage et spectre harmonique



**Figure (III.6): (a)** Forme d'onde du courant de l'onduleur cascade à cinq niveaux avant le filtrage et spectre harmonique

**(b)** Forme d'onde du courant de l'onduleur cascade à cinq niveaux après le filtrage et spectre harmonique

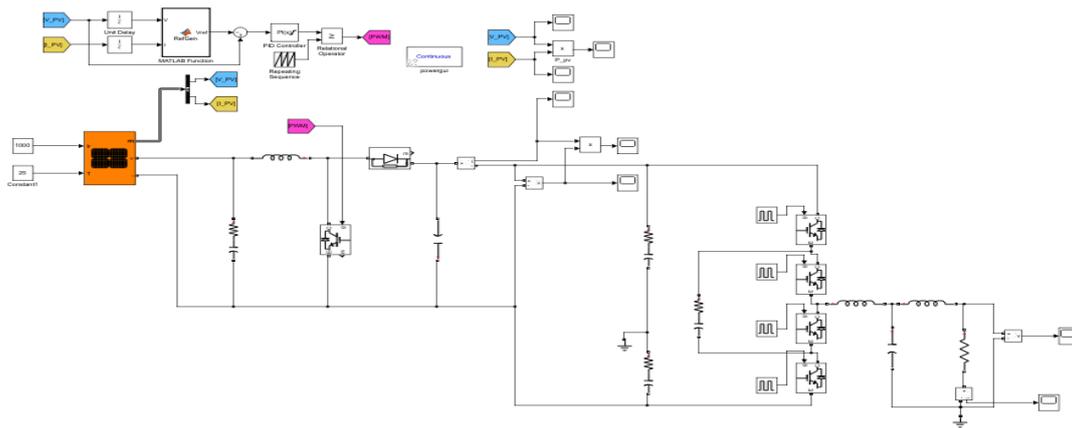
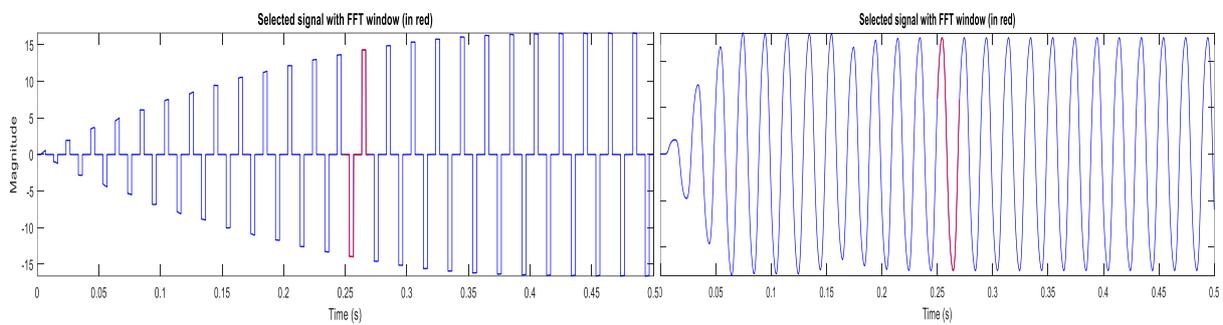


Figure (III.7): onduleur à trois niveaux de type condensateurs flottants alimenté par un générateur PV



(a)

(b)

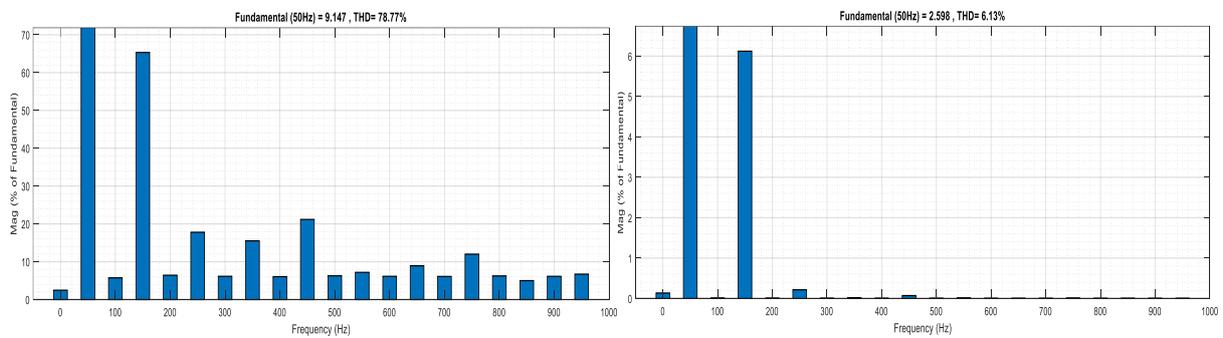
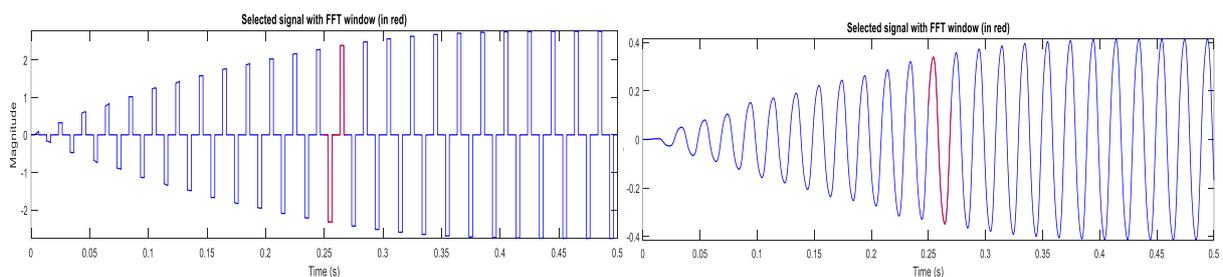


Figure (III.8): (a) Forme d'onde de la tension de l'onduleur condensateurs flottants à trois niveaux avant le filtrage et spectre harmonique

(b) Forme d'onde de la tension de l'onduleur condensateurs flottants à trois niveaux après le filtrage et spectre harmonique



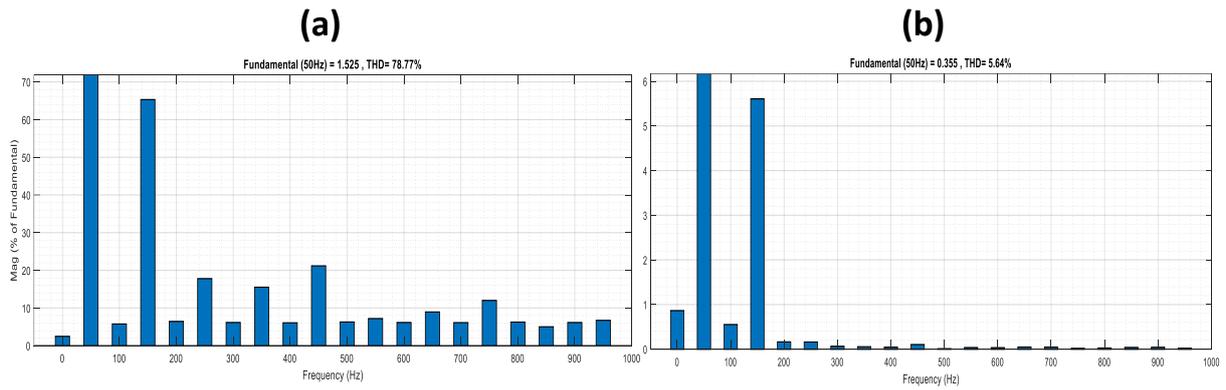


Figure ( III .9): (a) Forme d’onde du courant de l’onduleur condensateurs flottants à trois niveaux avant le filtrage et spectre harmonique

(b) Forme d’onde du courant de l’onduleur condensateurs flottants à trois niveaux après le filtrage et spectre harmonique

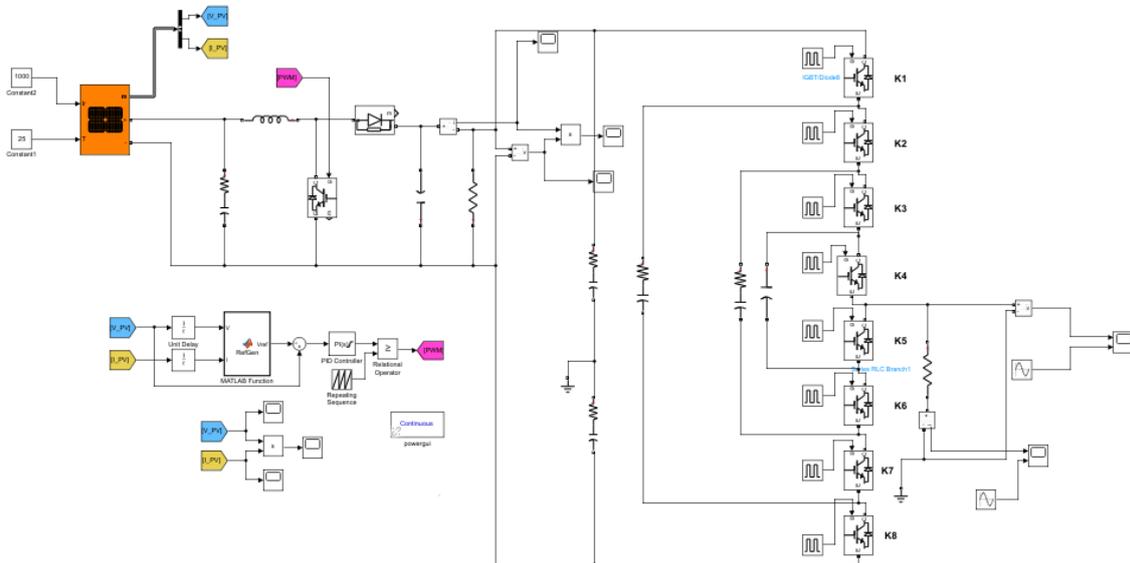
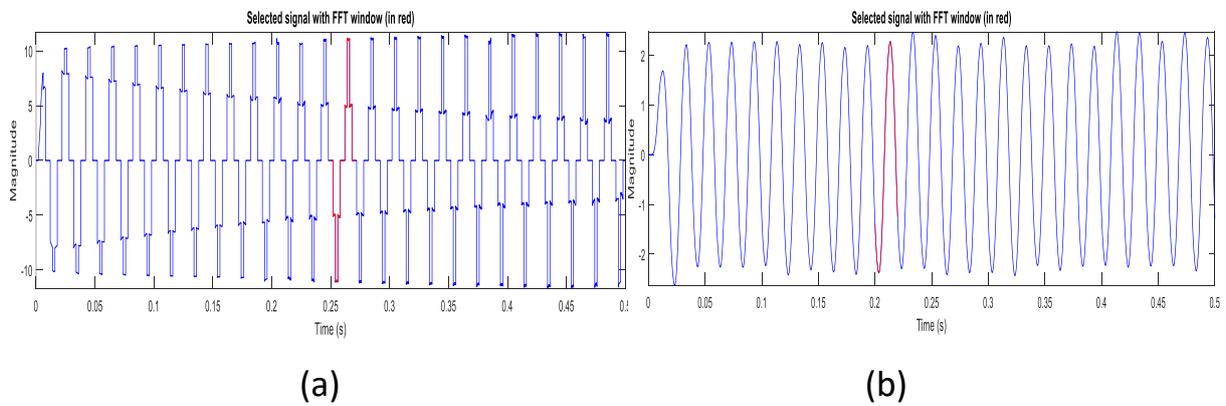
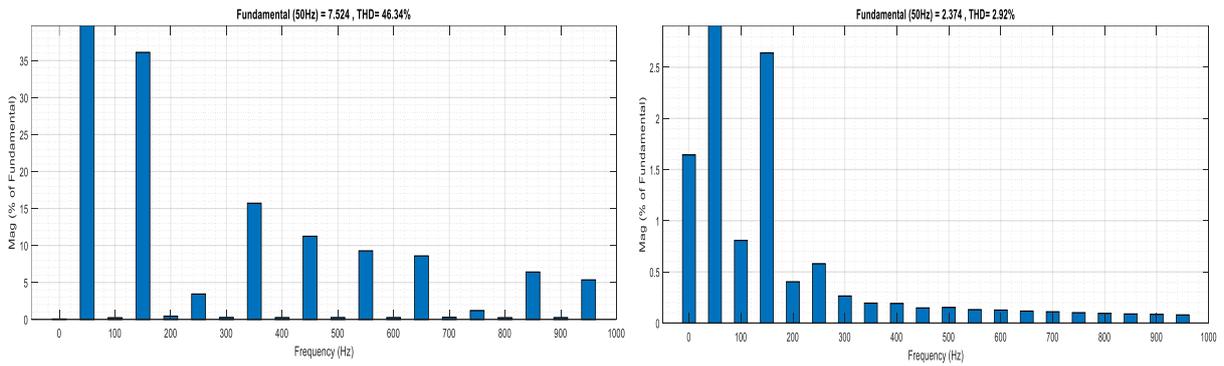


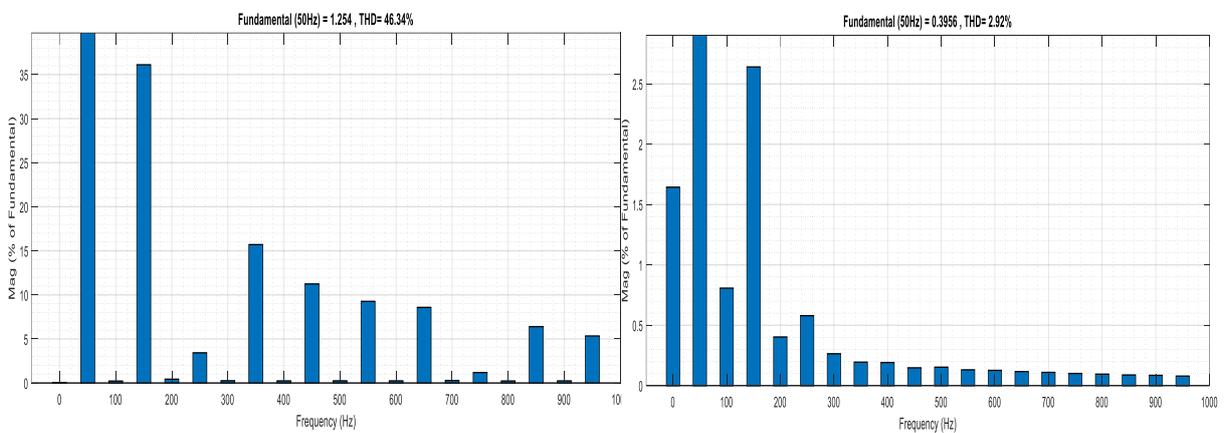
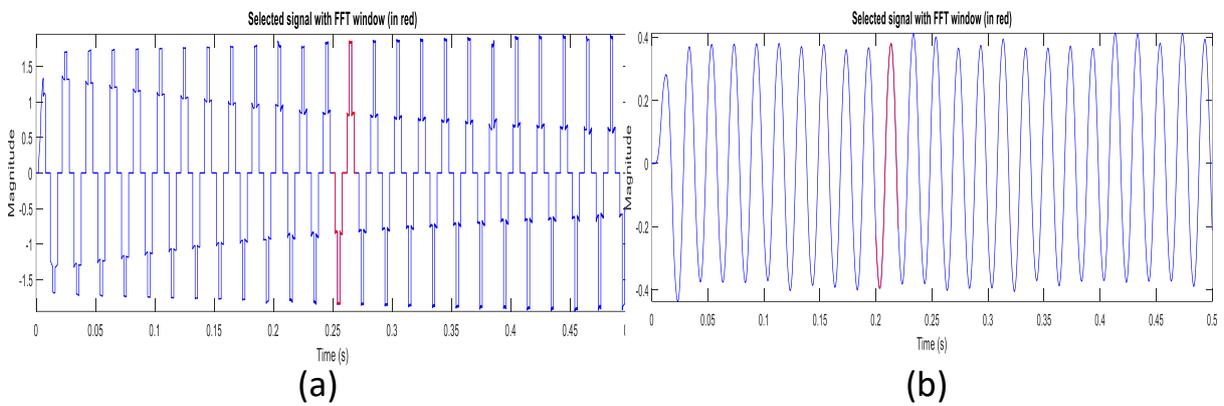
Figure ( III .10): onduleur à cinq niveaux de type condensateurs flottants alimenté par un générateur PV





**Figure ( III .11): (a)** Forme d'onde de la tension de l'onduleur condensateurs flottants à cinq niveaux avant le filtrage et spectre harmonique

**(b)** Forme d'onde de la tension de l'onduleur condensateurs flottants à cinq niveaux après le filtrage et spectre harmonique



**Figure ( III .12): (a)** Forme d'onde du courant de l'onduleur condensateurs flottants à trois niveaux avant le filtrage et spectre harmonique

**(b)** Forme d'onde du courant de l'onduleur condensateurs flottants à trois niveaux après le filtrage et spectre harmonique

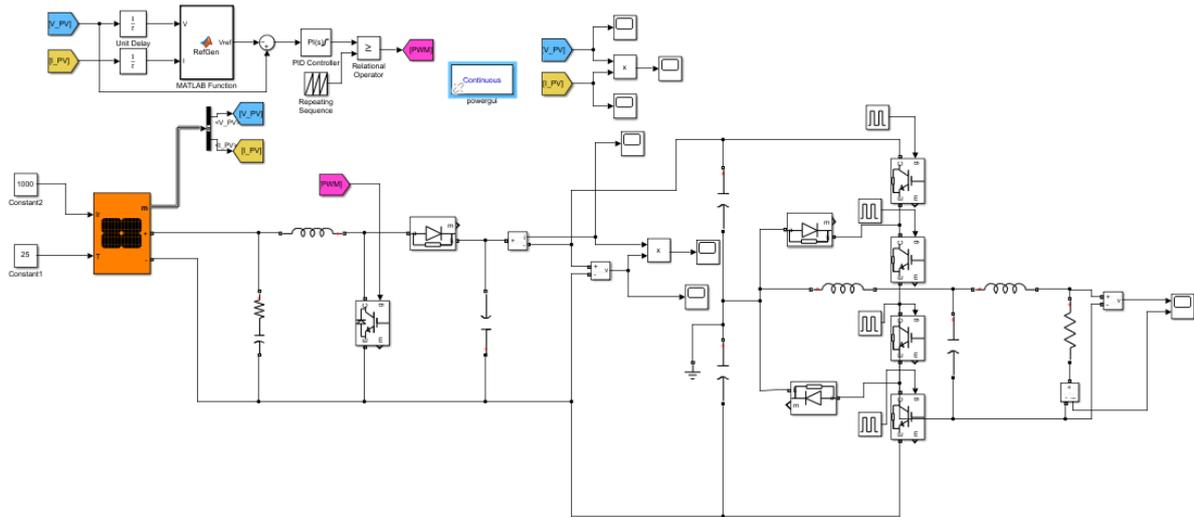


Figure ( III .13): onduleur à trois niveaux de type diode flottants alimenté par un générateur PV

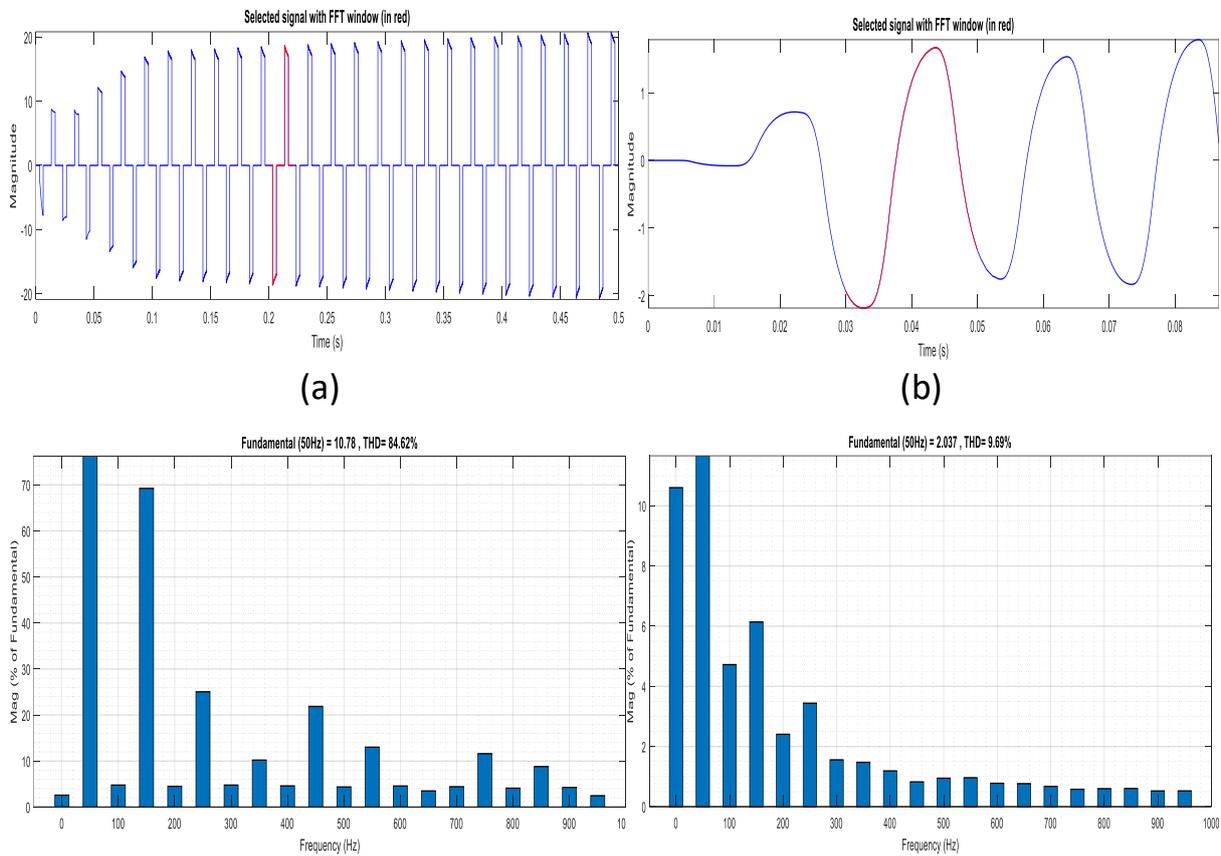
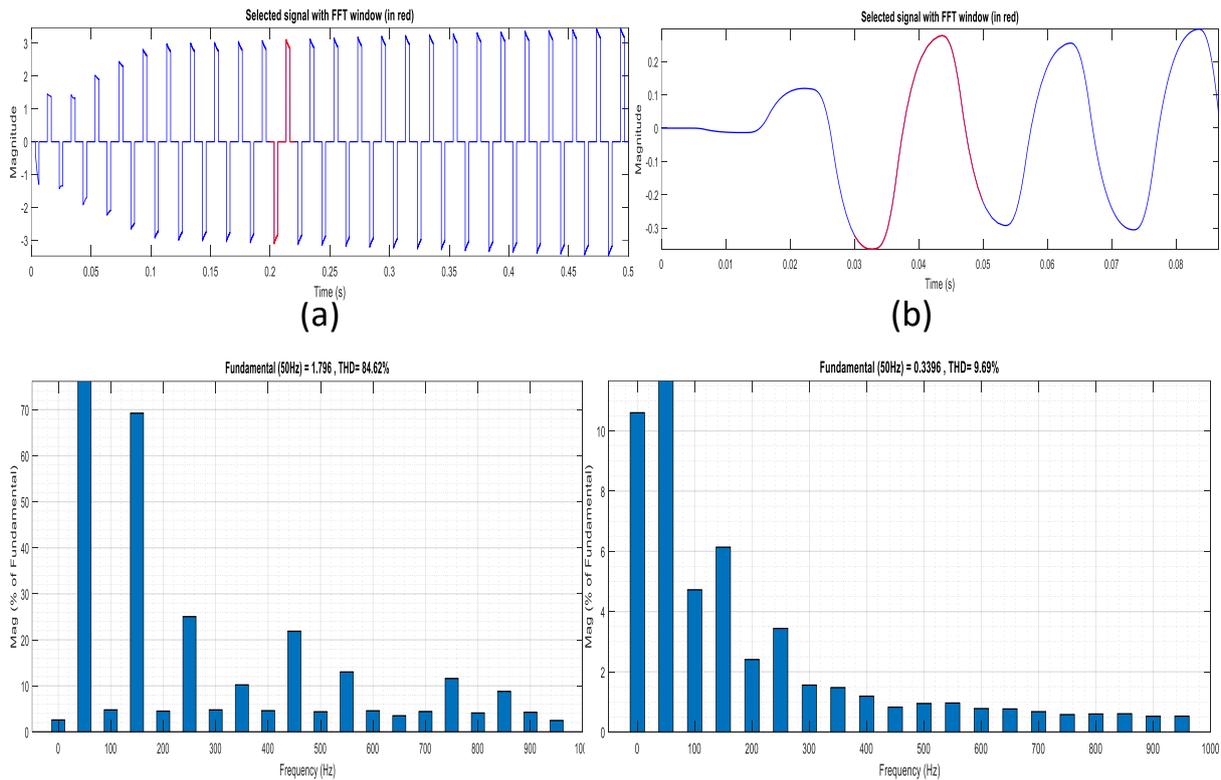


Figure ( III .14): (a) Forme d'onde de la tension de l'onduleur diode flottants à trois niveaux avant le filtrage et spectre harmonique

(b) Forme d'onde de la tension de l'onduleur diode flottants à trois niveaux après le filtrage et spectre harmonique



**Figure ( III .14): (a)** Forme d’onde du courant de l’onduleur diode flottants à trois niveaux avant le filtrage et spectre harmonique

**(b)** Forme d’onde du courant de l’onduleur diode flottants à trois niveaux après le filtrage et spectre harmonique

	Cascade H	FC	NPC
tension	7,70%	6,13%	9,69%
courant	7,70%	6,13%	9,69%

**Tableau ( III .1):** comparaison le THD des onduleurs a 3 niveaux.

	Cascade H	FC	NPC
Tension	5.52%	2.92%	7.01%
Courant	5.52%	2.92%	7.01%

**Tableau ( II .1):** comparaison le THD des onduleurs a 5 niveaux.

**Interprétation des résultats:**

- Nous avons obtenu un THD = 7,70% pour la tension et le courant d’un onduleur Cascade à trois niveaux.
- Nous avons obtenu un THD = 6.13% pour la tension et le courant d’un onduleur a condensateur flottant à trois niveaux.
- Nous avons obtenu un THD = 9,69% pour la tension et le courant d’un onduleur a diode flottant à trois niveaux.

- Nous avons obtenu un THD = 5,52% pour la tension et le courant d'un onduleur Cascade à trois niveaux.
- Nous avons obtenu un THD = 2,92% pour la tension et le courant d'un onduleur a condensateur flottant à trois niveaux.
- Nous avons obtenu un THD = 7,01% pour la tension et le courant d'un onduleur a diode flottant à trois niveaux.

On remarque que vous avancez en niveau, le THD diminue et ça s'améliore la qualité d'énergie.

### ***III-3 conclusion:***

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation et la simulation d'un onduleur multiniveau de type cascade connecté à un générateur photovoltaïque, on a commencé en premier temps par la modélisation d'un système PV. Puis, on a présenté les caractéristique I-V et P-V pour différentes valeurs de température et d'éclairement, La dernière étape a été consacrée à la simulation d'un modèle d'onduleur 5 et 7 niveaux de type Cascade alimenté par un générateur photovoltaïque. On constate que par rapport à la structure à 5 niveaux (THD  $V_a=37,49\%$ ), le taux de distorsion harmonique en tension est effectivement amélioré puisqu'il est de 22,46% pour la structure 7 niveaux.

### ***Conclusion générale:***

Le travail effectué dans ce mémoire avait comme objectif de faire une analyse comparative des structures d'onduleurs multiniveaux pour les systèmes photovoltaïques. En première partie, on a donné des généralités sur système PV se compose de générateur PV, Etage d'adaptation qui contient une partie puissance (hacheur boost) et une partie de commande (MPPT), et leur principe.

Dans la deuxième partie, on a étudié la topologie d'onduleurs multiniveaux de type NPC, condensateur flottant, cascade (3,5,7 niveaux) on a présenté les résultats de simulation des tensions et des courants de sortie.

Dans la dernière partie, on a effectué une simulation sous l'environnement Matlab/Simulink d'un système (PV- Onduleur multiniveaux). Notre travail de l'étude du système PV avec onduleur multiniveaux se résume comme suit :

On a fait une étude comparative entre la qualité d'onde issue des types d'onduleur à 3 et 5 niveaux. L'étude spectrale a montré la supériorité de l'onduleur à 5 niveaux. Bien sûr, le compromis doit être joué entre la complexité de la configuration du convertisseur de puissance et la commande qui lui est associée.

## ***Bibliographie:***

- [1] B. REBAOUI, Etude du déséquilibre de l'alimentation d'un onduleur multiniveaux, Thèse de doctorat, Université Mohamed boudiaf, Oran, 2014.
- [2] A.Ammiche, Commande des onduleurs multiniveaux de tension à diode flottante, Mémoire de Master, Université de M'sila, 2013.
- [3] JIANG, Xueyang. Étude comparative de structures de convertisseurs pour les systèmes photovoltaïques connectés à un réseau électrique moyenne tension, Thèse de doctorat, Université du Québec à Trois-Rivières, 2019.
- [4] BOUCHERITTE.W, Convertisseurs multi niveaux dans les systèmes PV Connectés au réseau, Mémoire de Magistère, Université de Biskra, 2013.
- [5] RICAUD, Alain. Photovoltaic Systems, 2011
- [6] Salim ARAB, Dalila TOUDERT, Etude d'un Système Photovoltaïque, Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri, TIZI-OUZOU, 2017.
- [7] CHEBANA, Abdelkrim, contrôle d'un système photovoltaïque connecte au réseau, Université Mohamed Khider Biskra, mémoire de master, 2014.
- [8] SUN, Dongsen, GE, Baoming, PENG, Fang Zheng, et al. A new grid-connected PV system based on cascaded H-bridge quasi-Z source inverter. In : IEEE International Symposium on Industrial Electronics. IEEE, p. 951-956, 2012
- [9] K.Bouchareb, Etude de différentes topologies des onduleurs multi niveaux (Cascade et NPC), Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2020.
- [10] YANNICK, BEMANA NGUEOUELE, DAKYO, Brayima, et BAGRE, M. Ahmed O, Modélisation des injections de puissance d'un système PV sur un réseau public, Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'environnement, Mémoire de Master, 2012.
- [11] BRIGHEN, H. et HALAIMIA, S, Etude et analyse de la commande des onduleurs Multi niveaux par MLI sinusoïdale, Mémoire de Master, Université Larbi Tebssi, Tebessa

