

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED – NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES  
DÉPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

## MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :  
**Électrotechnique**  
*Option : Énergie Renouvelable en Électrotechnique*

**Intitulé :**

---

### ETUDE ET SIMULATION DES CONVERTISSEURS STATIQUES DESTINÉS AUX SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES

---

**Présenté par :**

- BENTAMEUR Amine Safi
- FATMI Kamel
- EMBAREK Cheikh Salim

*Soutenu le : 30/07/2021 devant le Jury :*

M.TAIBI Ibrahim	MCB	CU Naâma	Président
M. BENOTMANE BENAMARA Nouredine	MAB	CU Naâma	Encadreur
Mlle. BOUDJELLA Fatima Zohra	DOCTORANTE	UDL-SBA	Co-encadreur
M. LAHCEN Mohammed Reda	MAB	CU Naâma	Examineur

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ  
الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي  
خَلَقَ السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضَ  
وَالَّذِي جَعَلَ الْمَوْتَ  
وَالْحَيَاةَ وَالَّذِي  
يُعِيدُ النَّاسَ  
وَالَّذِي يُعَلِّمُ  
بِالْقَلَمِ وَالَّذِي  
جَعَلَ اللَّيْلَ وَالنَّجْمَ  
وَالَّذِي جَعَلَ  
الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي  
خَلَقَ السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضَ  
وَالَّذِي جَعَلَ الْمَوْتَ  
وَالْحَيَاةَ وَالَّذِي  
يُعِيدُ النَّاسَ  
وَالَّذِي يُعَلِّمُ  
بِالْقَلَمِ وَالَّذِي  
جَعَلَ اللَّيْلَ وَالنَّجْمَ  
وَالَّذِي جَعَلَ



# DEDICACES

*J'ai toujours **pensé** faire où **offrir** quelque chose à mes parents en signe de reconnaissance pour tout ce qu'ils ont consenti comme efforts, rien que pour me voir réussir, et voilà, l'occasion est venue.*

*A ceux qui m'ont donné la **vie**, symbole de beauté, et de fierté, de sagesse et de patience.*

*A ceux qui sont la source de mon **inspiration** et de mon **courage**, à qui je dois de l'**amour** et de la **reconnaissance**.*

*© A mes parents.*

*© A mes frères, et mes sœurs, je vous réserve toujours une place dans mon cœur et mes pensées.*

*© A tous mes amis sans exception.*





# Remerciement

*Au terme de ce travail,*

*Je tiens, en premier lieu à remercier le bon DIEU pour  
le courage et la patience qu'il m'a donné afin de mener ce projet à terme.*

*Mes remerciements les plus respectueux et anticipés vont à mon encadreur  
**Benotmane**, qui a été à la hauteur de sa noble tâche, pour avoir accepté de  
diriger mon travail, pour ses précieux conseils, pour son esprit d'ouverture et  
sa disponibilité.*

*Mon respect aux membres de jury, qui me feront l'honneur d'accepter de juger ce modeste  
travail, d'apporter leurs réflexions et leurs critiques scientifiques.*

*Enfin, je tiens à exprimer mes profonds remerciements à tous ceux qui m'ont  
soutenu de près ou de loin pour la réalisation de ce travail*



## Sommaire

Dédicace

Remerciement

Sommaires

Liste figures

Liste tableaux

Introduction générale.....1

## Chapitre I : généralité sur les systèmes photovoltaïques

I.1 Introduction .....4

I.2 Les conditions d'une exploitation efficace.....4

I.2.1 Radiation.....5

I.2.1.1 Différents composants du rayonnement solaire .....7

I.2.1.1.1 Rayonnement direct .....6

I.2.1.1.2 Rayonnement diffus .....7

I.2.1.1.3 Albédo Ou réfléchi .....7

I.2.1.1.4 Rayonnement global .....7

I.2.2 Inclinaison.....8

I.2.3 Perte d'ombre.....9

I.2.4 Pertes dues à la saleté.....10

I.2.5 Modules de température.....10

I.2.6 Pertes par câblage.....11

I.2.7 Efficacité des équipements.....10

I.2.8 Détérioration des panneaux solaires .....11

I.3 l'effet photovoltaïque.....12

I.3.1 Semi-conducteurs intrinsèques :	13
I.3.2 Semi-conducteurs extrinsèques	13
I.4 Types de cellules solaires photovoltaïques	15
I.4.1 Différentes technologies de cellules solaires	15
I.4.1.1 Technologies de la première génération à base de silicium cristallin	16
I.4.1.2 Cellules monocristallines	16
I.4.1.3 Cellules poly-cristallines	16
I.4.1.2 Technologies de la deuxième génération à base de couche-mince	17
I.4.1.2.1 Cellules amorphes	17
I.4.1.2.2 Cellules multi-jonction	17
I.4.1.2.3 Cellule tandem	17
I.4.1.3 Technologie de la troisième génération « Les cellules organiques »	18
I.5 Modèle de cellule	19
I.6 Potentiel solaire en Algérie	20
I.7 Structures de support pour les panneaux solaires	22
I.7.1 Structure fixe	23
I.7.2 Structure de suivi du soleil	24
I.8 Régulateur/maximiseur	25
I.9 Batteries	24
I.10 Onduleur photovoltaïque	28
I.11 Champ de modules PV	29
I.11.1 Assemblage série	29
I.11.2 Assemblage parallèle	30

I.11.3 Assemblage Mixte.....	30
I.12 Différents types des systèmes photovoltaïques.....	31
I.12.1 Systèmes hybrides individuels.....	31
I.12.2 Systèmes autonomes avec batterie d'accumulateurs.....	31
I.12.3 Systèmes PV raccordés réseau .....	32
I.12.3.1 Vente totale.....	32
I.12.3.2 Vente du surplus.....	32
I.12.4 Systèmes PV pour le pompage d'où .....	32
I.12.4.1 Types de pompes.....	33
I.12.4.2 Pompe volumétrique.....	33
I.12.4.3.Pompe centrifuge.....	33
I.13. Conclusion.....	34

## Chapitre II : généralité sur les différents types d'onduleurs

II . 1. Introduction .....	36
II.2 . Onduleur classique à deux niveaux de tensions .....	37
II .2.1 Séquences 1 : Génération du niveau maximum.....	37
II 2.2 Séquences 2 : Génération du niveau minimum .....	38
II. 3. Intérêt des onduleurs multi-niveau.....	39
II . 4. Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux .....	39
II . 5. Onduleur multi niveaux à diode de bouclage .....	40
II. 6. Onduleur à trois niveaux de type NPC .....	41
II.6.1 Structure .....	41
II . 6.2 Principe de fonctionnement .....	42
II .6.2.1 .Premier configuration {1100}.....	43
II .6.2.2 Deuxième configuration{0110} .....	44
II .6.2.3 Troisième configuration{0011} .....	44

II .7. Onduleur multi niveaux à condensateurs flottants .....	46
II .8. Onduleurs multi niveaux en cascade .....	47
II .9. Comme toutes structures, l'onduleur multi-niveaux en cascade possède de des avantages et Inconvénients dont on peut citer.....	48
II 9.1 . Avantage .....	48
II .9.2 Inconvénients .....	49
II .10 . Propriétés des principales structures.....	49
II .10 .1. Classification des topologies selon leur alimentation.....	49
II .10 .2. Nombres de composants nécessaires.....	49
II .10 .3. Qualité de l'énergie électrique.....	51
II .10.3.1. Perturbations harmoniques.....	51
II .10.3.1.1. Inter-Harmoniques.....	52
II .10.3.1.2. Infra harmoniques.....	53
II .10.3.2. Origine des harmoniques.....	53
II .11. Type de commande.....	53
II.11.1 - commande pleine onde (dite 180°).....	54
II.11.2 Commande décalée.....	54
II.11.3 Commande à Modulation de largeur d'impulsion (MLI).....	54
II.11.3.1 Type de commande MLI.....	54
II.11.3.1.1 MLI sinus triangle (Modulation par porteuse).....	54
II.11.3.1.2 Technique de production d'onde MLI.....	56
II.11.3.1.3 Principaux avantages de la MLI.....	57
II.11.3.1.2 MLI vectorielle .....	57
II.11.3.1.2.1 Principe de la MLI vectorielle .....	57
II.11.3.1.2.2 Avantage de la MLI vectorielle.....	58

II 12..Conclusion .....	58
-------------------------	----

### CHAPITRE III :SIMULATION DES DIFFERENTS TYPES DE COMMANDE D'UN ONDULEUR

III.1 Introduction .....	60
III.2 Commande symétrique :.....	60
III.2.1Commande symétrique (pleine onde 180°) d'un onduleur monophasé en pont .....	60
III.2.1.1 Interprétation :.....	62
III 2.2Commande symétrique (pleine onde) d'un onduleur triphasé .....	62
III.2.2.1Interprétation :.....	63
III.3Commande décalée .....	64
III.3.1Commande décalée 120 ° d'un onduleur monophasé en pont .....	64
III.3.1.1Décalage de T/6 élimine l'harmonique de rang 3 .....	64
III.3.1.2 Décalage de T/10 élimine l'harmonique 5 .....	65
III 3.1.3 Décalage de T/8 élimine le 3 et 5 ensembles .....	66
III.3.1.4Interprétations .....	67
III.3.2Commande décalée d'un onduleur triphasé .....	67
III.3.2.1 Interprétation .....	69
III.4 Commande MLI .....	69
III.4.1 Commande MLI Sinus Triangle d'un onduleur triphasé .....	69
III.4.1.1 Interprétation .....	72
III.6 Conclusion .....	72
Conclusion générale .....	75

Référence

## Liste figures

Figure I.1. Spectre du rayonnement solaire.....	6
Figure I.2. Composants du rayonnement solaire « Global ».....	8
Figure I.3 Inclinaison du panneau solaire.....	8
Figure I.4 Distance de séparation entre les lignes des panneaux.....	10
Figure I.5 Principe de fonctionnement d'une cellule PV.....	13
Figure I.6 Bandes d'énergies.....	13
Figure I.7 Dopage Type N.....	14
Figure I.8 Dopage Type P.....	14
Figure I.9 cellule photovoltaïque.....	15
Figure I.10 Technologies de la première génération de cellules à base de silicium cristallin.....	16
Figure I.11 Technologies de la deuxième génération à base de couche-mince.....	18
Figure I.12 Technologie de la troisième génération « Les cellules organiques ».....	19
Figure I.13 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	19
Figure 1.14 Irradiation directe journalière KWh/m <sup>2</sup> /jour été Source: CDER.....	21
Figure 1.15 Irradiation directe journalière KWh/m <sup>2</sup> /jour hiver Source: CDER.....	22
Figure 1.16 structures coplanaires.....	23
Figure 1.17 structures inclinées .....	23
Figure 1.18 Structure de suivi du soleil.....	24
Figure 1.19 Production journalière d'électricité. Comparaison entre le tracker et le support fixe...	24
Figure 1.20 Batterie monobloc.....	25
Figure 1.21 Batteries monoblocs AGM.....	26

Figure 1.22 Batteries monobloc semi-stationnaires.....	26
Figure 1.23 batteries OPZS.....	27
Figure 1.24 batteries OPZV.....	27
Figure I.25 Symbole d'un onduleur.....	29
Figure I.26 Schéma de principe d'un onduleur monophasé.....	29
Figure I.27 Schéma d'un assemblage série.....	30
Figure I.28 Schéma d'un assemblage parallèle.....	30
Figure I.29 Schéma d'un assemblage mixte.....	30
Figure I.30 Les systèmes hybrides individuels.....	31
Figure I.31 Systèmes autonomes avec batterie d'accumulateurs.....	32
Figure I.32 production de l'énergie photovoltaïque avec la vente totale.....	32
Figure I.33 Production de l'énergie photovoltaïque avec la vente du plus.....	33
Figure I.34 Pompe à piston (Jack pump):Pour de grandes profondeurs et de petits débits d'eau.....	33
Figure I.35 Pompe centrifuge flottante.....	34
Figure. II .1: Schéma d'un onduleur usuel à 2 niveaux.....	37
Figure II.2 : Séquencesde fonctionnement d'un bras de l'onduleur à deux niveaux.....	38
Figure II.3 Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux.....	39
Figure II. 4 Topologies d'onduleurs NPC.....	40
figure II . 5 :Structure d'un onduleur triphasé à trois niveaux de type NPC.....	42
figure II . 6 : Bras d'un onduleur NPC à trois niveaux.....	43
Figure II. 7 : 1 <sup>ère</sup> configurationdu 1 <sup>er</sup> bras .....	43
figure II .8 :2 <sup>ème</sup> configurationdu 1 <sup>er</sup> bras.....	44
figure II. 9 : 3 <sup>ème</sup> configurationdu 1 <sup>er</sup> bras.....	45

Figure II .10 : Forme d'onde de la tension de sortie d'un bras d'onduleur à trois Niveaux de type NPC .....	45
Figure. II .11 : Topologies d'onduleurs NPC à condensateur Flottant.....	47
figure II.12 : Structure d'un convertisseur N niveaux en cascade.....	47
Figure II .13 : Superposition de la 3eme harmonique sur le signal fondamental.....	48
Figure 14 - Forme de la tension de la commande décalée.....	52
Figure II .15. MLI sinus triangle.....	54
Figure II .16 - Technique analogique.....	55
Figure II .17 -Technique numérique.....	56
figure II. 18 - Principe de la SVM.....	57
Figure III.1 : Commande symétrique d'un onduleur en pont.....	58
Figure III.2 : Allure de tension et du courant de sortie d'un onduleur en pont avec commande 180° .....	61
Figure III.3 : Spectre amplitude-harmonique de la tension de sortie et du courant (charge RL)...	61
Figure III .4 : Schéma d'un onduleur triphasé avec la commande symétrique.....	62
Figure III .5: Allure de la tension de sortie et du courant en fonction du temps.....	63
Figure III.6: Spectre amplitude-harmonique de la tension de sortie et du courant (charge RL)...	63
Figure III.7:Allure de la tension et du courant de sortie d'un onduleur en pont avec commande décalée.....	64
Figure III.8: Spectre amplitude-harmonique de la tension de sortie et du courant (charge RL), d'une commande décalée 30° .....	65
Figure III.9: Spectre amplitude-harmonique de la tension de sortie et du courant (charge RL), d'une commande décalée 180° .....	66
Figure III.10 : Spectre amplitude-harmonique de la tension de sortie et du courant (charge RL), d'une commande décalée 22.5° .....	67
Figure III.11: Allure de la tension de sortie et du courant en fonction du temps.....	68
Figure III.12: Spectre d'harmonique de la tension de sortie et le courant (Charge RL).....	68

Figure III.13: Schéma de montage de la MLI sinus-triangulaire avec onduleur triphasé.....	69
Figure III.14: Allure de tension de sortie et du courant en fonction du temps (M=0.7).....	70
Figure III.15: Spectre d'harmonique de la tension du courant (charge RL) M=0.7.....	70
Figure III. 16: Allure de la tension de sortie et du courant en fonction du temps (M=0.9).....	71
Figure III. 17: Spectre d'harmonique de la tension du courant (charge RL) M=0.9.....	71

### **Liste tableaux**

Tableau 1: Les modules PV.....	31
Tableau II .1. : États possibles de l'onduleur usuel à 2niveaux.....	38
Tableau II .2 : Table de commutation de l'onduleurNPC3 niveaux.....	45
Tableau II. 3 :. Nombres de composants nécessaires pour la topologie à trois niveaux.....	50
Tableau II . 4 :. Nombres de composants nécessaires pour la topologie à n niveaux.....	50

## **Résumé**

Devant le développement des énergies renouvelables, et concernant l'énergie solaire, la demande de sa conversion, pour son utilisation est en augmentation. Par conséquent, la recherche en électronique de puissance s'intéresse de plus en plus à la topologie des onduleurs solaires. Ces derniers sont la pièce maîtresse de tout système photovoltaïque, dont le rôle est de convertir une tension continue à une tension alternative. Dans ce travail nous intéressons à l'étude des convertisseurs statiques et les différents types de commande et on essaye de faire une comparaison entre certaine stratégie pour prendre un taux de distorsions THD minimal et un signal presque sinusoïdal.

**Mots clefs** : Energie solaire, Système photovoltaïque, Onduleurs à deux niveaux, Commandes.

## **Abstract**

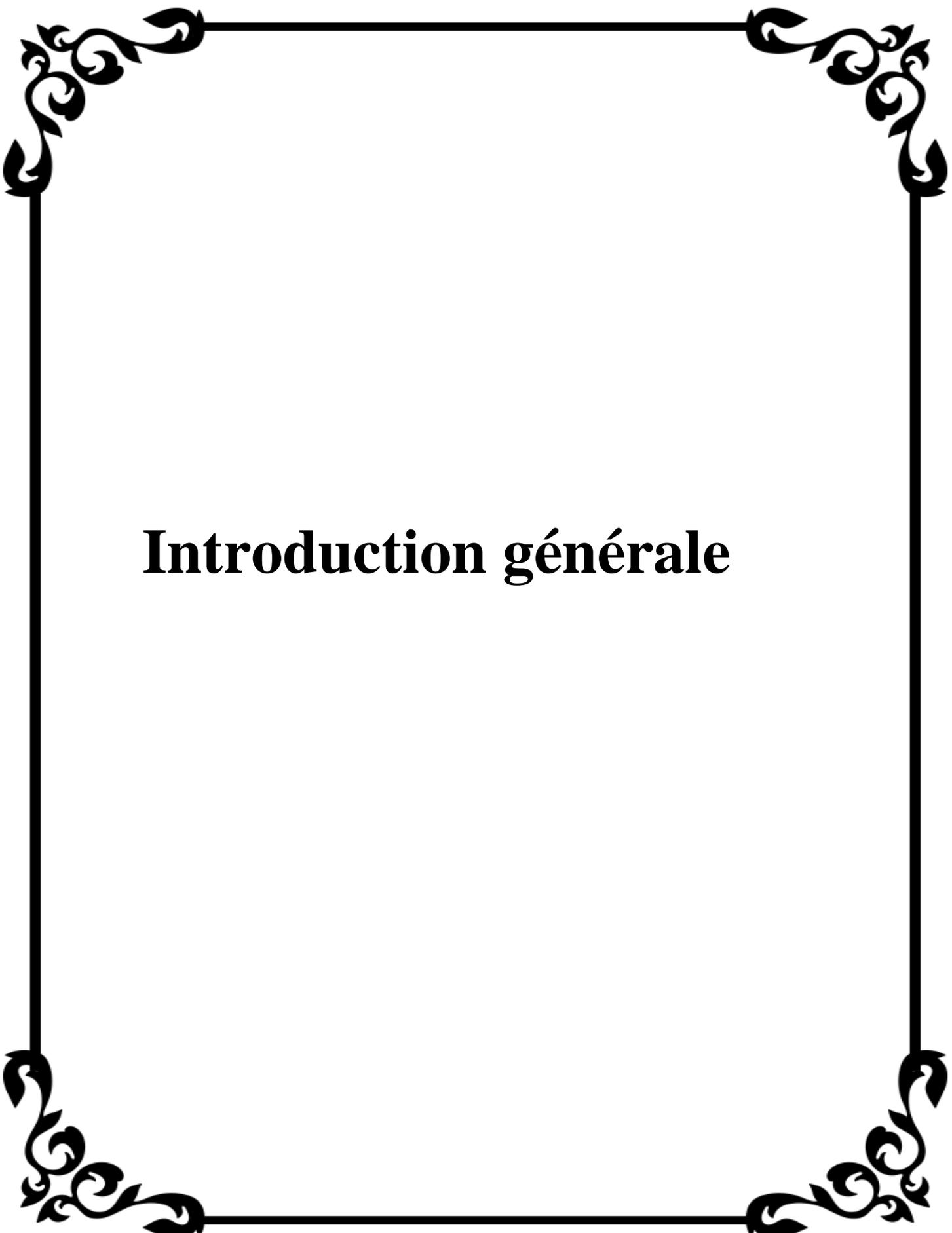
Faced with the development of renewable energies, and concerning solar energy, the demand for its conversion, for its use is increasing. Therefore, research in power electronics is increasingly interested in the topology of solar inverters. These are the centerpiece of any photovoltaic system, whose role is to convert a direct voltage to an alternating voltage. In this work we are interested in the study of static converters and the different types of control and we try to make a comparison between a certain strategy to take a minimum THD distortion rate and an almost sinusoidal signal.

**Keywords**: Solar energy, Photovoltaic system, Two-level inverters, Controls.

## ملخص

في مواجهة تطور الطاقات المتجددة ، وفيما يتعلق بالطاقة الشمسية ، فإن الطلب على تحويلها لاستخدامها أخذ في الازدياد. لذلك ، يهتم البحث في إلكترونيات الطاقة بشكل متزايد بطوبولوجيا محولات الطاقة الشمسية. هذه هي الزاوية في أي نظام ضوئي ، يتمثل دوره في تحويل الجهد المباشر إلى جهد متناوب. في هذا العمل ، نحن مهتمون بدراسة المحولات الثابتة وأنواع التحكم المختلفة ونحاول إجراء مقارنة بين استراتيجيات معينة لأخذ الحد الأدنى من معدل تشويه THD. وإشارة جيبية تقريبًا.

**الكلمات المفتاحية:** الطاقة الشمسية ، النظام الكهروضوئي ، المحولات ثنائية المستوى ، الضوابط



# **Introduction générale**

### Introduction générale

L'utilisation des énergies renouvelables connaît une croissance significative dans le monde, devant la demande croissante d'énergie électrique essentiellement pour les besoins des régions éloignées dépourvues d'électricité fiable, désertes et montagneuses. Une grande partie de l'énergie consommée provient des combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon, etc...) dont l'utilisation massive peut conduire à l'épuisement de ces réserves et menace réellement l'environnement, cette menace s'est manifestée principalement à travers la pollution et le réchauffement global de la terre.

L'énergie solaire photovoltaïque est une forme d'énergie renouvelable permettant de produire de l'électricité par la transformation d'une partie du rayonnement solaire grâce à des modules solaires photovoltaïques, comprenant plusieurs cellules photovoltaïques reliées entre elles. Les impacts locaux du solaire sont très réduits : pas de bruit, pas de rejets et, sur le plan visuel, une relative discrétion voire pour certaines structures intégrées au bâtiment une réelle élégance.

Dans le domaine de l'électricité, l'électronique de puissance est un domaine vital qui touche plusieurs activités tels que le réseau électrique, le transport (urbain, ferroviaire, maritime, etc.). Depuis plus de 40 ans, l'électronique de puissance est en perpétuelle évolution. Dans les années 80, l'électronique de puissance se résumait à l'étude des convertisseurs à diodes et thyristors. Avec le développement de nouveaux composants de puissance (transistor bipolaire puis MOSFET, GTO, IGBT, etc.) de nouvelles possibilités de conversion de l'énergie sont apparues, avec pour conséquence un accroissement de la complexité des systèmes.

Au début des années 90, l'évolution croissante des calibres en tension et en courant des semi-conducteurs de puissance a stimulé le marché des convertisseurs statiques de puissance spécialement dédiés aux applications de moyennes et de fortes puissances, allant de quelques kilowatts à plusieurs mégawatts. Néanmoins, malgré les avancées significatives des technologies utilisées en développement et en fabrication des interrupteurs de puissance, l'évolution des technologies des semi-conducteurs est restée lente par rapport à la demande du marché mondial

Ces dernières années, des convertisseurs statiques sont de plus en plus exploités dans des applications diverses. Devant le développement des énergies renouvelables, et concernant l'énergie solaire, la demande de sa conversion, pour son utilisation est en augmentation. Par conséquent, la recherche en électronique de puissance s'intéresse de plus en plus à la topologie des onduleurs

## Introduction générale

---

solaires. Ces derniers sont la pièce maîtresse de tout système photovoltaïque, dont le rôle de convertir une tension continue à une tension alternative.

Dans ce travail nous intéressons à l'étude des convertisseurs statiques et les différents types de commande et on essaye de faire une comparaison entre certaine stratégie pour prendre un taux de distorsions THD minimal et un signal presque sinusoïdal dans les normes nationales. Au fait, l'objectif de cette recherche est une synthèse des différents onduleurs ainsi que leurs commandes. Il est question également de procéder à plusieurs simulations concernant :

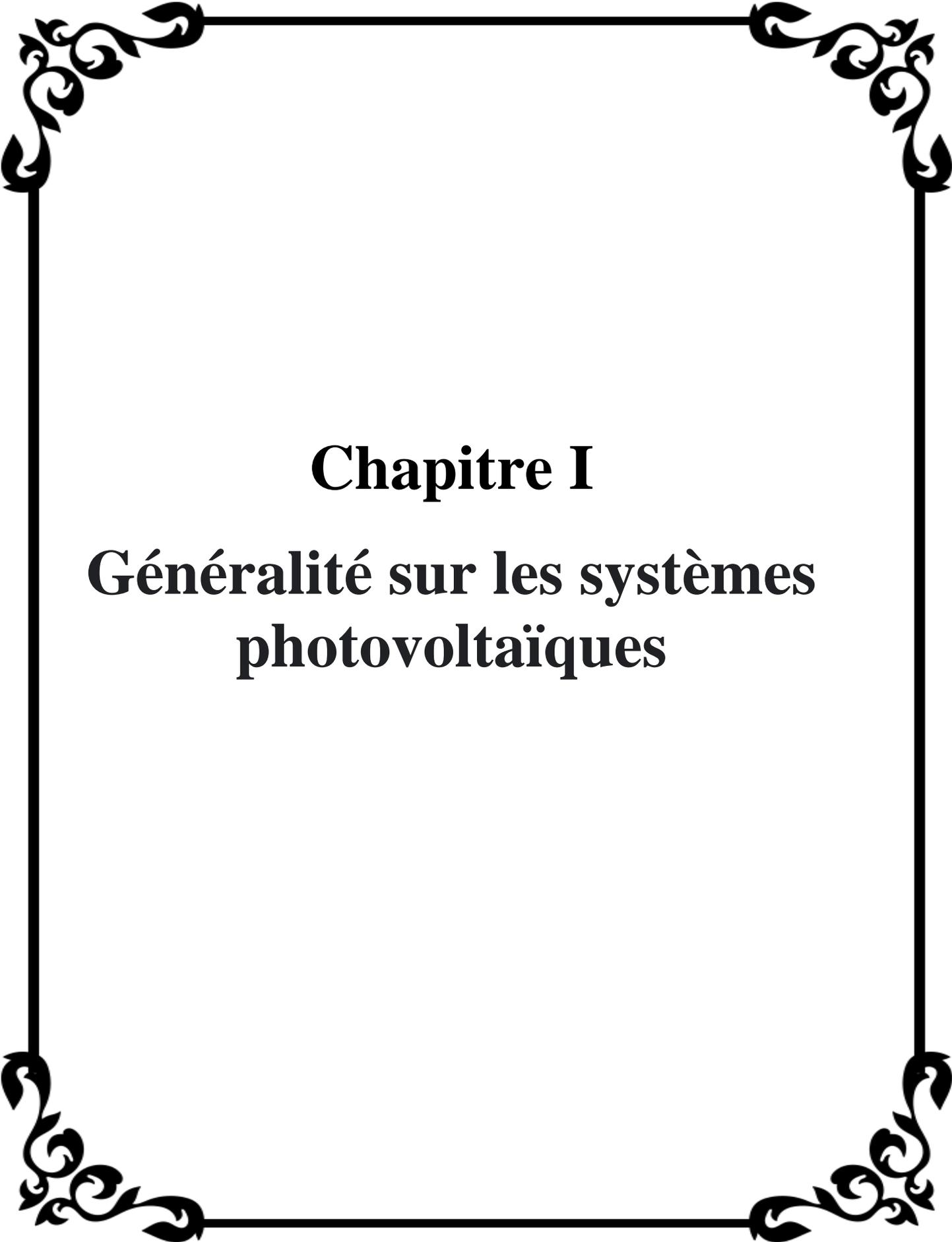
- ✓ Onduleur monophasé avec commande symétrique, décalée et commande MLI sinus triangle.
- ✓ Onduleur triphasé deux niveaux avec commande MLI sinus triangle.

Pour cela le mémoire sera organisé comme suit :

Au premier chapitre, on présente des généralités sur les systèmes photovoltaïques. On cite notamment le principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par la cellule photovoltaïque.

Le deuxième chapitre présentera les différents types des convertisseurs, leurs avantages et inconvénients et l'étude des nouvelles techniques dites multi niveaux ainsi que des nouvelles topologies des onduleurs.

Au troisième chapitre des simulations axées sur la modélisation des convertisseurs pour trouver une bonne stratégie de commande avec le niveau désiré qui donne le meilleur résultat pour notre stratégie nous avons limitée notre travail aux onduleurs sa deux niveaux .L'étude par simulation est effectuée sous l'environnement Matlab Simulink. Nous terminons ce travail par une conclusion générale.



# **Chapitre I**

## **Généralité sur les systèmes photovoltaïques**

## **I.1 Introduction**

L'utilisation et la transformation du rayonnement solaire en électricité est appelée énergie solaire photovoltaïque.

L'énergie solaire photovoltaïque est le terme utilisé pour désigner l'utilisation et la transformation du rayonnement solaire en électricité au moyen de l'effet photovoltaïque.

Elle est considérée comme une ressource énergétique renouvelable car elle utilise une source d'énergie naturelle telle que le rayonnement solaire pour produire de l'électricité.

C'est une source d'énergie propre qui ne produit pas d'émissions de gaz à effet de serre. Par conséquent, elle ne contribue pas au changement climatique ni au réchauffement de la planète.

La transformation du rayonnement solaire en énergie électrique est possible grâce à la l'effet photovoltaïque. Ce phénomène se produit lorsque les photons du rayonnement solaire ont un impact sur un surface du semi-conducteur. Si le photon frappe la surface du semi-conducteur avec suffisamment d'énergie, il libère un électron qui laisse suffisamment d'espace pour que les électrons puissent se déplacer et générer un courant électrique.

## **I.2 Les conditions d'une exploitation efficace**

La production et les performances d'une installation photovoltaïque dépendent d'un certain nombre de facteurs.

Pour obtenir le calcul et le résultat optimal d'une installation photovoltaïque, différentes normes doivent être prises en considération car elles auront une incidence sur les performances de l'installation. Voici quelques-uns de ces facteurs :

- Rayonnement
- Inclinaison
- Pertes dues aux ombres

- Pertes dues à la poussière
- Température des cellules
- Efficacité des équipements
- Détérioration des panneaux solaires

Tous ces facteurs expliquent les pertes globales de l'installation et, par conséquent, ils ont une incidence sur son efficacité. C'est ce qu'on appelle le rapport de performance (PR) de l'installation.

La définition officielle du PR selon la norme 61724 de la IEC est "le rapport entre la puissance mesurée de l'énergie du système par rapport à l'énergie hypothétique qui serait produite si le système a fonctionné à sa puissance nominale sous l'irradiation de référence".

Le PR de l'installation tend à avoir des valeurs qui varient de 0,6 à 0,8 selon le type de l'installation et ses caractéristiques.

Ces différents facteurs sont décrits en détail ci-dessous.

### **I.2.1 Radiation**

L'énergie émise par le Soleil est transmise à la Terre sous forme d'ondes électromagnétiques.

La longueur d'onde est une caractéristique de ces ondes. Elle est définie comme la distance entre deux crêtes consécutives de l'onde et elle est liée à la fréquence ( $\nu$ ) de l'onde. Cette dernière détermine l'énergie transportée par une vague et ne change pas lorsqu'on passe d'un milieu à un autre.

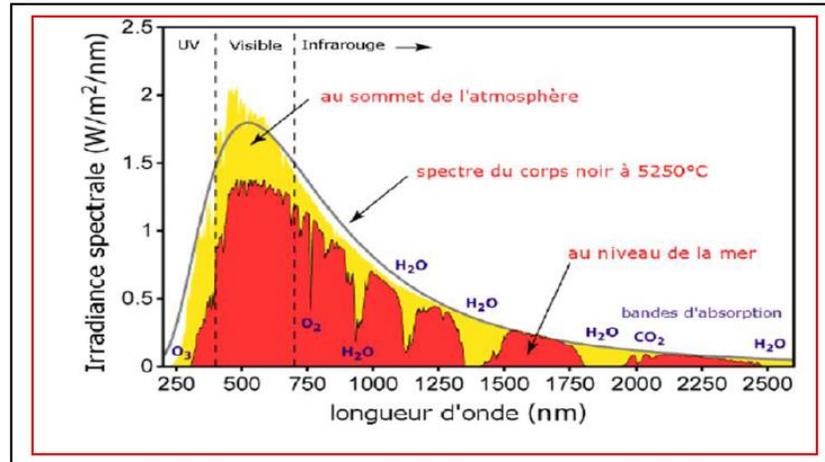
Les ondes électromagnétiques se déplacent à la vitesse de la lumière ( $c$ ) dans le vide. La relation entre la longueur d'onde ( $\lambda$ ) et la fréquence ( $\nu$ ) sont déterminées par l'expression :

$$\lambda * \nu = c \quad (I.1)$$

L'énergie transportée par l'onde est définie comme :

$$E = h * \nu \quad (I.2)$$

$h$  est la constante de Planck avec une valeur de  $6,63 \cdot 10^{-34}$  Js



**Figure I.1. Spectre du rayonnement solaire [1]**

Du point de vue de la transformation de l'énergie solaire en un autre type d'énergie, le spectre n'est pas utile dans sa totalité, étant donné que pour certaines longueurs d'onde, le flux d'énergie atteint la surface de la Terre à un niveau si bas qu'aucune autre transformation n'est possible.

Le seul rayonnement important est celui qui se situe concrètement dans la gamme visible (390 à 750 nm), une partie de la zone de rayonnement ultraviolet (UV) correspondante et une partie de la zone de rayonnement infrarouge (IR). Cela s'explique par le fait que la quantité de rayonnement dans cette gamme de spectre est suffisamment importante pour être reçue et utilisée. De plus, l'énergie de ce rayonnement peut interagir avec les matériaux utilisés dans les panneaux.

---

### **I.2.1.1 Différents composants du rayonnement solaire :**

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. Au sol on distingue plusieurs composants :

#### **I.2.1.1.1 Rayonnement direct :**

Le rayonnement direct est le rayonnement incident sur un plan donné en provenance d'un petit angle solide centré sur le disque solaire, il parvient en ligne droite et par temps clair [2].

#### **I.2.1.1.2 Rayonnement diffus :**

Le rayonnement diffus résulte de la diffraction de la lumière par les molécules atmosphériques, et de sa réfraction par le sol, il parvient de toute la voûte céleste. Le rayonnement diffus (Dh) est le rayonnement émis par des obstacles (nuages, sol, bâtiments) et provient de toutes les directions, il peut être mesuré par un pyranomètre avec écran masquant le soleil.

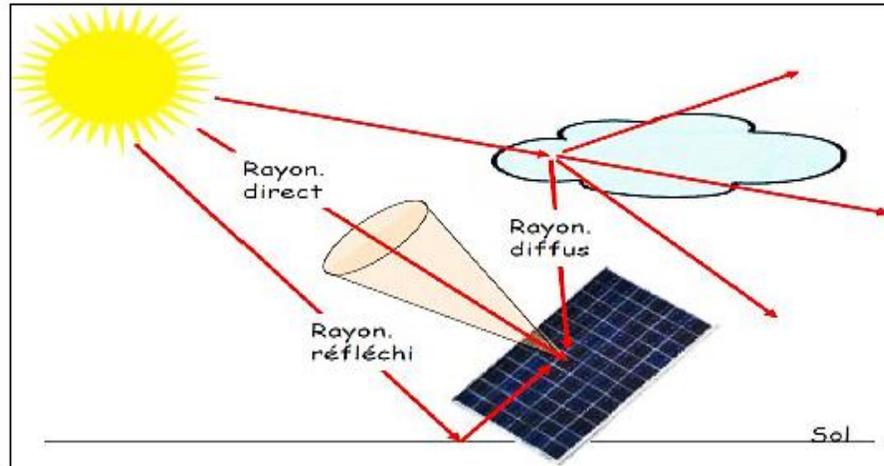
#### **I.2.1.1.3 Albédo Ou réfléchi :**

C'est la fraction d'un rayonnement incident diffusée ou réfléchi par un obstacle. Ce terme étant généralement réservé au sol et aux nuages. C'est une valeur moyenne de leur réflecteur pour le rayonnement considéré, et pour tous les angles d'incidences possibles. Par définition, le corps noir possède un albédo nul. Il faudra en tenir compte pour évaluer le rayonnement sur plans inclinés. L'albédo est donné par l'équation :

$$\text{Albedo (alb)} = \frac{\text{énergie réfléchie}}{\text{énergie reçue}} \quad (\text{I.3})$$

#### **I.2.1.1.4 Rayonnement global**

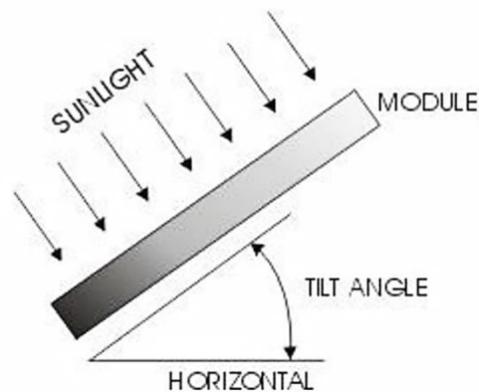
C'est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyromètre ou un Solari mètre sans écran.



**Figure I.2. Composants du rayonnement solaire « Global »**

### **I.2.2 Inclinaison**

L'inclinaison du panneau, par rapport à l'horizontale, modifie le rayonnement collecté en raison de l'angle d'incidence des rayons solaires sur la surface.



**Figure I.3 Inclinaison du panneau solaire**

L'inclinaison optimale de la surface des panneaux solaires pour optimiser l'utilisation annuelle du rayonnement solaire incident dépend de l'emplacement de l'installation. Trois situations sont généralement différenciées selon le besoin d'une plus grande production solaire.

$$\text{Demande annuelle } : \beta_{opt} = \phi - 10 \quad (I.4)$$

$$\text{Demande pour l'été : } \beta_{opt} = \phi - 20 \quad (\text{I.5})$$

$$\text{Demande hivernale : } \beta_{opt} = \phi + 10 \quad (\text{I.6})$$

$\beta_{opt}$  représente l'angle d'inclinaison optimal et  $\phi$  l'atitue du lieu.

Parfois, il n'est pas possible d'appliquer le maximum de critères de fixation possibles pour déterminer l'inclinaison, car ceux-ci sont limités par des facteurs régionaux et climatiques. Des inclinaisons d'environ 90° sont nécessaires dans les zones où il neige fréquemment afin d'éviter l'accumulation de neige à la surface des panneaux. Une inclinaison minimale de 40° est requise dans les zones désertiques pour éviter l'accumulation de sable à la surface et une inclinaison minimale de 30° est requise dans les zones tropicales pluvieuses.

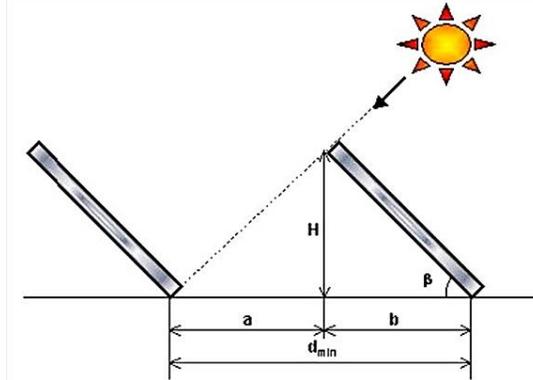
### **I.2.3Perte d'ombre**

Les ombres environnantes produisent des pertes de rayonnement sur une surface. Ces pertes sont exprimées en pourcentage du rayonnement solaire global qui atteindrait la surface en l'absence de toute ombre.

Les pertes peuvent être causées par les contours ombragés de l'installation photovoltaïque ou par des obstacles éloignés tels que des bâtiments ou des arbres.

La distance minimale de séparation entre les lignes de panneaux afin d'éviter les pertes d'ombre entre elles est généralement calculée de la manière suivante :

$$a = H / \text{tg} (61^\circ - \text{l'atitue du lieu}) \quad (\text{I.7})$$



**Figure I.4 Distance de séparation entre les lignes des panneaux**

Il existe des méthodes pour calculer et déterminer les pertes dues à l'ombre des obstacles éloignés qui mettent en relation leur hauteur avec les distances qui les séparent.

#### **I.2.4 Pertes dues à la saleté**

La saleté et la poussière s'accumulent sur les panneaux en raison de leur emplacement extérieur.

Les pertes dues à la saleté sont estimées à 5 % dans un environnement normal. Ce pourcentage augmente dans les environnements plus fréquentés tels que les installations situées à proximité de routes de terre ou de zones d'industrie lourde

#### **I.2.5 Modules de température**

Les modules photovoltaïques perdent environ 4% de leur puissance pour chaque augmentation de 10°C de leur la température de fonctionnement. Ce pourcentage varie légèrement en fonction de la technologie. La température de fonctionnement des modules photovoltaïques dépend de facteurs environnementaux tels que l'irradiation, la température ambiante et la vitesse du vent, ainsi que la position du module ou la ventilation de sa partie arrière. Cela implique que même si l'irradiation solaire accidentelle est identique, le même système photovoltaïque produira moins d'énergie dans un endroit chaud qu'un un endroit froid.

### **I.2.6 Pertes par câblage**

Les pertes de câblage sont dues à des pertes d'énergie causées par des chutes de tension à la fois dans le courant continu (DC) et dans le courant alternatif (AC), lorsque le courant circule dans un conducteur fait d'un matériau déterminé et placé dans une section déterminée. Ces pertes sont minimisées lorsque la section de câblage est correctement mesurée. Malgré cela, les pertes en courant continu peuvent atteindre 1,5% et les pertes en courant alternatif 3%.

### **I.2.7 Efficacité des équipements**

Tous les équipements qui constituent l'installation solaire photovoltaïque ont également un rendement qui influence l'installation. Les données de performance de l'équipement sont mises à disposition par le producteur.

Par conséquent, les onduleurs (dispositif qui convertit le courant continu en courant alternatif) ont tendance à avoir une efficacité d'environ 94 à 96% et les maximiseurs (contrôleur de charge de batterie avec Maximum Power Point Tracking technology) ont tendance à avoir une efficacité d'environ 98%.

En outre, le rendement global d'un banc de batteries peut être calculé de la manière suivante:

$$R = (1 - K_b) \cdot \left(1 - \frac{K_a \cdot N}{DOD}\right) \quad (I.8)$$

Où :

$K_b$  : coefficient de perte dû à l'efficacité de l'accumulateur.

- 0,05 dans les systèmes qui n'exigent pas de décharges puissantes.

- 0,1 dans les systèmes à fortes décharges.

$K_a$  : coefficient d'autodécharge journalière.

- 0,002 dans les batteries à faible autodécharge (Ni-Cd)
- 0,005 en batteries stationnaires (Pb-Ac)
- 0,012 dans les batteries à forte autodécharge (batteries de démarrage de voiture)

DOD : c'est la profondeur de décharge journalière 'Depth Of Discharge' (DOD). Elle ne dépassera pas 80% - elle se réfère à la capacité nominale de l'accumulateur

N : nombre de jours d'autonomie.

### **I.2.8 Détérioration des panneaux solaires**

Les panneaux photovoltaïques perdent leur efficacité au fil des ans de telle sorte qu'au bout de 20 ans, ils auront perdu environ 20 % de leur efficacité.

### **I.3 l'effet photovoltaïque**

La présence de lumière sur un semi-conducteur tel que le silicium (Si) génère des paires électron-trou.

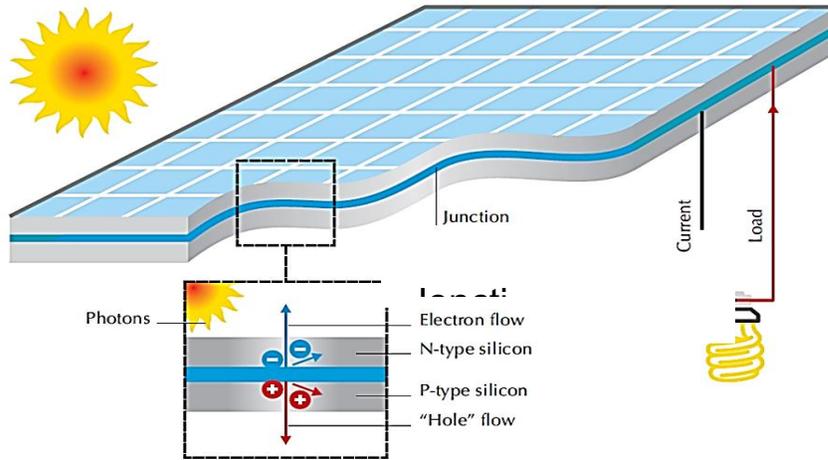
Les paires électron-trou sont séparées dans l'espace par un champ électrique interne créé en introduisant des impuretés spéciales dans le semi-conducteur.

Cette séparation crée des charges négatives d'un côté de l'interface et des charges positives de l'autre côté, ce qui génère une tension et un courant continu (CC) lorsqu'il est connecté à une charge.

Les cellules photovoltaïques sont interconnectées pour former des modules photovoltaïques d'une puissance pouvant atteindre plusieurs centaines de watts. Les modules photovoltaïques sont ensuite combinés pour former des systèmes photovoltaïques.

L'unité watt-crête est souvent utilisée pour exprimer les coûts ou le rendement du PV solaire, car le rendement d'une cellule PV varie en fonction de l'irradiation solaire et de la

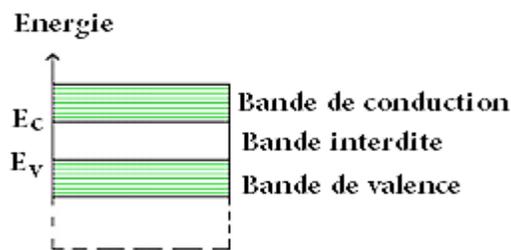
température ambiante. Par souci de simplicité, l'ouvrage utilise le terme watt pour désigner le watt-crête.



**Figure I.5 Principe de fonctionnement d'une cellule PV**

Le rendement de conversion d'une cellule solaire est défini comme le rapport entre la puissance de sortie de la cellule solaire par unité de surface ( $W/cm^2$ ) et le rayonnement solaire incident

### I.3.1 Semi-conducteurs intrinsèques :



**Figure I.6 Bandes d'énergies**

Les électrons situés sur la couche la plus éloignée du noyau, qui participent aux liaisons covalentes peuvent, sous l'effet de l'agitation thermique, devenir porteur de charge. Le diagramme énergétique est constitué de deux bandes (conduction et valence) séparé par une

bande interdite. Pour franchir cette bande l'électron doit acquérir de l'énergie (thermique, photon, ...) Mais le nombre d'électrons libres dans un semi-conducteur intrinsèque reste très faible. [4]

### I.3.2 Semi-conducteurs extrinsèques :

Pour augmenter la conductivité des semi-conducteurs on y introduit des impuretés. Ce procédé est appelé dopage.

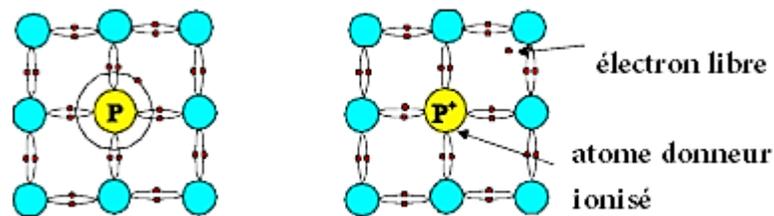


Figure I.7 : Dopage Type N

On remplace un atome de silicium par un atome pentavalent.

Quatre d'entre eux assurent les liaisons avec les atomes voisins de silicium et le cinquième resté disponible va être excité vers la bande de conduction très facilement par l'agitation thermique. D'où le nombre d'électron libre qui va fortement augmenter : dans ce cas le nombre de trou est très inférieur au nombre d'électron libre. On obtient ainsi un cristal dopé N (négatif).

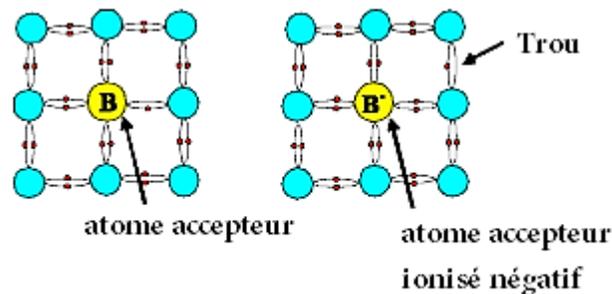


Figure I.8 Dopage Type P

De la même façon on introduit des atomes trivalents, ses trois électrons vont assurer les liaisons covalentes avec trois atomes voisins mais laisser un trou au quatrième. Ce trou se déplace de proche en proche dans le cristal pour créer un courant. Ici le nombre de trous est très supérieur au nombre d'électrons libres du cristal intrinsèque, on obtient donc un cristal dopé P (positif), les impuretés utilisées sont souvent du Bore. [4]

#### **I.4 Types de cellules solaires photovoltaïques**

L'électricité est produite dans des cellules solaires qui, comme on l'a vu, sont constituées de plusieurs couches de matériau semi-conducteur. Lorsque les rayons du soleil pénètrent dans les cellules solaires, le une force électromotrice est créée entre ces couches, ce qui provoque le flux de l'électricité. Plus l'intensité du rayonnement solaire est élevée, plus le flux d'électricité est important. Le matériau le plus courant pour la production de cellules solaires est le silicium. Le silicium est obtenu du sable et est l'un des éléments les plus courants de la croûte terrestre, il n'y a donc pas de limite à la disponibilité des matières premières.



**Figure I.9 cellule photovoltaïque**

##### **I.4.1 Différentes technologies de cellules solaires**

Il existe différents types de cellules photovoltaïques. Il est donc indispensable de connaître les particularités de chacune :

### **I.4.1.1 Technologies de la première génération à base de silicium cristallin**

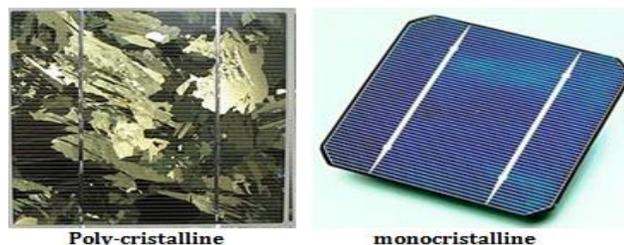
Considérée comme la technologie photovoltaïque la plus efficace et la plus dominante la première génération comprend le monocristallin et le poly cristallin. Le silicium monocristallin reste encore plus cher que le silicium poly cristallin mais permet d'obtenir un rendement plus élevé, avec près de 19.8% contre 24.7% de rendement en laboratoire [5] [6].

#### **I.4.1.1.1 Cellules monocristallines : [7]**

La cellule monocristalline est celle qui s'approche le plus du modèle théorique. Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Cependant pour arriver à ce résultat la fabrication est complexe et coûteuse en énergie, les rendements de conversion obtenue varient entre 14 et 16%.

#### **I.4.1.1.2 Cellules poly-cristallines :**

Contrairement à la cellule monocristalline, la cellule polycristalline n'a pas besoin d'un silicium aussi pur et ordonné. Pour fabriquer ce matériau, on refond tous les déchets provenant du tirage des monocristaux, on obtient des lingots qu'il faut ensuite scier en plaquettes. Les rendements de conversion industrielle qui étaient de l'ordre de 8 à 10% avant 1980 sont actuellement de 16 à 17% [12]. Il s'agit de la technologie la plus représentée sur le marché du photovoltaïque car elle allie à la fois des rendements de conversion élevés avec un coût de production faible par rapport à la filière silicium monocristallin voir la figure I.10.



**Figure I.10 Technologies de la première génération de cellules à base de silicium cristallin**

### **I.4.1.2 Technologies de la deuxième génération à base de couche-mince**

Les premiers essais de couches minces remontent au milieu du XX<sup>ème</sup> siècle avec de fins dépôts sur cristaux massifs puis finalement des structures complètement à base de couches minces [8].

#### **I.4.1.2.1 Cellules amorphes :**

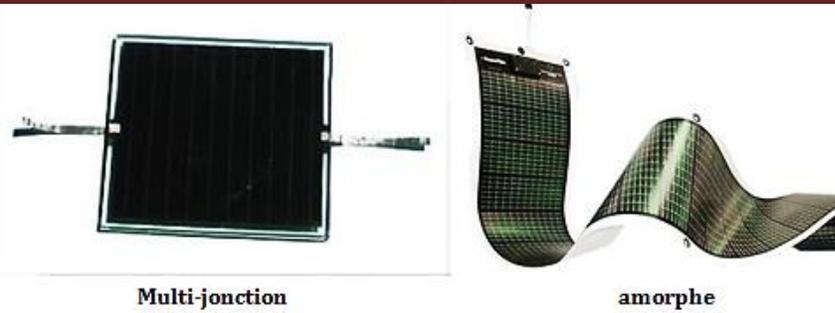
Le silicium lors de sa transformation, produit un gaz qui est projeté sur une feuille de verre. La cellule est gris très foncé ou marron. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites solaires. Les cellules amorphes ont un coût de production bien plus bas, mais malheureusement leur rendement n'est que 6 à 10%. Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium. C'est le silicium amorphe qu'on trouve le plus souvent dans les petits produits de consommation comme les calculatrices et les montres, mais aussi plus récemment sur les grandes surfaces utilisées pour la couverture des toits [9]

#### **I.4.1.2.2 Cellules multi-jonction**

Les cellules multi-jonction sont composées de différentes couches minces qui permettent de convertir différentes parties du spectre solaire et ainsi d'obtenir les meilleurs rendements de conversion. Elles ont un rendement inégalé de 32% à 39%, mais pas d'application commerciale.

#### **I.4.1.2.3 Cellule tandem**

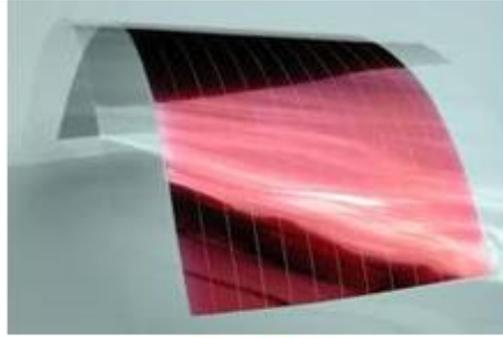
Empilement monolithique de deux cellules simples. En combinant deux cellules (couche mince de silicium amorphe sur silicium cristallin par exemple) absorbant dans des domaines spectraux connexes, on améliore le rendement théorique par rapport à des cellules simples distinctes, qu'elles soient amorphes, cristallines ou microcristallines. Elles ont une sensibilité élevée sur une large plage de longueur d'onde et un excellent rendement, mais le coût est élevé du à la superposition de deux cellules.



**Figure I.11 Technologies de la deuxième génération à base de couche-mince.**

#### **I.4.1.3 Technologie de la troisième génération « Les cellules organiques »**

Les cellules photovoltaïques organiques sont des cellules photovoltaïques dont au moins la couche active est constituée des molécules organiques. Tout comme leurs pendants inorganiques, les cellules solaires organiques utilisent l'effet photovoltaïque pour transformer l'énergie lumineuse en électricité. L'effet est basé sur les propriétés de matériaux semi-conducteurs. Dans un semi-conducteur inorganique, on peut facilement contrôler les champs internes avec le dopage, l'électron excité peut alors se déplacer jusqu'aux électrodes, générant ainsi un champ électrique externe. La situation est plus complexe dans un matériau organique à cause de la faible conductivité électrique, la faible constante diélectrique et la morphologie complexe qui empêchent un dopage contrôlé, et qui diminuent l'écrantage. Ainsi, dans ces matériaux, une charge est généralement confinée à une molécule ou au mieux quelques-unes. Les électrons excités restent ainsi liés aux trous, formant un exciton, et ne peuvent se séparer aux interfaces du dispositif. L'exciton peut également se recombiner après un certain temps, de façon radiative (en émettant de la lumière) ou non, détruisant ainsi les porteurs de charges. Elles ont un rendement de 5% à 8% , voir figure I.12.



Organique

Figure I.12 Technologie de la troisième génération « Les cellules organiques »

I.5 Modèle de cellule :

Une cellule photovoltaïque a un comportement équivalent à une source de courant shuntée par une diode (fig.I.13). Le modèle est complété par une résistance série  $R_s$  due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts face avant et arrière et une résistance parallèle ou shunt  $R_p$  qui provient des contacts métalliques et des résistances de fuite sur la périphérie de la cellule.

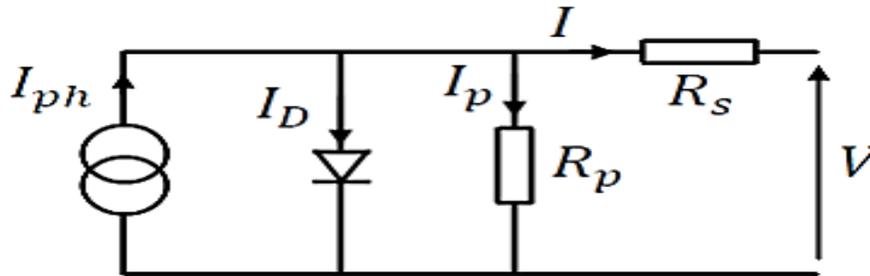


Figure I.13 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

$$I_{PV} = I_{ph} - I_{sat} \left[ \exp \left( \frac{e(V_{PV} + (I_{PV} * R_{ser}))}{nKT} \right) - 1 \right] - \frac{V_{PV} + (I_{PV} * R_{ser})}{R_{shu}} \quad (I.9)$$

Où  $I_{sat}$  est le courant de saturation,  $K$  est la constante de Boltzmann ( $1,381.10^{-23}$  J/K),

$T$  : est la température effective des cellules en Kelvin(K),

$e$  : est la charge de l'électron ( $e=1,6.10^{-19}C$ ),

$n$  : est le facteur d'idéalité de la jonction ( $1 < n < 3$ ),

$I_{PV}$  : est le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur,

$V_{PV}$  : est la tension aux bornes de cette même cellule,

$I_{ph}$  : est le photo-courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température ou bien courant de (court-circuit),

$R_{shu}$  : est la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction,

$R_{ser}$  : est la résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions.

### **I.6 Potentiel solaire en Algérie [10] :**

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose l'un des gisements solaires les plus importants du monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de  $1m^2$  est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 KWh/ $m^2$ /an au Nord.

En 2011, le ministère algérien de l'énergie et des mines a publié son programme sur les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique qui vise à porter la part des énergies renouvelables utilisées pour la production d'électricité à 40 % de la demande intérieure d'ici 2030. Le plan prévoit 800 MW d'installations jusqu'en 2020 et un total de 1,8 GW d'ici 2030. En février 2014, le ministère a introduit deux régimes FiT, l'un pour les systèmes entre 1 et 5 MW et l'autre pour les systèmes de plus de 5 MW. On estime qu'environ 5 MW de petits systèmes décentralisés et quelques systèmes plus importants de plusieurs kW ont été installés fin 2013. Selon le Centre de développement des énergies renouvelables (CDER), le programme national d'énergie

renouvelable pour l'Algérie (2015-2030) a maintenant un objectif de 22 GW d'énergie renouvelable avec une part de 13,5 GW d'énergie photovoltaïque d'ici 2030. Aures Solaire, une joint-venture 51/49 entre la société algérienne Condor Electronics et Vincent Industrie (France), a ouvert en avril 2017 une usine de modules solaires de 30 MW située dans la zone industrielle d'Ain Yagout. Condor Electronics possède et exploite déjà une usine de modules de 75 MW dans la même zone industrielle depuis 2013. En janvier 2017, le gouvernement a adopté un décret pour lancer un appel d'offres pour 4 GW de modules solaires PV et en mars 2017, le cadre réglementaire pour la mise en œuvre a été publié au Journal officiel [Jou 2017]. Les centrales solaires devraient être construites dans les Hautes Plaines du nord et du sud de l'Algérie. Le premier appel d'offres, d'une capacité de 150 MW, a été clôturé en juin 2019. Cependant, la Commission de régulation de l'électricité et du gaz (CREG) n'a reçu que huit offres pour une capacité combinée de 90 MW. En 2015 et 2016, des systèmes photovoltaïques d'environ 350 MW ont été nouvellement installés, mais en 2017 et 2018, seuls quelques nouveaux systèmes ont été connectés au réseau. On estime que la capacité PV totale - en réseau et hors réseau - n'était que d'environ 420 MW à la fin de 2018.

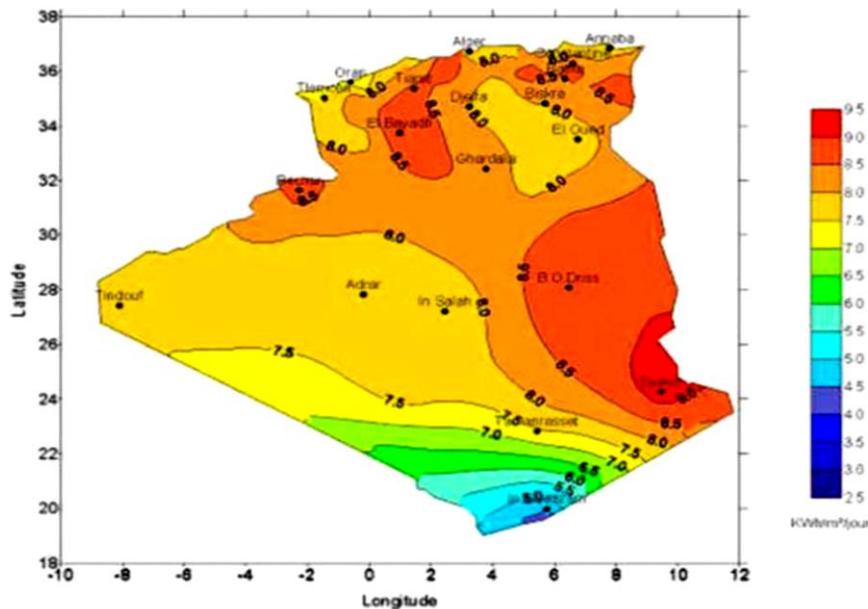
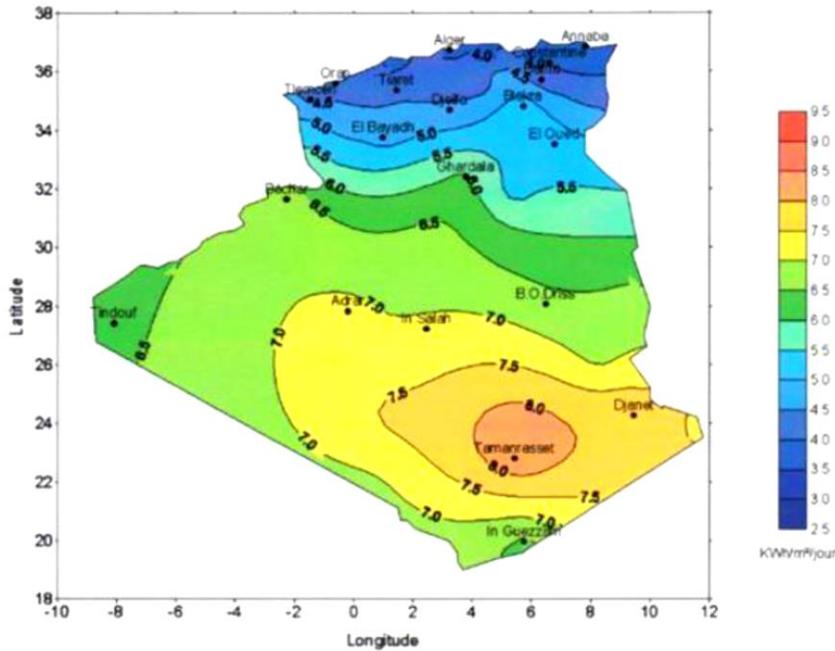


Figure 1.14 Irradiation directe journalière KWh/m<sup>2</sup>/jour été Source: CDER



**Figure 1.15 Irradiation directe journalière KWh/m<sup>2</sup>/jour hiver Source: CDER**

### **I.7 Structures de support pour les panneaux solaires**

La structure soutient le module photovoltaïque et donne l'inclinaison nécessaire pour atteindre une efficacité optimale. Elle est également chargée de fixer les modules PV contre le vent rafales et offrir un soutien aux interconnexions de câblage.

Les structures de support les plus couramment utilisées pour les panneaux photovoltaïques sont constituées de panneaux anodisés en aluminium ou en acier galvanisé. Les structures de support en aluminium anodisé pèsent moins et sont plus faciles à transporter.

Il existe différents types de structures :

- Fixe
- Suivi solaire

---

### I.7.1 Structure fixe

Ces types de structures coplanaires et inclinées sont fixées en permanence.

- **Les structures coplanaires** sont situées parallèlement à la surface où les panneaux sont installés afin d'optimiser leur intégration. Il est toujours conseillé de laisser un certain espace entre la surface et la structure afin de permettre une bonne ventilation des panneaux, en évitant la surchauffe.



**Figure 1.16** structures coplanaires

- **Les structures inclinées** donnent l'inclinaison idéale pour l'installation. Ces structures peuvent avoir deux positions qui permettent de changer l'angle d'inclinaison manuellement en hiver ou en été.



**Figure 1.17** structures inclinées

### I.7.2 Structure de suivi du soleil

Ce type de structure peut suivre un axe, le mouvement ne se faisant que le long d'un axe. (par exemple d'Est en Ouest pendant une journée), ou deux axes pour modifier également l'inclinaison.

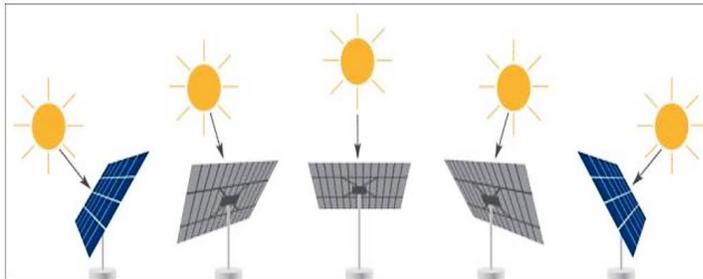


Figure 1.18 Structure de suivi du soleil



Les structures de poursuite du soleil augmentent la production photovoltaïque jusqu'à 40% (selon la structure de poursuite) par rapport à une installation fixe, figure 17.

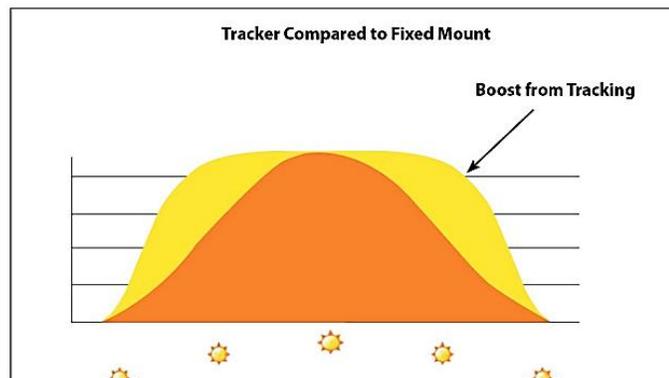


Figure 1.19 Production journalière d'électricité. Comparaison entre le tracker et le support fixe. Source : First Solar

### I.8 Régulateur/maximiseur

Les **régulateurs** sont les équipements électroniques qui contrôlent la charge de la batterie. Ils empêchent les batteries d'avoir une charge trop élevée ou trop faible. Les régulateurs essaient

---

également d'optimiser la durée de vie des batteries sensibles. Ils ont tendance à avoir des tensions d'entrée de 12 ou 24V, ce qui limite leur utilisation avec certains types de panneaux.

**Mppt Recharge Régulateur**(Maximum Power Point Tracking - MPPT),qui signifie en Français "Recherche du Point de Puissance Maximum ». Sont une évolution des contrôleurs de charge traditionnels. Ces convertisseurs de puissance analysent le flux d'énergie des panneaux photovoltaïques et le comparent à leur algorithme interne pour en tirer le meilleur parti possible. Ils permettent d'utiliser sans problème les panneaux, habituellement utilisés dans les installations connectées au réseau, et ils peuvent même atteindre une tension d'entrée de 150Vcc.

### **I.9 Batteries**

Une batterie est un système de stockage d'énergie et permet d'utiliser l'énergie stockée lorsqu'il n'y a pas de soleil.

De nos jours, il existe différents types de batteries qui dépendent de leur application. Les plus utilisées pour les installations solaires sont les suivantes :

**-Batterie monobloc** : elle est utilisée dans les applications à faible demande telles que les résidences secondaires, les bateaux ou les caravanes. Leur durée de vie est d'environ 400 cycles à 75 % de décharge. Elles sont économiques et nécessitent peu d'entretien.



**Figure 1.20** Batterie monobloc

**-Batteries monoblocs GEL et AGM:** ces batteries peuvent être en gel ou plomb-acide VRLA 'ValveRegulated Lead Acid'. Ils nécessitent peu d'entretien car ils recombinent les gaz et ne produisent pas de perte d'eau. Leur principal avantage est leur faible auto-décharge, ils peuvent donc être maintenus à une charge maximale pendant 6 mois sans perte de charge importante. Ces types de batteries sont parfaits pour les navires, les caravanes ou les installations solaires car ils n'émettent pas de gaz pendant le fonctionnement.



**Figure 1.21** Batteries monoblocs AGM

**-Batteries monobloc semi-stationnaires :** elles sont utilisées pour l'énergie solaire et les applications à haut cycle. Il existe deux technologies : la plaque plate ou la plaque tubulaire. La différence entre elles est que les technologies à plaques tubulaires dupliquent la durée de vie de la plaque plate.



**Figure 1.22** Batteries monobloc semi-stationnaires

**-Batteries OPZS :** ce sont les plus utilisées dans les installations solaires photovoltaïques en raison de leur faible maintenance et aussi parce que le niveau d'électrolyte est visible à travers leurs parois. Elles sont préparées pour des décharges profondes (1500 cycles à 80% de décharge) mais si elles ne sont pas correctement dimensionnées, elles peuvent perdre la moitié de cette durée de vie.



**Figure 1.23** batteries OPZS

**-Les batteries OPZV :** ce sont des batteries à plaques tubulaires dont l'électrolyte est sous forme de gel. Elles sont scellées et peuvent donc être installées dans n'importe quelle position. Grâce à leur faible sulfatation, elles ont un rendement plus élevé pendant leur durée de vie. Ce type de batteries est parfait pour les installations de télécommunications ou les endroits où le niveau de l'eau n'est pas contrôlé. Elles sont plus chères que les batteries OPZS, mais elles ont un rendement énergétique plus élevé.



**Figure 1.24** batteries OPZV

**-Batteries au nickel-fer:** elles ont été brevetées par Edison au 20e siècle pour être utilisées dans la voiture électrique. Ce sont des batteries à longue durée de vie qui peuvent durer 50 ans en raison de l'électrolyte qu'elles ne détruisent pas la batterie. En ne la changeant que tous les 7 ou 8 ans, la batterie est renouvelée. Ils présentent un faible coût énergétique même si leur prix est plus élevé que les précédents. De nos jours, les chercheurs se concentrent sur ce type de batteries, dans lesquelles les temps de charge (2 minutes) et de décharge (30 secondes) sont réduits.

**-Batteries lithium-ion:** les avantages de ce type de batteries sont leur faible rapport poids / volume avec leur capacité de stockage élevée et leur faible taux d'autodécharge. Les batteries au lithium-ion sont les plus couramment utilisées dans les appareils électroniques (téléphones portables et ordinateurs) et, dernièrement, dans le développement du véhicule électrique et des équipements compacts qui permettent au logement d'être auto-efficace. Certains inconvénients sont leurs coûts élevés, leur durée de vie n'est pas assez longue et leur faible nombre de charges.

-Les batteries solaires sont adaptées au cyclage quotidien et à la charge lente par panneaux solaires. Leur durée de vie est considérablement augmentée si la profondeur de décharge quotidienne est inférieure à 40% de la capacité totale pour les batteries plomb et jusqu'à 80% pour les batteries lithium.

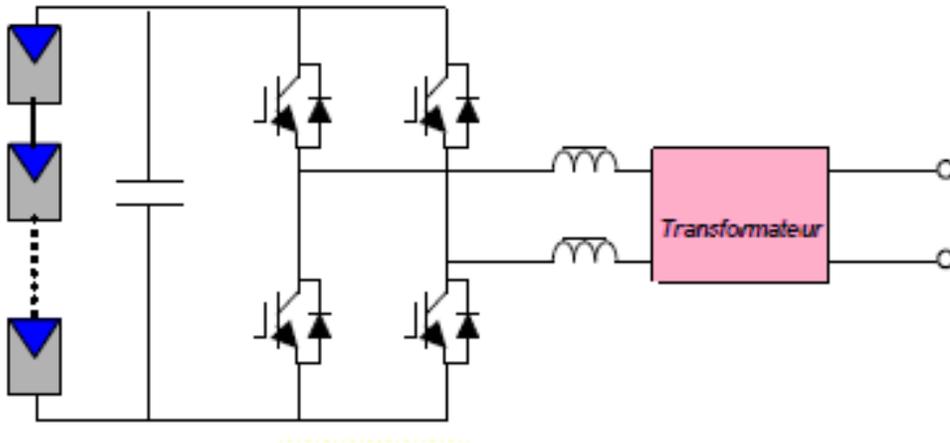
**Exemple** : Une batterie de 12V / 100Ah au plomb à une capacité utile de 40Ah (480Wh) avec une durée de vie d'environ 1000 cycles alors qu'une batterie lithium de 12V / 100Ah à une capacité utile de 80Ah (960Wh) avec une durée de vie d'environ 2500 cycles soit le double d'énergie disponible pour une durée de vie 2 fois et demi supérieure.

### **I.10 Onduleur photovoltaïque :**

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion d'énergie électrique de la forme continue (DC) à la forme alternative (AC).



**Figure I.25** Symbole d'un onduleur



**Figure I.26** Schéma de principe d'un onduleur monophasé

### I.11 Champ de modules PV

Les modules peuvent être montés en série, en parallèle ou bien en série-parallèle.

#### I.11.1 Assemblage série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant.

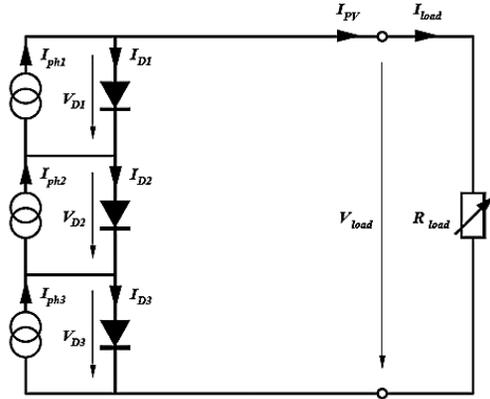
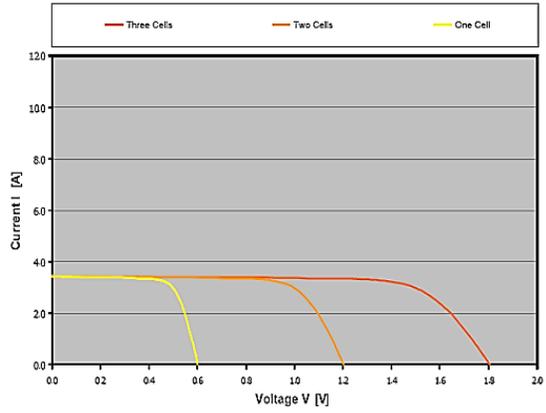


Figure I.27 Schéma d'un assemblage



série

### I.11.2 Assemblage parallèle

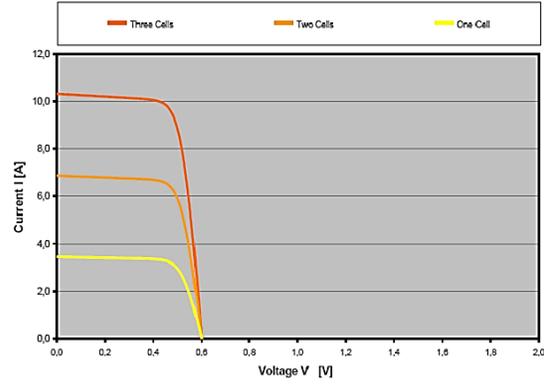
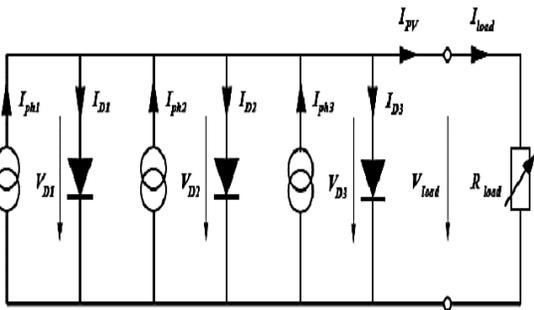


Figure I.28 Schéma d'un assemblage parallèle

### I.11.3 Assemblage Mixte

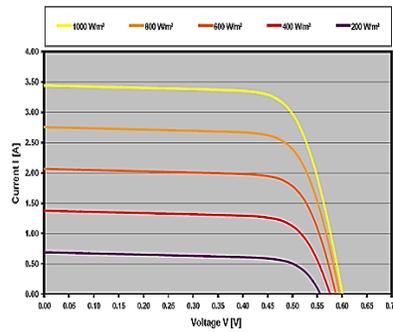
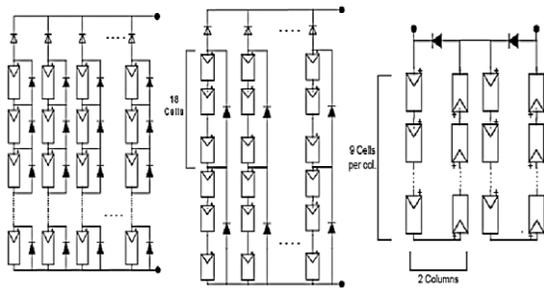


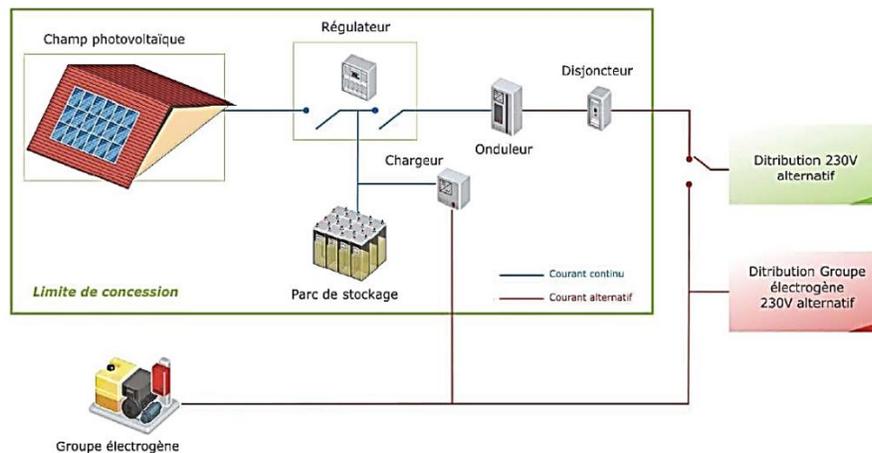
Figure I.29 Schéma d'un assemblage mixte

1) **Tableau 1:** Les modules PV

<b>En série</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les tensions s'ajoutent</li> <li>• Le courant reste celui d'un seul module</li> </ul>
<b>En parallèle</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La tension reste constante</li> <li>• Les courants de chaque module s'ajoutent</li> </ul>
<b>en série- parallèle</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pour obtenir la tension et le courant (puissance) souhaites</li> </ul>

**I.12 Différents types des systèmes photovoltaïques**

**I.12.1 Systèmes hybrides individuels [11]:**



**Figure I.30** Les systèmes hybrides individuels

**I.12.2 Systèmes autonomes avec batterie d'accumulateurs [12]:**

Applications principales : électrification habitat, télécommunication, signalisation routière, etc.

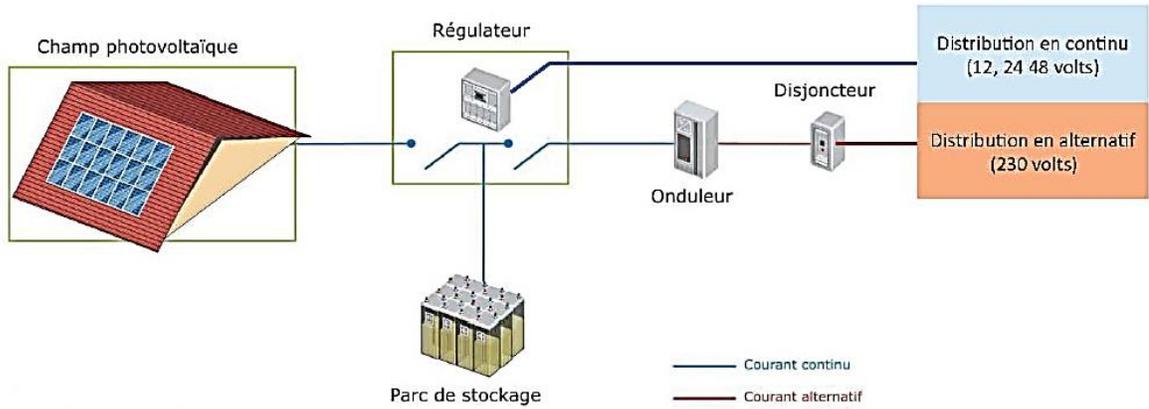


Figure I.31 Systèmes autonomes avec batterie d'accumulateurs

### I.12.3 Systèmes PV raccordés réseau

#### I.12.3.1 Vente totale

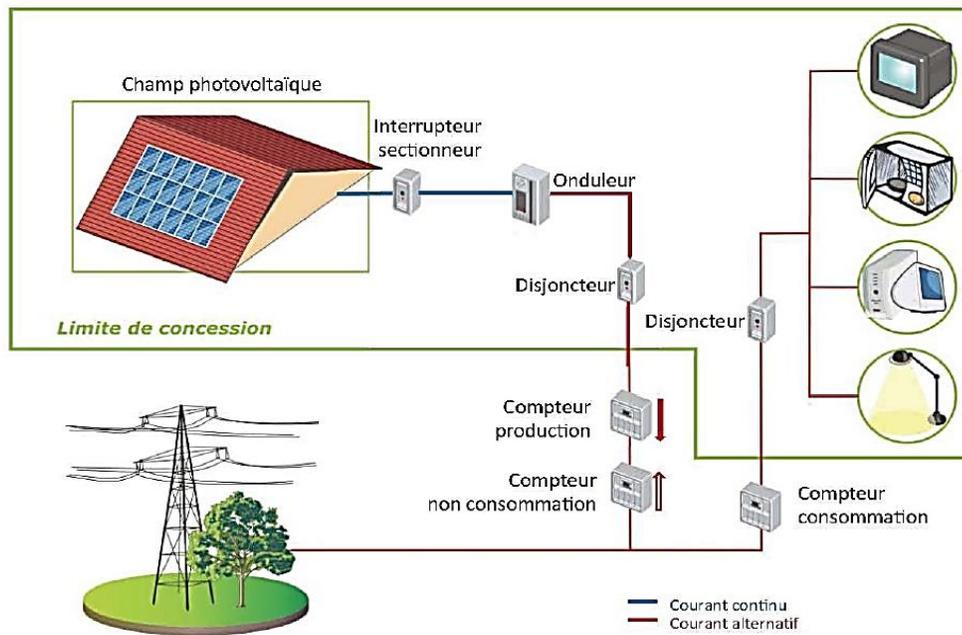


Figure I.32 production de l'énergie photovoltaïque avec la vente totale

### I.12.3.2 Vente du sur plus

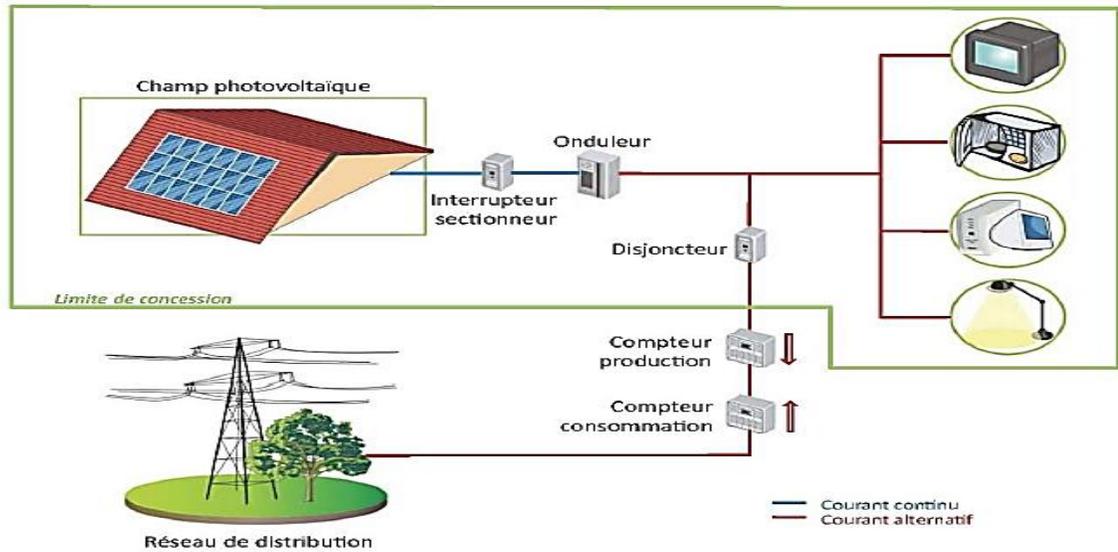


Figure I.33 Production de l'énergie photovoltaïque avec la vente du sur plus

### I.12.4 Systèmes PV pour le pompage d'eau

#### I.12.4.1 Types de pompes

##### I.12.4.1.1 Pompe volumétrique

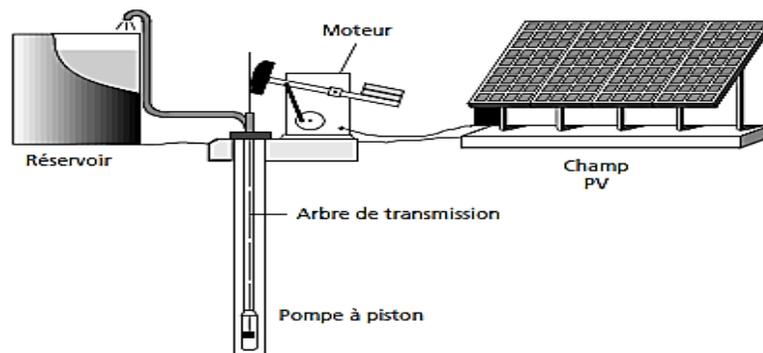


Figure I.34 Pompe à piston (Jack pump): Pour de grandes profondeurs et de petits débits d'eau [5]

#### I.12.4.1.2 Pompe centrifuge

Pompe submersible centrifuge à étages multiples

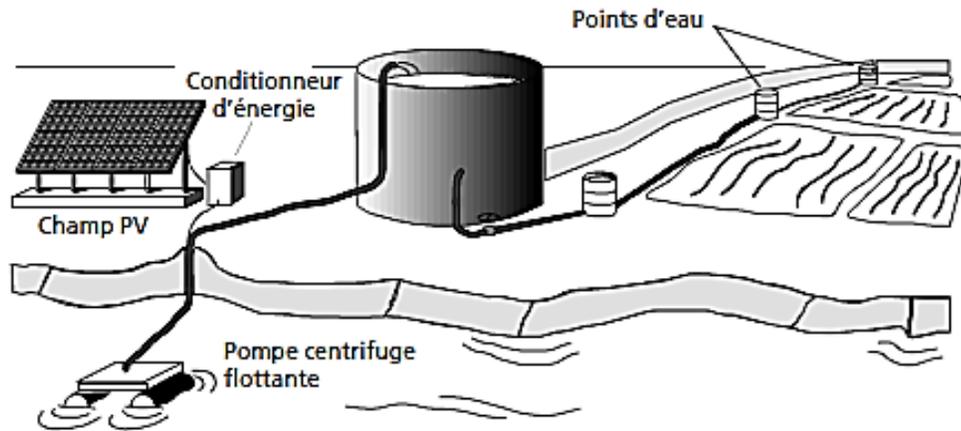


Figure I.35 Pompe centrifuge flottante

### I.13. Conclusion

Le PV est en plein essor, elle permet beaucoup d'avantages pour les systèmes isolés. Le rendement a beaucoup augmenté depuis les débuts du PV. Mais aujourd'hui, les chercheurs se tournent davantage vers l'amélioration de la durée de vie des panneaux. Malgré tout, elle ne s'est pas encore imposée comme l'énergie du futur.

Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes notions qui entrent dans la constitution d'un système de captage photovoltaïque. Aussi que les principes de fonctionnement de chaque élément, Une fois la pose des panneaux solaires effectuée et avant l'étape de mise en service, il faut acheminer et transformer l'énergie produite vers la charge alternatif et ça c'est le rôle de l'onduleur qu'on va présenter dans le chapitre II.



## Chapitre II

# Généralité sur les différents types d'onduleurs

## 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 [13].

Les onduleurs de tension constituent une fonction incontournable de l'électronique de puissance. Ils sont présents dans les domaines d'application les plus variés, dont le plus connu sans doute celui de la variation de vitesse des machines à courant alternatif. La forte évolution de cette fonction s'est appuyée, d'une part sur le développement des composants à semi-conducteur entièrement commandés, puissants, robuste et rapides et d'autre part, sur l'utilisation quasi-généralisée des techniques dites de modulation de largeur d'impulsion [14], ainsi que le progrès réalisé dans le domaine de la micro-informatique.

Malgré leurs nombreux avantages, les onduleurs conventionnels les présentent certains inconvénients tels que:

- ✓ l'usage limité aux applications de faibles et de moyennes puissances seulement.
- ✓ la détérioration prématurée des roulements causée par l'apparition des tensions harmoniques à l'arbre du moteur.

Pour surmonter ces problèmes, un nouveau type d'onduleur a été introduit, en l'occurrence, l'onduleur multi-niveaux. Ce type d'onduleur présente plusieurs avantages, parmi les plus importants on mentionne [15]:

- ✓ il peut générer des tensions très proche de la sinusoïde avec une fréquence de commutation égale à celle de la fondamentale ;
- ✓ les performances spectrales des formes d'ondes des grandeurs de sortie d'un onduleur multi-niveau sont supérieures à celles d'un onduleur à deux niveaux [16].
- ✓ les formes d'ondes des grandeurs de sortie d'un onduleur multi-niveau limitent

naturellement les problèmes des surtensions.

- ✓ il est bien adapté aux moteurs de moyennes et de grandes puissances.

## II .2 . ONDULEUR CLASSIQUE À DEUX NIVEAUX DETENSIONS :

L'onduleur classique à deux niveaux de tension est représenté sur la figure (II .1).

Il est constitué de trois bras de commutation à transistors. Chaque bras composé de deux cellules comportant chacune une diode et un transistor qui travaillent en commutation forcée. Tous ces éléments sont considérés comme des interrupteurs idéaux. En mode command able, le bras d'onduleur est un commutateur à deux positions qui permet d'obtenir à la sortie deux niveaux de tension [17], [18].

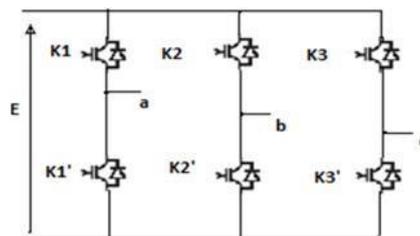


Figure. II . 1 : Schéma d'un onduleur usuel à 2 niveaux

Pour un convertisseur à 2-niveaux de tensions. Nous avons deux séquences de fonctionnement possible permettant de générer les deux-niveaux de tensions:

### II .2.1 Séquences 1: Génération du niveau maximum:

Dans ce cas, l'interrupteur K1 est passant et K1' est bloqué comme le montre la figure (II .2-a). La tension de sortie  $V_a$  est:  $V_a = +E$ . La tension inverse appliquée à l'interrupteur K1' vaut:  $V_{K1'} = +E$ .

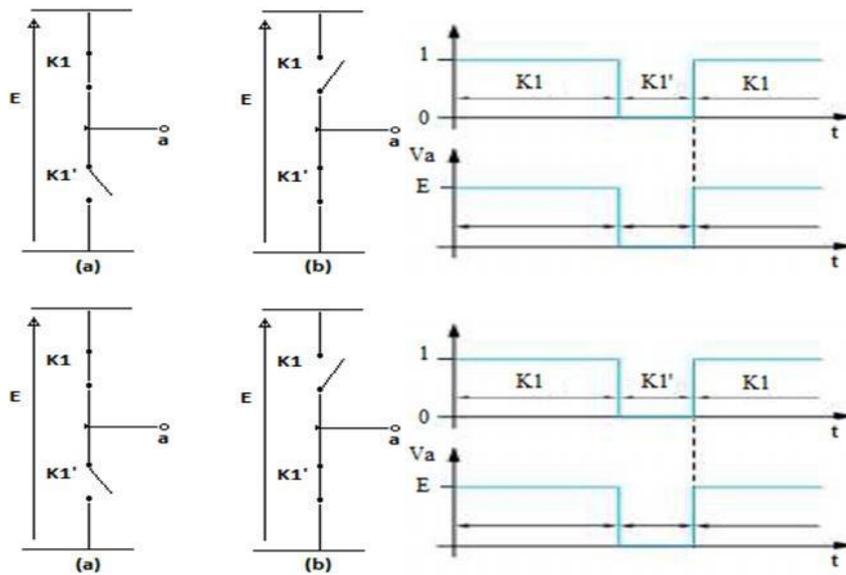


Figure II.2 : Séquences de fonctionnement d'un bras de l'onduleur à deux niveaux

### II 2.2 Séquences 2 : Génération du niveau minimum:

Dans ce cas, l'interrupteur K1 est bloqué et K1' est passant comme le montre la figure (II2-b).

La tension de sortie Va est:  $V_a = 0$ . La tension inverse appliquée à l'interrupteur K1 vaut:  $V_{K1} = +E$ .

Les 2 états ou séquences de commutation possibles sont résumés au tableau (II. 1).

K1	K1'	Va
1	0	E
0	1	0

Tableau II .1. : États possibles de l'onduleur usuel à 2niveaux

L'avantage de cette topologie 2 niveaux est son nombre réduit de composants ainsi que la mise en œuvre simplifiée de leurs commandes. Le revers de cette structure est la présence d'harmoniques dans la tension résultante qui dégrade la qualité de l'énergie (fort taux de distorsion harmonique ou THD).

Les onduleurs à deux niveaux sont généralement limités en tension et en puissance. Afin de palier à ces inconvénients, les onduleurs multi niveaux commencent à être utilisés dans le domaine des puissances allant jusqu'à plus de 10 MVA avec des tensions qui peuvent facilement atteindre plus de 6 kV.

### II.3. Intérêt des onduleurs multi-niveau:

Un convertisseur statique est dit « multi-niveaux » lorsqu'il génère une tension découpée de sortie composée d'au moins trois niveaux. Ce type de convertisseur présente essentiellement deux avantages. D'une part les structures multi-niveaux permettent de limiter les contraintes en tension subies par les interrupteurs de puissance: chaque composant, lorsqu'il est à l'état bloqué, supporte une fraction d'autant plus faible de la pleine tension de bus continu que le nombre de niveaux est élevé .D'autre part, la tension de sortie délivrée par Les convertisseurs multi-niveaux présente d'intéressantes qualités spectrales. Le fait de multiplier le nombre de niveaux intermédiaires permet de réduire l'amplitude de chaque front montant ou descendant de la tension de sortie. Alors l'amplitude des raies harmoniques est par conséquent moins élevée. Dans le cas de modulation de largeur d'impulsion, le recours à un convertisseur multi-niveaux associé à une commande judicieuse des composants de puissance permet en outre de supprimer certaines familles de raies harmoniques [19].

En général les onduleurs de tension multi-niveaux peuvent être vu comme des synthétiseurs de tension, dans lesquels la tension de sortie est synthétisée de plusieurs niveaux de tension discrets .La figure II .3 représente les trois topologies principales des onduleurs multi-niveaux les plus récentes.

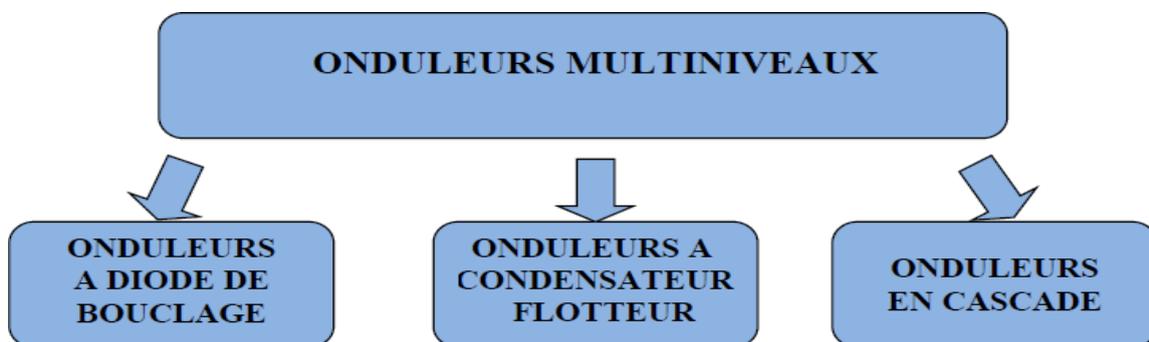


Figure II.3 Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux

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

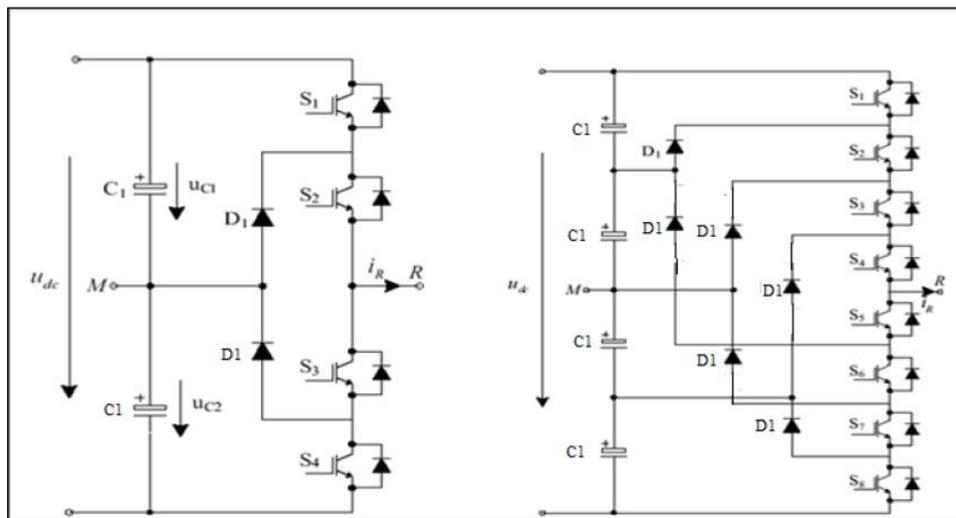
L'onduleur de tension multi-niveaux possède trois ou plusieurs niveaux. Le but de cette Partie est de donner une vue générale des trois topologies de base des onduleurs multi-niveaux:

- ✓ La topologie à diode de bouclage(NPC),
- ✓ La topologie au condensateur flotteur (à cellules imbriquées),
- ✓ La topologie en cascade,

## II .5.Onduleur multi niveaux à diode de bouclage :

La première topologie la plus pratique d'onduleur de tension multi niveaux est le NPC (Neutral Point Clamped). Cette topologie a été initialement proposé par A. Nabac en 1981 pour la génération de Niveaux de tension .La figure II.4représente la structure d'un convertisseur triphasé à potentiel distribué, dans laquelle les diodes sont utilisés pour réaliser la connexion avec le point de référence 0.afin d'avoir une tension de 220 V, cependant ces diodes non seulement augmentent le cout de ce type du convertisseur mais créent un problème d'encombrement.

Pour l'obtention d'une tension de N niveaux, N-1 capacités. Les tensions aux bornes des condensateurs sont toutes égales à  $E / (N-1)$ , E est la tension totale du bus continu. Chaque couple d'interrupteur (STD, STD') forme une cellule de commutation, les deux interrupteurs sont donc commandés de façon complémentaire [19].



a) NPC trois niveaux

b) NPC cinq niveaux

Figure II. . 4 Topologies d'onduleurs NPC

Cette topologie présente plusieurs avantages dont quel que-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.

Par contre, 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 capables de supporter le courant de la pleine charge.
- ✓ Différents calibres pour les appareils de commutation sont nécessaires en raison de leur conduction cyclique.

Le maintien de l'équilibre de la charge des condensateurs demeure toujours une question ouverte pour les topologies des onduleurs NPC avec plus de trois niveaux. Bien que le l'onduleur NPC à trois niveaux fonctionne avec un facteur de puissance élevé, il est employé surtout dans les circuits de compensation. Cela est dû au problème d'équilibrage des capacités [20].

## **II.6. Onduleur à trois niveaux de type NPC :**

### **II.6.1 Structure :**

L'idée de base de l'onduleur NPC est l'obtention d'une tension de sortie à trois niveaux par la superposition de deux interrupteurs élémentaires alimentés chacun par une source de tension continue distincte.

La figure II. 5 représente la structure topologique d'un onduleur triphasé à trois niveaux.

Elle est composée de trois bras monophasés [21]. A partir de la source principale de tension continue,  $E$ , à l'aide d'un diviseur de tension capacitif formé par les condensateurs de filtrage  $C_1$  et  $C_2$  de même capacité, on obtient deux sources secondaires de tension continue délivrant chacune une demi-tension ( $E/2$ ). Cette structure crée alors un point neutre ( $o$ ) entre les deux condensateurs. Ces derniers sont identiques de manière à éviter le déséquilibre de charge ( $C_1=C_2$  est-à-dire  $U_{C1}=U_{C2}$ ).

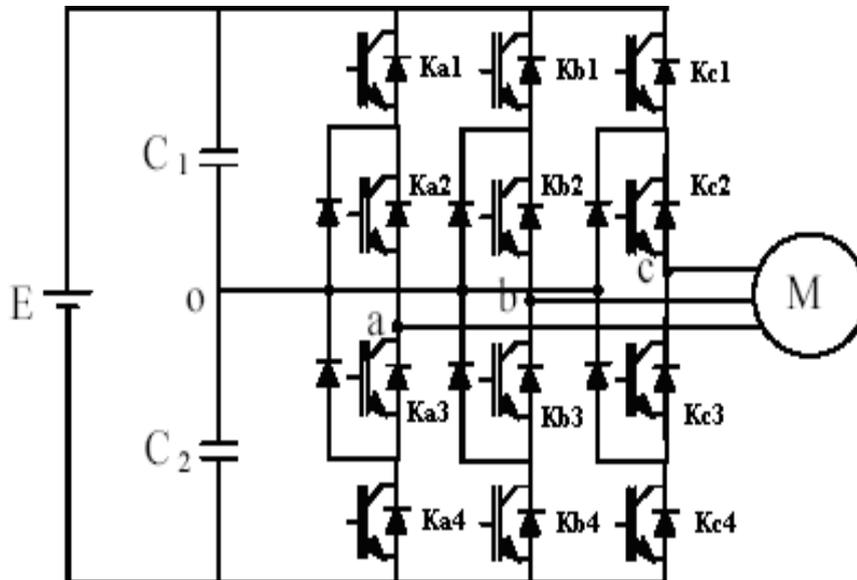


Figure II .5 : Structure d'un onduleur triphasé à trois niveaux de type NPC

Chaque demi-bras de l'onduleur se compose de deux interrupteurs ( $K_{ij}$ ) en série avec leur point commun relié par une diode de bouclage au point neutre des sources ( $o$ ). Une diode en anti-parallèle est montée sur chaque interrupteur pour assurer la réversibilité des courants dans la charge.

L'onduleur multi-niveaux de type NPC permet d'avoir une tension plus proche de la sinusoïde que celle issue de l'onduleur classique à deux niveaux. Il permet également, par la mise en série des interrupteurs, une meilleure maîtrise des contraintes en tension sur les composants.

## II. 6.2 Principe de fonctionnement :

L'onduleur triphasé à trois niveaux est montré sur la figure II.6 qui représente les schémas de principe de l'une des topologies des onduleurs triphasés à structure NPC. Grâce à la symétrie de ces derniers, on considère un seul bras dont la structure est représentée par la figure II.6.

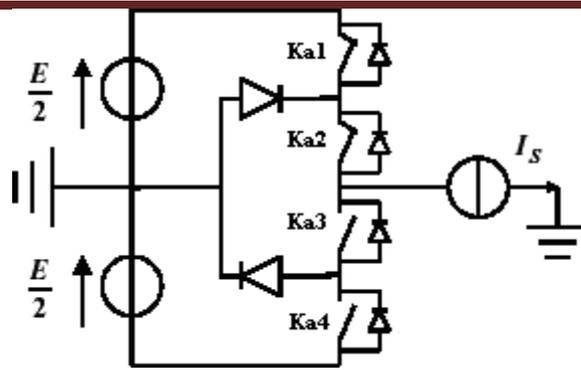


Figure II. 6 : Bras d'un onduleur NPC à trois niveaux

Il faut déterminer les valeurs que peut prendre la tension simple  $V_{ao}$  entre la borne ( $a$ ) de la charge et le point neutre  $o$ . Cette tension est entièrement définie par l'état (0 ou 1) des quatre interrupteurs  $K_{a1}$ ,  $K_{a2}$ ,  $K_{a3}$  et  $K_{a4}$  du bras.

Sur les  $2^4=16$  configurations possibles, seules trois configurations sont mises en œuvre. Toutes les autres séquences ne sont pas fonctionnelles, et sont donc à éviter. En effet, elles provoquent, soient, des court-circuits des sources de tension continue, soient, elles provoquent la déconnexion de la charge.

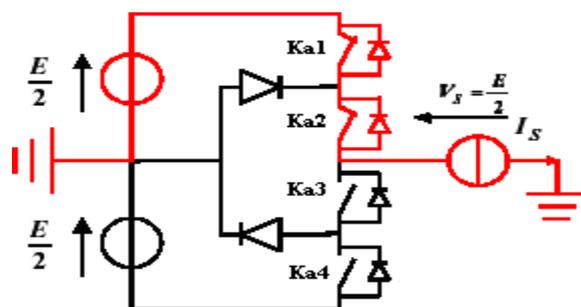
**II .6.2.1 .Premier configuration {1100} :**

$K_{a1}, K_{a2}$  sont passants et  $K_{a3}, K_{a4}$  sont bloqués (voir la figure II .7), on a la valeur de la tension simple de sortie est :

$$V_{ao} = +E/2 \tag{II .1}$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{Ka3} = V_{Ka4} = +E/2 \tag{II .2}$$



FigureII. 7 : 1<sup>ère</sup> configuration du 1<sup>er</sup> bras

**II .6.2.2 Deuxième configuration {0110} :**

$K_{a2}, K_{a3}$  sont passants et  $K_{a1}, K_{a4}$  sont bloqués (voir la figure II.8), le point  $a$  est relié directement au point neutre  $o$ . Alors, la tension de sortie  $V_{ao}$  est nulle:

$$V_{ao} = 0 \quad (\text{II .3})$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{Ka1} = V_{Ka4} = +E/2 \quad (\text{II .4})$$

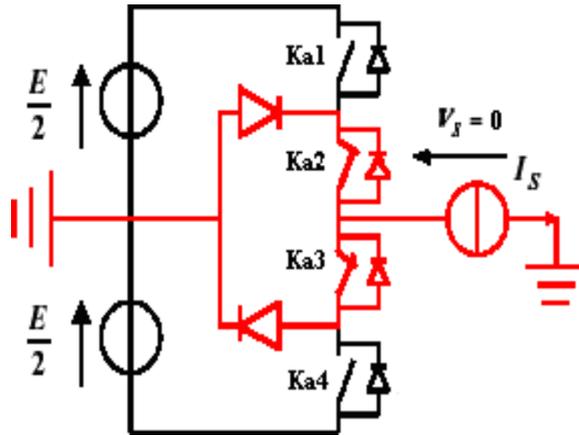


Figure II .8 : 2<sup>ème</sup> configuration du 1<sup>er</sup> bras

### II .6.2.3 Troisième configuration {0011}

$K_{a3}, K_{a4}$  sont pas saints et  $K_{a1}, K_{a2}$  sont bloqués (voir la figure II .9), on a la valeur de la tension simple de sortie est :

$$V_{ao} = -E/2 \quad (\text{II .5})$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{Ka1} = V_{Ka2} = +E/2 \quad (\text{II .6})$$

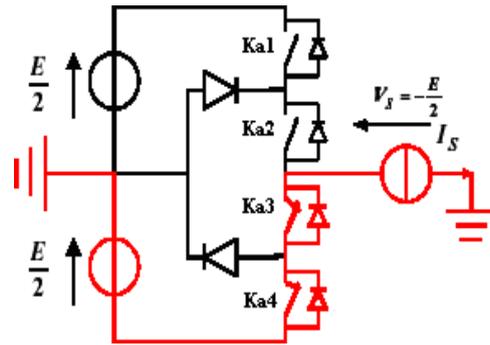


Figure II. 9 : 3<sup>ème</sup> configuration du 1<sup>er</sup> bras

Le tableau II .2représente la tension de sortie  $V_{ao}$  d'un onduleur NPC à 3 niveaux en fonction de l'état des interrupteurs [22][23] Outre les variations du potentiel du point milieu, la tension aux bornes des interrupteurs de puissance n'excède jamais la moitié du bus d'entrée

Etat des interrupters				Tension de sortie $V_a$
$K_{a1}$	$K_{a2}$	$K_{a3}$	$K_{a4}$	
1	1	0	0	$E/2$
0	1	1	0	0
0	0	1	1	$-E/2$

Tableau II .2 : Table de commutation de l'onduleurNPC3 niveaux

Pour visualiser l'enchaînement des configurations décrites ci-dessus, la figure(II. 10)représente les signaux de commande de chaque interrupteur, ainsi que la forme d'onde de la tension de sortie  $V_{ao}$

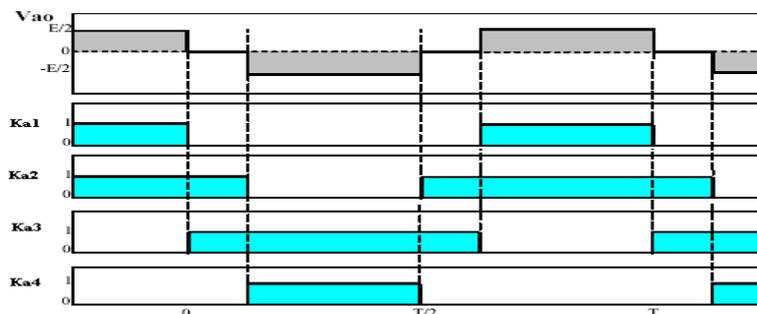


Figure II.10 : Forme d'onde de la tension de sortie d'un bras d'onduleur à trois Niveaux de type NPC

La structure de l'onduleur à trois niveaux limite à  $E/2$  la tension imposée à chaque interrupteur lorsqu'il est bloqué, alors que dans la structure classique de l'onduleur, cette tension vaut la tension continue complète  $E$ . C'est cette caractéristique de l'onduleur à trois niveaux qui permet de monter puissance, dans le cas des applications de forte puissance.

Donc, la tendance vers l'augmentation du nombre de niveaux est dictée par le besoin de tensions plus élevées pour les applications de forte puissance. Ainsi que, plus le nombre de niveaux augmente, la tension de sortie en forme d'escalier possède plusieurs paliers. Ceci permet de mieux approcher la sinusoïde.

## II .7.Onduleur multi niveaux à condensateurs flottants :

Dans la topologie multi niveaux proposée par T.Meynar de TH.Fochen1992.La structure de ce convertisseur est similaire à celle de l'onduleur à diode de bouclage sauf qu'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.

Dans la topologie suivante (voir la figure II.11), on représente l'onduleur à condensateur flottant à trois et cinq niveau.

Ce type de convertisseur présente plusieurs avantages:

- ✓ Le concept de condensateur Flottant peut être appliqué 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 uni directionnel 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 [26].

Cette topologie présente quelque inconvénients, 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 en ' est pas in trins égueulement tolérante aux pannes [24].
- ✓ Contraire ment 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 Ya un potentiel de résonance parasite entre les condensateurs dé couplés [26].

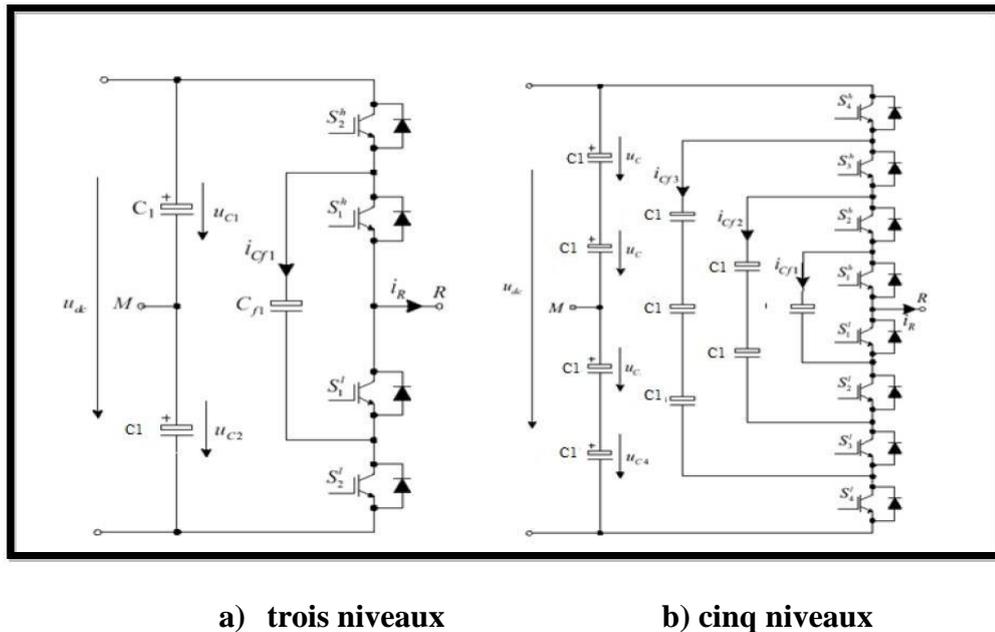


Figure. II .11 : Topologies d'onduleurs NPC à condensateur Flottant

## II .8.Onduleurs multi niveaux en cascade :

En1975, dans les auteurs ont proposé un convertisseur multi niveaux en cascade qui consistait en la mise en série de plusieurs ponts à deux niveaux monophasé ; ces ponts étant connectés à des sources de tension continues séparées. La figure II.12 Montre le schéma de base d'un convertisseur Niveaux en cascade formé par l'association en série de N-1/2 ponts à deux niveaux. La tension en sortie d'une telle structure est donnée par la somme des N-1/2 tensions en sortie de ces ponts.

Une autre alternative consiste à envisage de mettre en série plusieurs ponts monophasé alimentés par une même source de tension continue  $E_c$ . Cette structure est appelée polygonale et l'utilisation d'un transformateur d'isolement à la sortie de chaque pont est obligatoire pour connecter les sortie alternative de chaque pont[27].

Les complications et le coût des sources isolées pour chaque pont n'est pas un inconvénient sérieux parce

qu'il est compensé par les avantages de la construction modulaire. L'avantage principal de cette approche est que la topologie de ce type d'onduleur facilite la maintenance en plus elle permet de donner une façon très pratique pour augmenter le nombre de niveaux [25]. Pour améliorer la résolution de ces convertisseurs sans augmenter le nombre de cellules, il est possible d'alimenter les cellules par des tensions d'entrées différentes [25].

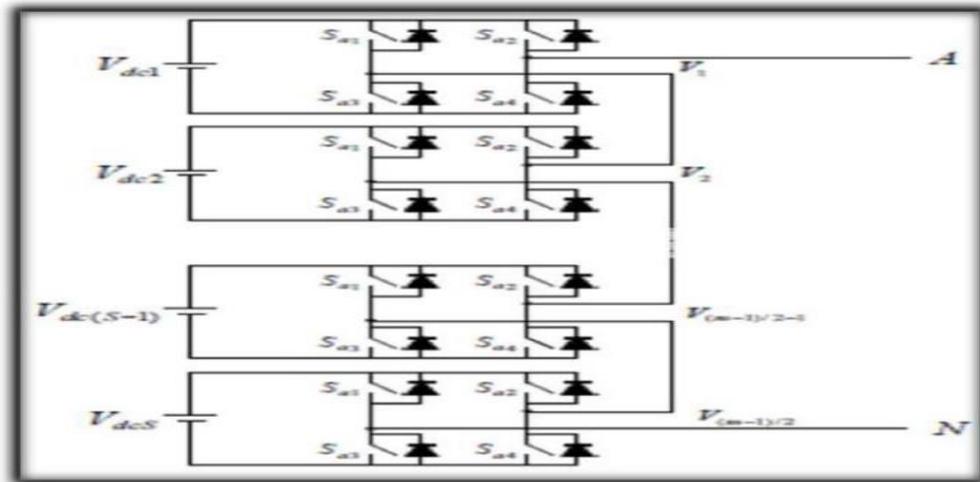


Figure II.12 : Structure d'un convertisseur N niveaux en cascade

## II.9. Les avantages et les inconvénients des onduleurs multi-niveaux

Comme toutes structures, l'onduleur multi-niveaux en cascade possède des avantages et des inconvénients dont on peut citer :

### II.9.1. 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 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 des sources à courant continu ( $N=2s+1$ ).

### **II .9.2 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 [24].

## **II .10 . Propriétés des principales structures**

### **II .10 .1. Classification des topologies selon leur alimentation**

Les topologies telles que les onduleurs NPC et les onduleurs à cellules imbriquées divisent leur tension d'alimentation : la tension de sortie est plus petite ou égale à la tension continue d'entrée. Elles sont capables de fonctionner à partir d'une alimentation continue unique.

Au contraire, les structures telles que les onduleurs en cascade élèvent leur tension d'alimentation : la tension de sortie maximale est plus grande que chacune des tensions d'alimentation et plus petite ou égale à la somme des tensions d'alimentation.

### **II.10 .2. Nombres de composants nécessaires**

A l'aide des tableaux suivants, nous comparons le nombre de commutateurs principaux et de diodes principales, nécessaires pour réaliser un nombre de niveaux de tension identique. Pour maintenir des diodes, ce n'est pas nécessaire dans la configuration à condensateur imbriqué et onduleur cascadié ,ainsi que les condensateurs d'équilibrage ne sont pas obligatoires dans la configuration à diode clampée et onduleur cascadié. Implicitement, l'onduleur cascadié exige le moindre nombre de composants.

Un autre avantage d'onduleur cascadié est la flexibilité de disposition de circuit. La disposition du circuit de modulation est possible parce que chaque niveau a la même structure, et il n'y a aucune diode clampée supplémentaires ou un condensateur d'équilibrage de tension. Le nombre de niveaux de tension de sortie peut être facilement ajusté en ajoutant ou en enlevant les cellules de pont complet[28][29].

Pour le cas le plus simple permettant d'obtenir trois niveaux par branche, nous obtenons :

Topologie	<b>n</b>	<b>s</b>	<b>K</b>	<b>D</b>	<b>D<sub>c</sub></b>	<b>C</b>
<b>NPC</b>	3	2	4	4	2	0
<b>Cellules imbriquées</b>	3	2	4	4	0	1
<b>Cascades</b>	3	3	4	4	0	0

**Tableau II. 3 : Nombres de composants nécessaires pour la topologie à trois niveaux.**

Topologie	<b>N</b>	<b>s</b>	<b>K</b>	<b>D</b>	<b>D<sub>c</sub></b>	<b>C</b>
<b>NPC</b>	N	(n-1)	2(n-1)	2(n-1)	(n-2)(n-1)	0
<b>Cellules imbriquées</b>	N	(n-1)	2(n-1)	2(n-1)	0	(n-2)(n-1)/2
<b>Cascades</b>	N	3(n-1)/2	2(n-1)	2(n-1)	0	0

**Tableau II.4 : Nombres de composants nécessaires pour la topologie à n niveaux.**

Avec :

- **N**: le nombre de niveaux de tension obtenus,
- **s** : le nombre de sources à courant continu,
- **K** : le nombre de commutateurs principaux,
- **D** : le nombre de diodes principales,
- **D<sub>c</sub>**: le nombre des diodes clampées,
- **C** : le nombre de condensateurs d'équilibrage,

Du point de vue du nombre de composants, les onduleurs à cellules cascadiées paraissent être la solution multi-niveau la plus avantageuse, surtout lorsque le nombre de niveaux devient important. C'est effectivement le cas pour les applications monophasées telles que le filtrage actif ou la compensation statique, lorsque le convertisseur n'a pas besoin de fournir d'énergie au système. Pour les applications

triphasées et pour un petit nombre de niveaux, les onduleurs NPC sont intéressants, car les condensateurs sont partagés par les différentes branches, ce qui permet un équilibrage de la puissance circulant entre les phases. Cet équilibrage permet une réduction notable de la taille des condensateurs intermédiaires .

### II.10 .3. Qualité de l'énergie électrique

La qualité de l'énergie électrique est considérée comme une combinaison de la qualité de la tension et de la qualité du courant. Cependant le terme « qualité du courant » est rarement utilisé, car la qualité du courant est étroitement liée à la qualité de la tension et la nature des charges. Pour cette raison, « la qualité de l'énergie électrique » est souvent réduite à « la qualité de la tension » La qualité de cette énergie dépend directement de la qualité de la tension aux points de raccordement de la charge au réseau PCC (point de couplage commun).

L'énergie électrique est délivrée sous forme d'un système triphasé de tensions laquelle est caractérisée, dans le cas idéal, par les paramètres suivants .

- équilibre et symétrie parfaite des trois tensions en amplitude et en déphasages relatifs ;
- stabilité de la fréquence ;
- forme d'onde parfaitement sinusoïdale.

#### II .10.3.1.Perturbations harmoniques

Les perturbations sont tous les phénomènes internes ou externes au réseau ayant un pouvoir de modifier d'une manière transitoire ou permanente en amplitude et /ou en forme les grandeurs électriques du réseau. Ces perturbations résultent de la superposition, sur l'onde fondamentale à 50 Hz, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples de celle du fondamental (voir figureII.13). Le domaine de fréquence qui correspond à l'étude des harmoniques est généralement compris entre l'harmonique 2 et celui du rang 40 , mais on peut également observer des sous-harmoniques ou des inter-harmoniques à des fréquences non multiples entières de la fréquence fondamentale.

$$Y(t) = Y_0 + \sum_{h=1}^{\infty} (Y_h \sqrt{2} \cdot \sin(h\omega t - \varphi_h)) \quad (\text{II.7})$$

$Y_h$  : Valeur efficace de la composante de rang h.

$\varphi_h$  :Phase de la composante h lorsque  $t=0$ .

$Y_0$  : Amplitude de la composante continue, généralement nulle.

On peut alors distinguer :

- les altérations de l'onde de tension (harmonique, dés équilibre, flicker. Ces phénomènes sont permanents ou durent au minimum plusieurs minutes ;
- les creux de tension, surtensions et coupures brèves d'une durée de l'ordre d'une à quelques secondes ;
- les surtensions transitoires, de durée inférieure à une période.

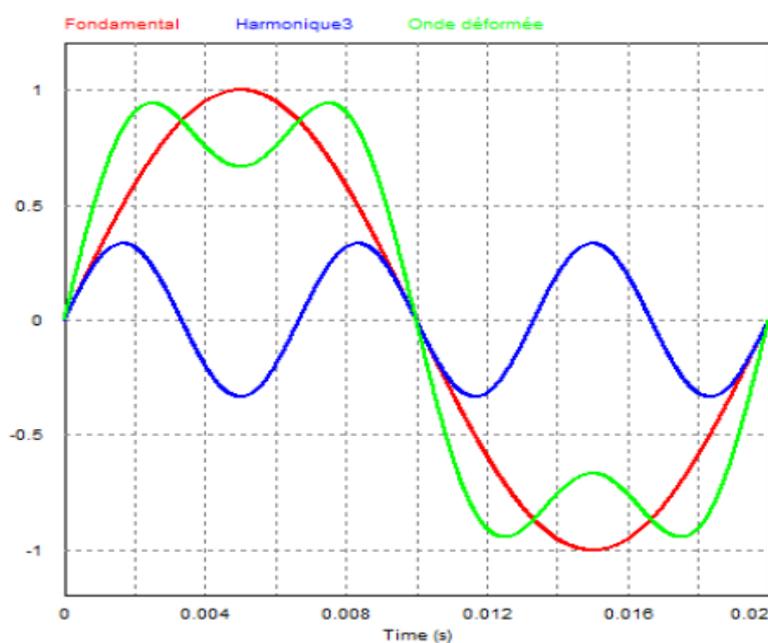


Figure II .13 : Superposition de la 3ème harmonique sur le signal fondamental.

### II .10.3.1.1. Inter-Harmoniques

Les inter-harmoniques sont superposées à l'onde fondamentale mais ne sont pas des multiples entiers de la fréquence du réseau (voir figure II .13). Les inter-harmoniques sont souvent produites par des convertisseurs statiques, les cyclo-convertisseurs, les variateurs de vitesse et d'autres équipements similaires de contrôle-commande .

### **II .10.3.1.2. Infra harmoniques**

Ce sont des composantes sinusoïdales qui sont à des fréquences inférieures à celles du fondamental : 10Hz, 20Hz. Dans ce cas, le signal n'est pas périodique à T (T : période du fondamental).

### **II .10.3.2. Origine des harmoniques**

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

Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale, ou parfois à des fréquences quelconques.

Le passage de ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peut entraîner des tensions harmoniques aux points de raccordement et alors polluer les consommateurs alimentés par le même réseau.

## **II .11. Type de commande:**

Le rôle de la fonction de modulation est de déterminer les instants de commutation et les ordres de commande logique des interrupteurs, afin d'obtenir une séquence de commutation de ces derniers. Le choix d'une stratégie de modulation peut s'effectuer en fonction des performances souhaitées par l'utilisateur. Mais, toutes les stratégies ont des avantages et des inconvénients, on distingue trois types :

- ✓ Commande pleine onde (dite 180°).
- ✓ Commande décalée.
- ✓ Commande à Modulation de largeur d'impulsion (MLI).

La tension générée par les stratégies (A, B) à une forme rectangulaire, sa décomposition en série de Fourier à montrer que cette forme d'onde est riche en harmoniques, parce que le signal rectangulaire est la somme du fondamental plus les multiples de fondamentale.

### II .11.1.Commande pleine onde (180°):

La décomposition en série de Fourier de la tension composée est donnée par [30]:

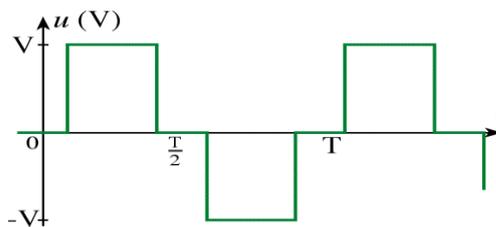
$$V_{ab} = \sum_{n=1,3,5 \dots}^{\infty} \left( \frac{4V_s}{\pi} \cos \frac{n\pi}{6} b_n \sin(\omega t + \frac{\pi}{6}) \right) \quad (\text{II} .8)$$

Les tensions  $V_{bc}$ ,  $V_{ca}$  sont décalées par rapport à  $V_{ab}$  respectivement de 120° et 240°. Et la tension efficace est donnée par :

$$U_{eff} = U \quad (\text{II} .9)$$

### II.11.2.Commande décalée :

L'idéal serait d'obtenir une tension de sortie de forme sinusoïdale. La commande décalée fournit un signal plus proche de la forme sinusoïdale que la commande précédente.



**Figure II. 14 - Forme de la tension de la commande décalée.**

La forme d'onde obtenue avec une commande décalée est plus proche d'une forme sinusoïdale que les créneaux obtenus avec la commande symétrique, voir figure(II.14).

La tension efficace est donnée par :

$$U_{eff} = U \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi}} \quad (\text{II} .10)$$

L'utilisation de la commande décalée avec un bon choix d'angle de décalage permet d'éliminer ou d'éteindre tel ou tel harmonique :

- Décalage de  $T/6$  élimine l'harmonique 3,
- Décalage de  $T/10$  élimine l'harmonique 5,
- Décalage de  $T/8$  élimine le 3 et 5 ensembles.

La commande décalée améliore la tension de sortie par rapport à la commande 180° (symétrique) mais toujours reste des harmoniques gênants, alors on utilise la commande MLI.

### II.11.3 Commande à Modulation de largeur d'impulsion (MLI):

Avec la commande MLI, les schémas des onduleurs reste les mêmes, la commande des interrupteurs qui est modifié, la fréquence de la commutation est supérieure à la fréquence de sortie.

La MLI permet d'obtenir un courant d'allure sinusoïdale dans la charge. Pour cela, on découpe la tension aux bornes de la charge en impulsion de largeur pré déterminée. Ceci permet l'élimination des harmoniques de courant de rang faible. Par filtrage, on élimine les harmoniques de courant de rang élevé. On obtient dans la charge, un courant quasiment sinusoïdal.

#### II.11.3.1 Type de commande MLI

##### II.11.3.1.1 MLI sinus triangle (Modulation par porteuse):

Une loi de modulation d'impulsion résulte de la comparaison d'une modulante avec une porteuse, comme représenté sur la Figure II.15.

Les instants de commande sont déterminés par les intersections d'une onde de référence  $U_r$ , représentant la tension de sortie désiré une fréquence  $f$ , avec une onde de modulation (porteuse) de fréquence  $f_p$ .

$$f_p > f \quad (II.11)$$

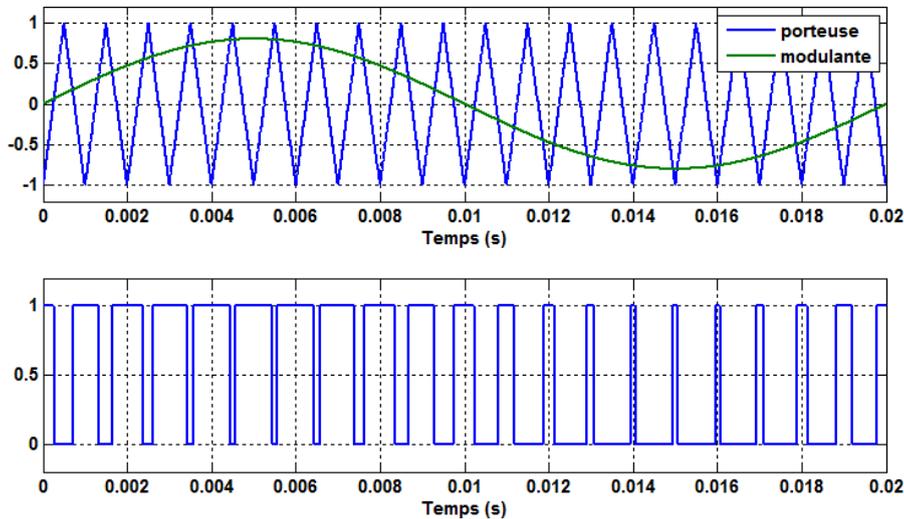


Figure II .15. MLI sinus triangle

La porteuse généralement est une onde triangulaire (triangle sinusoïdal). Si la commande est sinusoïdale :

- Indice de modulation

$$m = \frac{f_p}{f} \quad (\text{II.12})$$

- Coefficient de réglage en tension

$$r = \frac{ur \max}{up \max} \quad (\text{II.13})$$

La modélisation est synchrone c'est-à-dire  $f_p$  est un multiple entier de  $f$ , dans le MLI sinus triangle, il existe autre technique appelé MLI à injection harmonique notamment le 3ème ou bien le 3ème et le 9ème on ajoute une certaine amplitude à fin d'augmenté la valeur du fondamental. Une autre technique appelée MLI d'impulsion partielle (MLI a zone mort), cette technique permet de réduire le nombre de commutation des interrupteurs définitions les pertes.

### II.11.3.1.2 Technique de production d'onde MLI

Plusieurs techniques d'obtention d'onde MLI sont utilisées pour générer le signal de contrôle nécessaire à la commande et au blocage des éléments semi-conducteurs. Par exemple: impulsions de commande pour thyristors et courant de base pour les transistors. Le plus souvent, on fait appel à la technique analogique, numérique ou en utilisant les deux en même temps [31].

#### II.11.3.1.2.1 Technique analogique

Cette technique est basée sur la comparaison entre une porteuse triangulaire et la référence. La comparaison est réalisée à l'aide d'un amplificateur opérationnel (Figure II. 16)

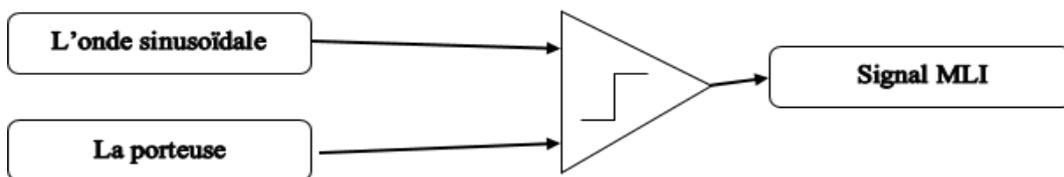
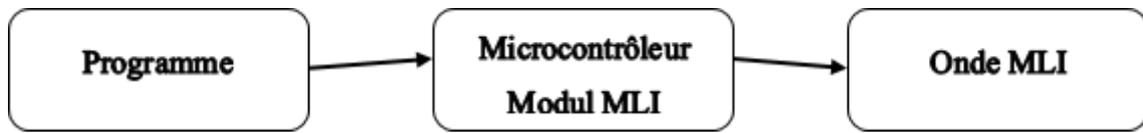


Figure II .16 - Technique analogique

#### II.11.3.1.2.2 Technique numérique

Elle est basée sur l'utilisation des microprocesseurs qui assurent la génération des impulsions en se

servent d'un programme définissant les angles d'amplitudes calculés au préalable. Cette technique a apporté une grande amélioration significative en matière de simplicité et performance du circuit de commande (Figure II.17). C'est celle que nous allons utiliser dans ce travail.



**Figure II .17 -Technique numérique**

### **II.11.3.1.3 Principaux avantages de la MLI**

La modulation de largeur d'impulsion présente les avantages suivants :

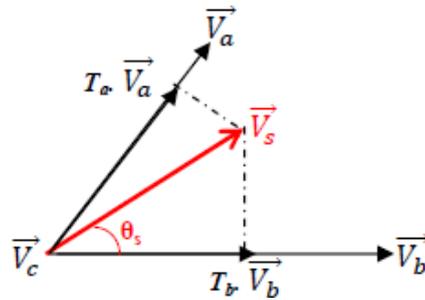
- ✓ Une bonne neutralisation d'harmonique par rapport aux onduleurs à on de carrée ou en un seul créneau.
- ✓ Elle permet de repousser vers des fréquences élevées les harmoniques de la tension de sortie, ce qui facilite le filtrage.
- ✓ De faire varier la valeur du fondamental de tension de sortie.
- ✓ La MLI permet aussi l'alimentation de plusieurs ensembles onduleurs, moteurs asynchrones à partir d'une même source continue [32][33].

### **II.11.3.1.2 MLI vectorielle:**

La MLI vectorielle est la méthode de modulation la plus récente, elle génère les signaux de commutation de chaque interrupteur de l'onduleur automatiquement avec la rotation du vecteur de référence pendant une période similaire à celle du fondamental. Suivant l'arrangement des temps de commutation (rapports cycliques) générés, on classe la MLI vectorielle en plusieurs algorithmes [34].

#### **II.11.3.1.2.1 Principe de la MLI vectorielle :**

Le principe de la MLI vectorielle, appelée aussi SVM ( SpaceVector Modulation) consiste à obtenir à la sortie de l'onduleur un vecteur de tension moyen  $V_s$  à travers l'application des vecteurs de tension actifs et nuls de l'onduleur pendant des durées particulières (Fig. 18) [35][33].



FigureII. 18 - Principe de la SVM

$$T_{MLI}V_S = T_a \vec{V}_a + T_b \vec{V}_b + T_c \vec{V}_c \quad (\text{II.14})$$

$$T_{MLI}V_S = T_a + T_b + T_c \quad (\text{II.15})$$

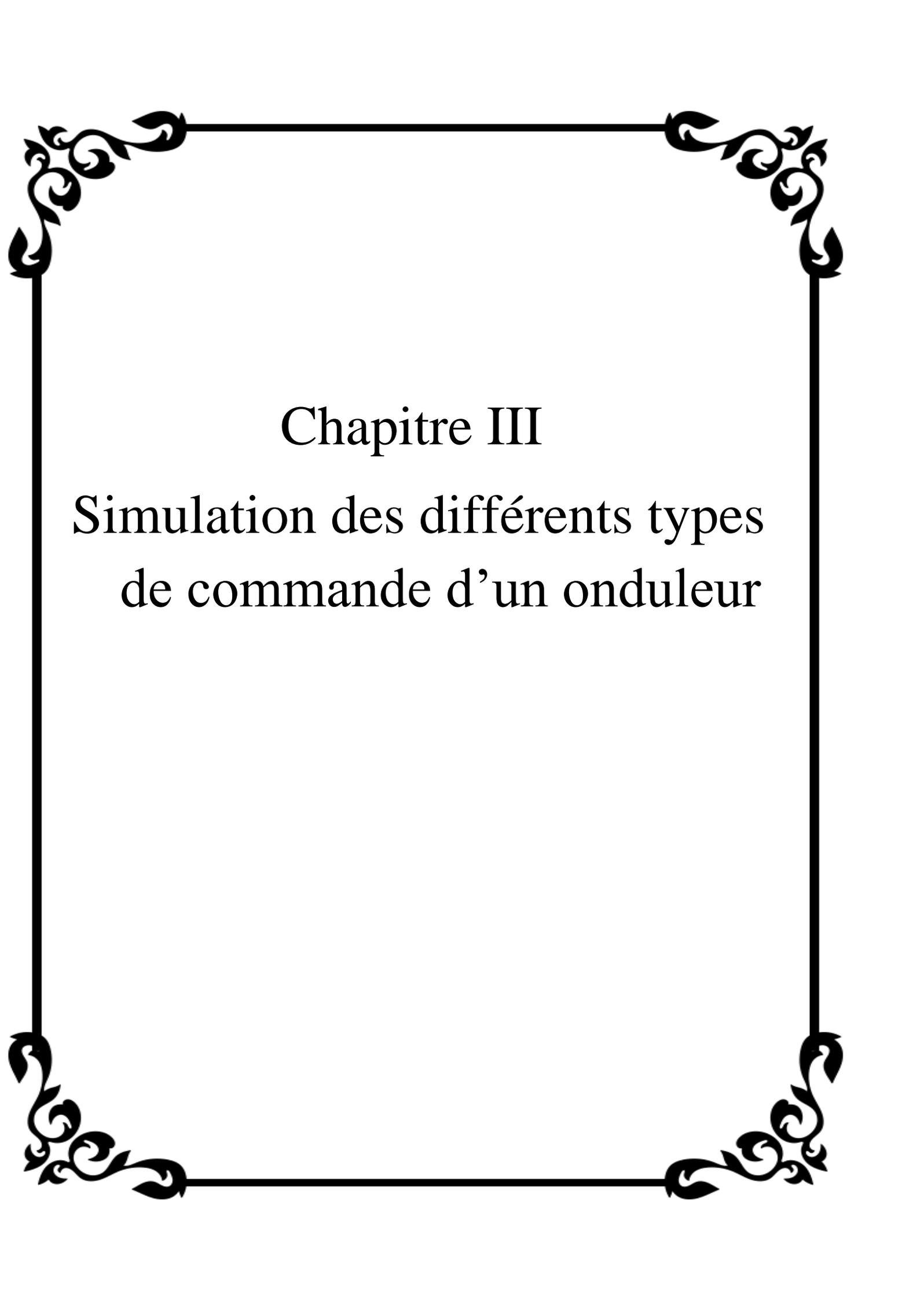
### II.11.3.1.2 Avantage de la MLI vectorielle

Les avantages de la MLI vectorielle vis-à-vis la MLI sinusoïdale sont comme suit [31]:

- ✓ La MLI vectorielle offre comme principal avantage de minimiser les harmoniques tensions et d'augmenter le rendement de l'onduleur de 15% par rapport à la MLI sinusoïdale.
- ✓ L'amplitude de la tension composée peut atteindre la valeur Donc, une maximale de la tension d'entrée est possible dans la zone de fonctionnement linéaire.
- ✓ Seulement un vecteur tension de référence est commandé pour générer trois sinusoïdales.
- ✓ L'implantation de la MLI vectorielle en temps réel est plus facile.

## II .12.Conclusion

Il existe plusieurs topologies d'onduleurs, dont chacun correspond à un type d'application déterminé permettant d'atteindre les performances recherchées. Dans ce chapitre, on a présenté les différentes structures de base d'onduleurs de tension, à deux niveaux et les trois catégories de base d'onduleur multi-niveaux : 'Neutral Point Clampe(NPC)', 'FlyingCapacitors' (FC), 'H-Bridge'



## Chapitre III

Simulation des différents types  
de commande d'un onduleur

### III.1 Introduction :

Dans le cadre de l'étude des onduleurs commandés par les techniques MLI, nous utilisons le logiciel de simulation Matlab, plus particulièrement son environnement graphique de programmation Matlab Simulink.

**MATLAB** (MatrixLaboratory) est un logiciel destiné principalement au calcul scientifique, à la modélisation et à la simulation. Le noyau de calcul est associé à l'environnement **SIMULINK**, permettant une modélisation basée sur des schémas-blocs. En effet, Matlab Simulink permet de représenter graphiquement le système sous forme de blocs de construction et de petits éléments, puis simule pour analyser le modèle. Le but de ce chapitre est de dessiner les schémas électroniques des convertisseurs étudiés, de les simuler pour réaliser les circuits imprimés correspondants.

### III.2 Commande symétrique :

#### III.2.1 Commande symétrique (pleine onde 180°) d'un onduleur monophasé en pont :

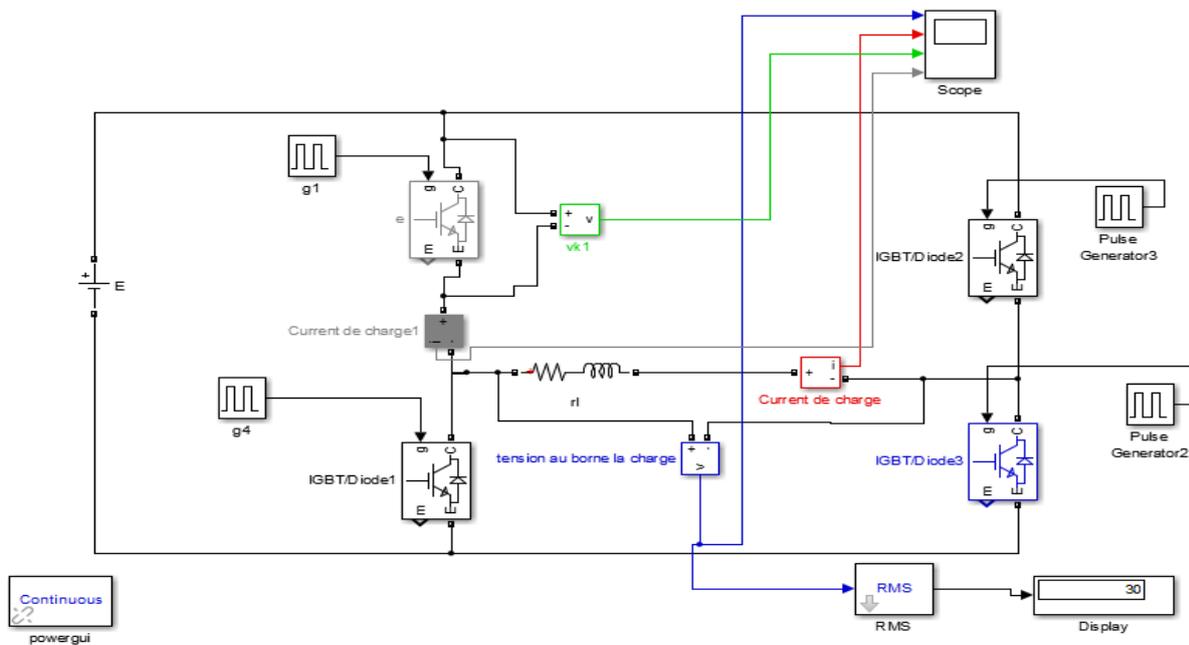


Figure III.1 : Commande symétrique d'un onduleur en pont.

Chaque interrupteur conduit durant 180°. Les interrupteurs k1 et k2 sont complémentaires.

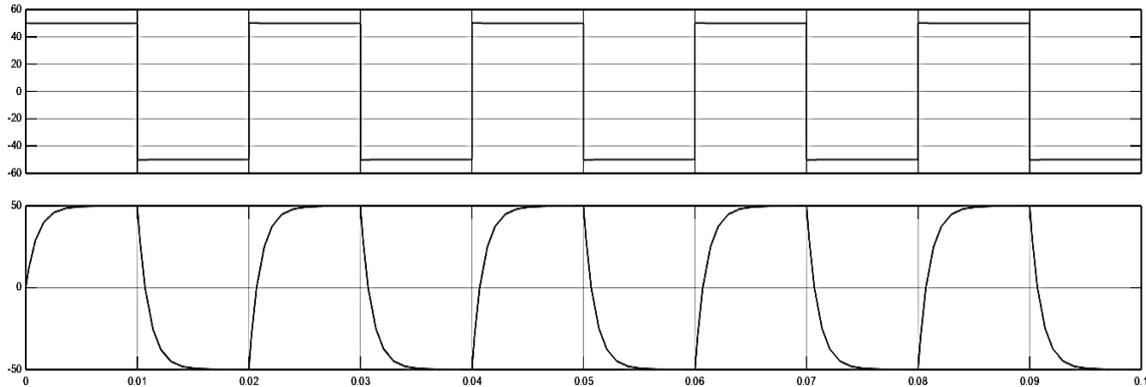
- Pour  $0 < t < T / 2$  : les interrupteurs, K1, K2 sont fermés, et K3, K4 sont ouverts. D'où:

$$U = +U.$$

- Pour  $T / 2 < t < T$  : les interrupteurs, K3, K4 sont fermés, et K1, K2 sont ouverts. D'où:

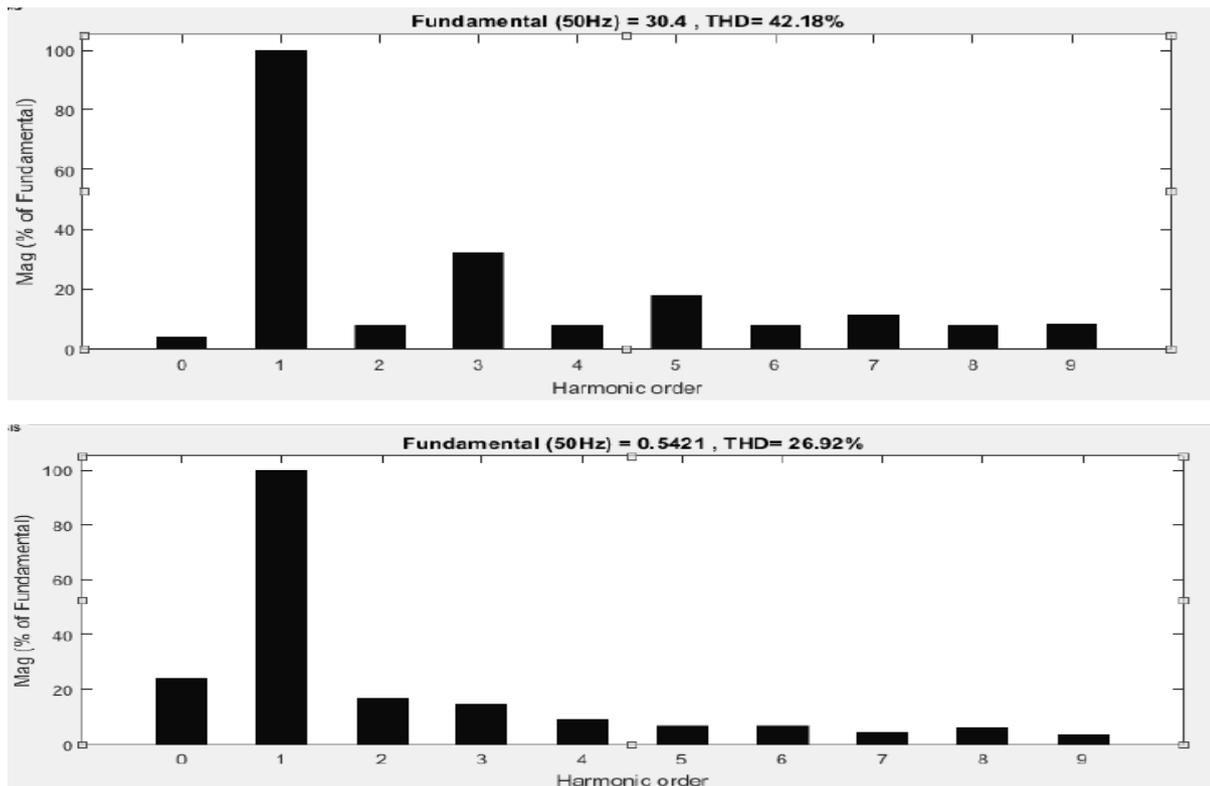
$$U = -U.$$

Les figures suivantes présentent l'allure de la tension et du courant respectivement, ainsi que leur spectre d'harmoniques :



**Figure III.2 : Allure de tension et du courant de sortie d'un onduleur en pont avec commande 180°.**

L'analyse spectrale du signal et le taux de distorsion harmonique de la tension et du courant sont illustrés dans les figures suivante :



**Figure III.3 : Spectre amplitude-harmonique de la tension de sortie et du courant (charge RL).**

### III.2.1.1 Interprétation :

- La tension aux bornes de la charge est alternative entre +50V et -50V, ce qui correspond au moment d'amorçage des interrupteurs et de la source de tension. Cependant, nous sommes encore loin d'obtenir un signal sinusoïdal et cela se constate au niveau des harmoniques où le signal est très pollué.
- Le courant a une croissance exponentielle de la valeur minimale  $-I_M$  à la valeur maximale  $I_M$ .
- THDv très élevé 42.18%.
- La représentation du spectre d'harmonique des tensions simples et composées montre la présence d'harmoniques d'ordre  $2n+1$  ( $n=1, 2, 3$ ).

### III 2.2 Commande symétrique (pleine onde) d'un onduleur triphasé :

En appliquant ce type de commande pour l'onduleur triphasé, on obtient un système de tensions alternatives triphasées caractérisées par l'absence de harmoniques de rangs multiples de trois. Chaque interrupteur conduit durant  $180^\circ$ . Cette commande se résume à commander les interrupteurs K1, K3 et K5 à la fermeture pendant une demi période ( $V(s)=U$ ) puis de commander K2, K4 et K6 durant la deuxième demi-période ( $V(s)=-U$ ).

On présente l'allure de la tension et du courant respectivement, ainsi que leur spectre d'harmoniques :

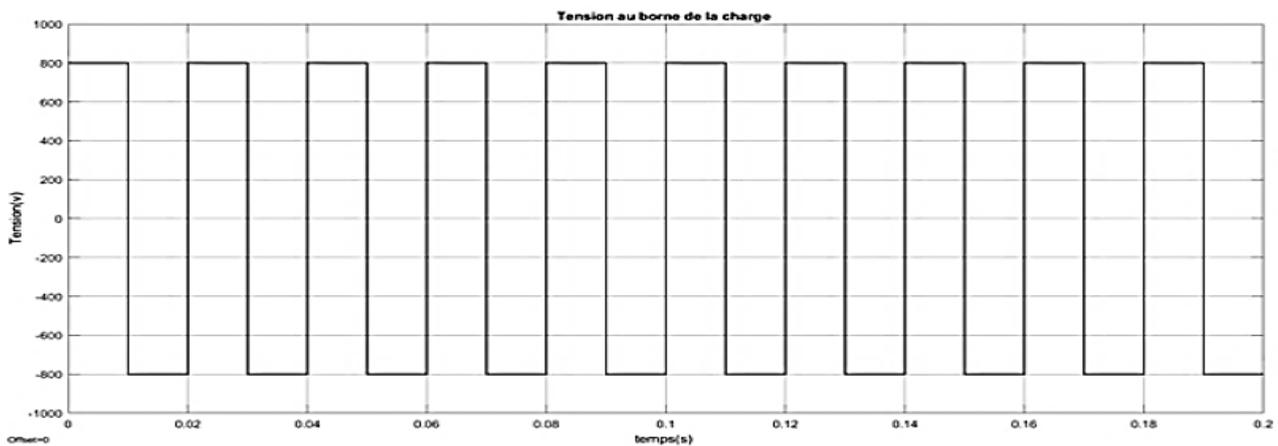
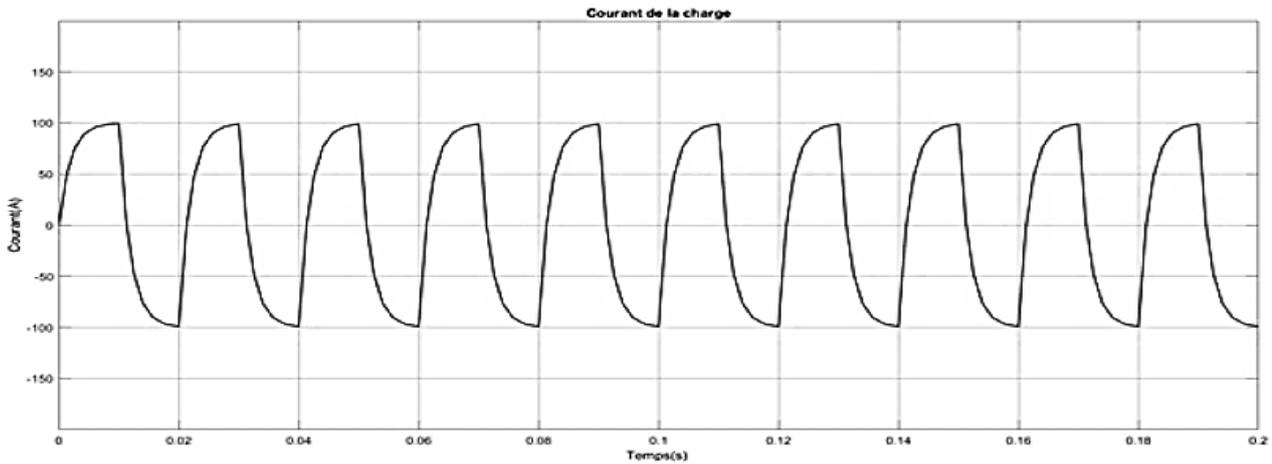


Figure III .4 :Allure de la tension de sortie en fonction du temps.



FigureIII .5: Allure du courant en fonction du temps.

L'analyse spectrale du signal donne le taux de distorsion harmonique de la tension et du courant :

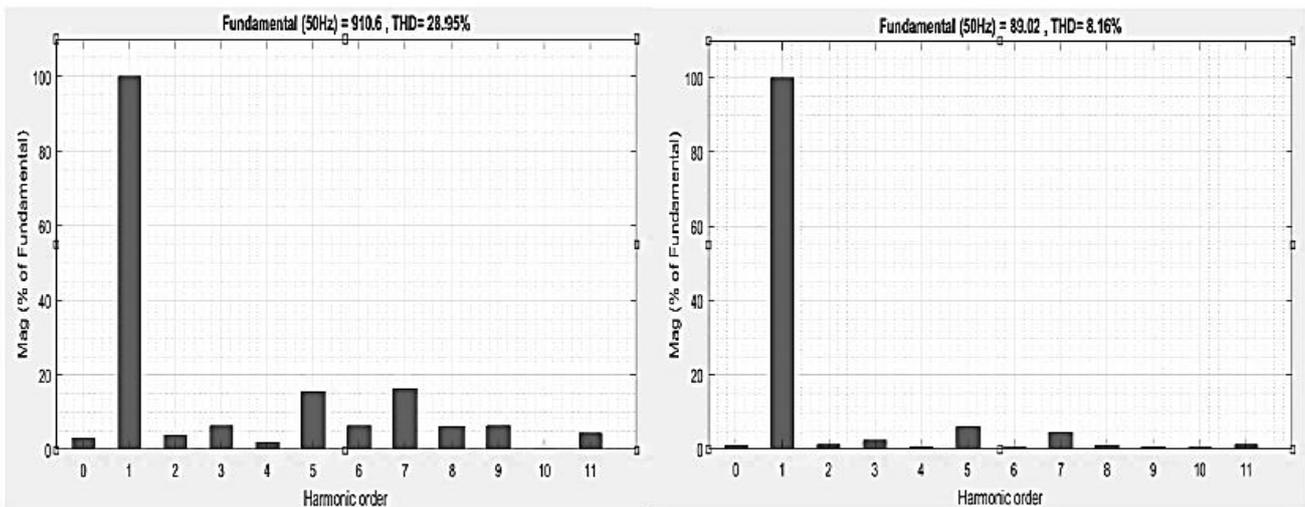


Figure III.6:Spectre amplitude-harmonique de la tension de sortie et du courant (charge RL).

### III.2.2.1Interprétation :

- La tension générée par cette stratégie à une forme quasi rectangulaire.
- On remarque que les harmoniques de rang multiples de 3 ont disparus.
- Si on regarde les harmoniques avec cette structure, on constate que nous avons beaucoup moins d'harmoniques, ce qui signifie que le signal est moins pollué.

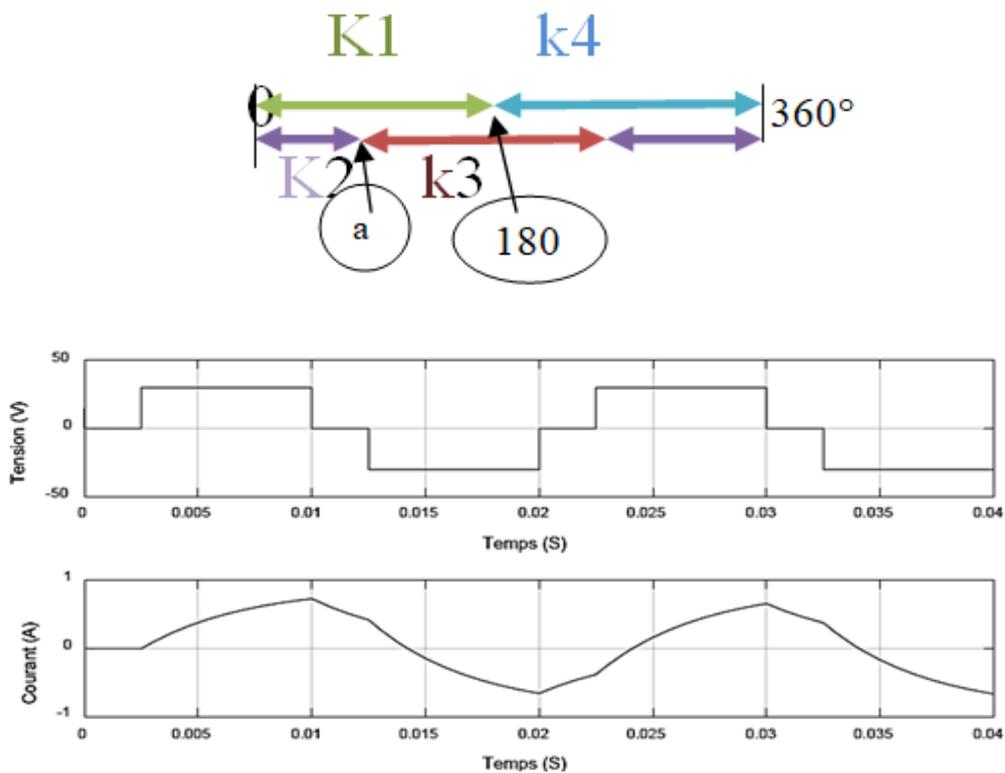
Une commande pleine onde est quelque chose de relativement simple à mettre en place pour n'importe quel type de structure (onduleur monophasé ou triphasé). L'inconvénient est que nous n'obtenons pas un signal parfaitement sinusoïdal.

### III.3 Commande décalée :

#### III.3.1 Commande décalée $120^\circ$ d'un onduleur monophasé en pont :

Chaque interrupteur conduit durant  $120^\circ$ . Au niveau de la commande, il suffit de décaler la fermeture des différents interrupteurs dans un ordre précis.

Les interrupteurs K1 et K2 restent toujours complémentaires. Dans l'intervalle  $[0, \alpha]$ , les interrupteurs K1 et K3 fonctionnent ; cela implique un circuit ouvert. La tension aux bornes de la charge est égale à 0. Dans la période  $[\alpha, \pi]$ , les interrupteurs K1 et K4 fonctionnent ; ce qui implique un circuit fermé. La tension aux bornes de la charge est égale à U et c'est la même chose pour la deuxième demi période sauf au niveau de l'intervalle  $[\pi+\alpha, 2\pi]$ . La tension aux bornes de la charge est égale à  $-U$ .



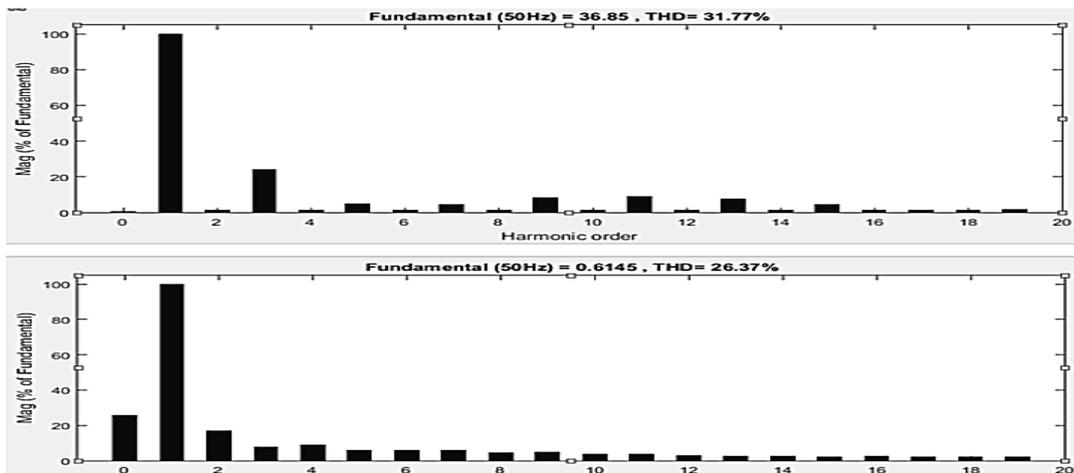
**Figure III.7: Allure de la tension et du courant de sortie d'un onduleur en pont avec commande décalée.**

L'utilisation d'une commande décalée avec un bon choix de l'angle de décalage permet d'atténuer ou d'éliminer telle ou telle harmonique :

##### III.3.1.1 Décalage de $T/6$ élimine l'harmonique de rang 3 :

Avec un décalage de  $30^\circ$ , on diminue l'amplitude de l'harmonique de rang 3. L'amplitude de l'harmonique de rang 3 est environ 25% en tension et 7% en courant.

La figure III.8 représente l'allure du spectre d'harmonique de la tension et du courant de sortie :

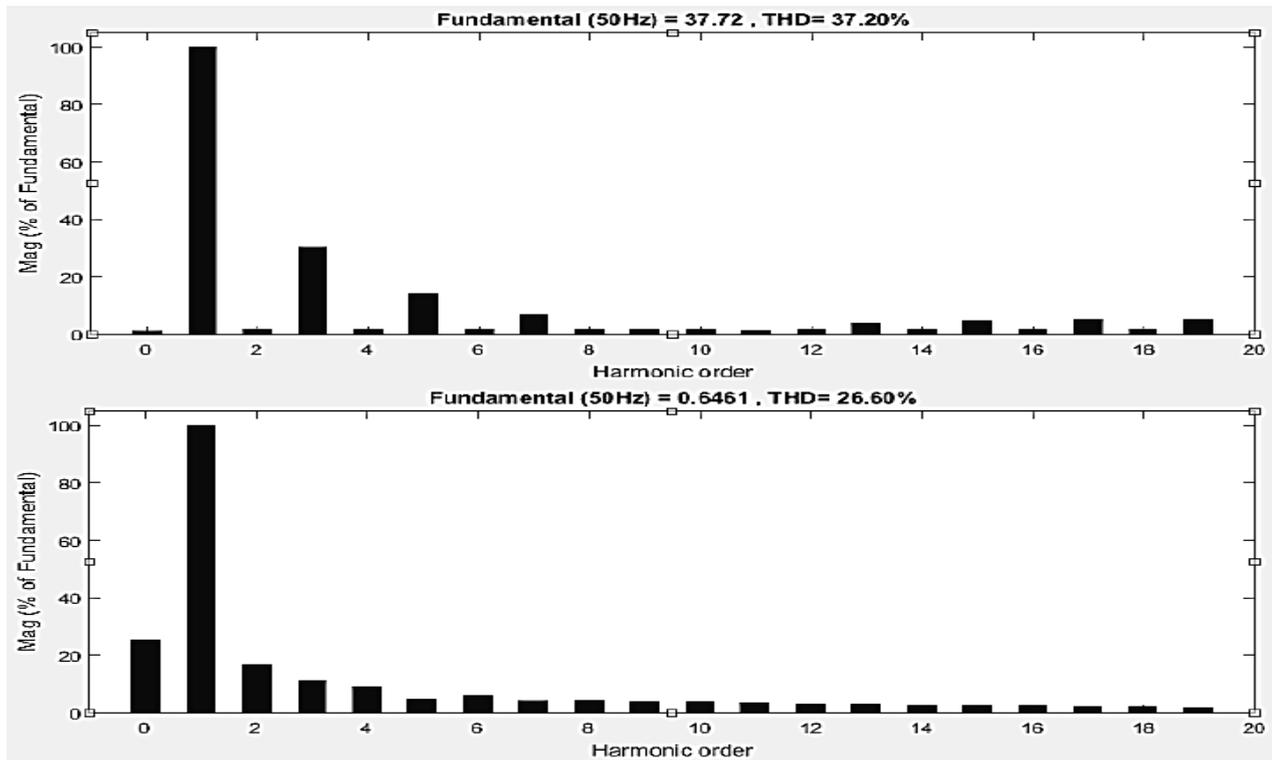


**Figure III.8: Spectre amplitude-harmonique de la tension de sortie et du courant (charge RL), d'une commande décalée 30°.**

### III.3.1.2 Décalage de T/10 élimine l'harmonique 5 :

Avec un décalage de 18°, on diminue l'amplitude de l'harmonique de rang 5. L'amplitude de l'harmonique de rang 5 est d'environ 20% en tension et 5% en courant et la valeur de l'harmonique de courant de rang 3 augmente à 18%.

La figure III.9 représente l'allure de spectre d'harmonique de la tension et du courant de sortie.

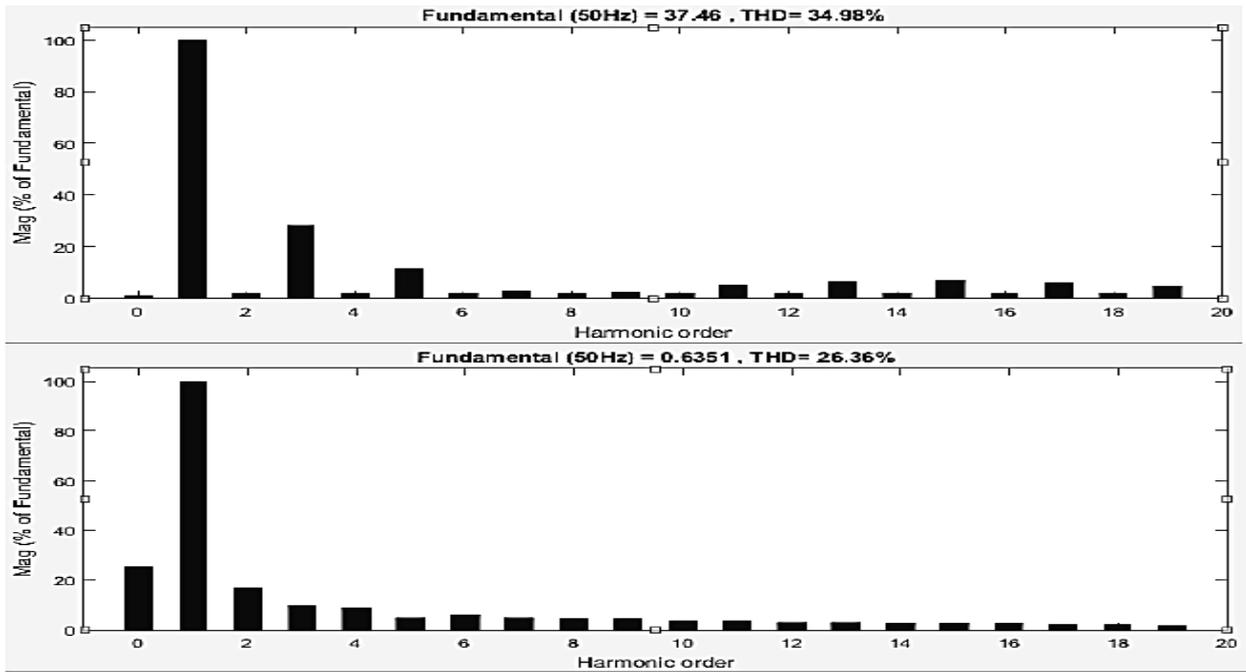


**Figure III.9: Spectre amplitude-harmonique de la tension de sortie et du courant (charge RL), d'une commande décalée 180°.**

**III .3.1.3 Décalage de T/8 élimine le 3 et 5 ensembles :**

Avec un décalage de 22.5°, on diminue l'amplitude de l'harmonique de rang 3 et 5. L'amplitude de l'harmonique de courant de rang 3 est environ 10% et l'amplitude de l'harmonique de rang 5 environ 5%.

La figure III. 10 représente l'allure de spectre d'harmonique de la tension et du courant de sortie :



**Figure III.10 : Spectre amplitude-harmonique de la tension de sortie et du courant (charge RL), d'une commande décalée 22.5°.**

#### III.3.1.4 Interprétations :

- Le THD dépend de l'angle de commande  $\beta$ .
- La tension générée par ce type de commande a une forme rectangulaire (trois niveaux)
- La commande décalée est une première étape vers l'obtention d'un courant sinusoïdal.

L'inconvénient majeur de cette commande est l'annulation de la tension donc la puissance devient nulle.

- La commande décalée permet d'améliorer la qualité de signal.

#### III.3.2 Commande décalée d'un onduleur triphasé :

Le but de cette commande est de fermer ou d'ouvrir les interrupteurs simultanément mais avec un certain degré de décalage (120°). Donc elle permet d'agir sur la valeur efficace et sur l'amplitude fondamentale de la tension de sortie [24].

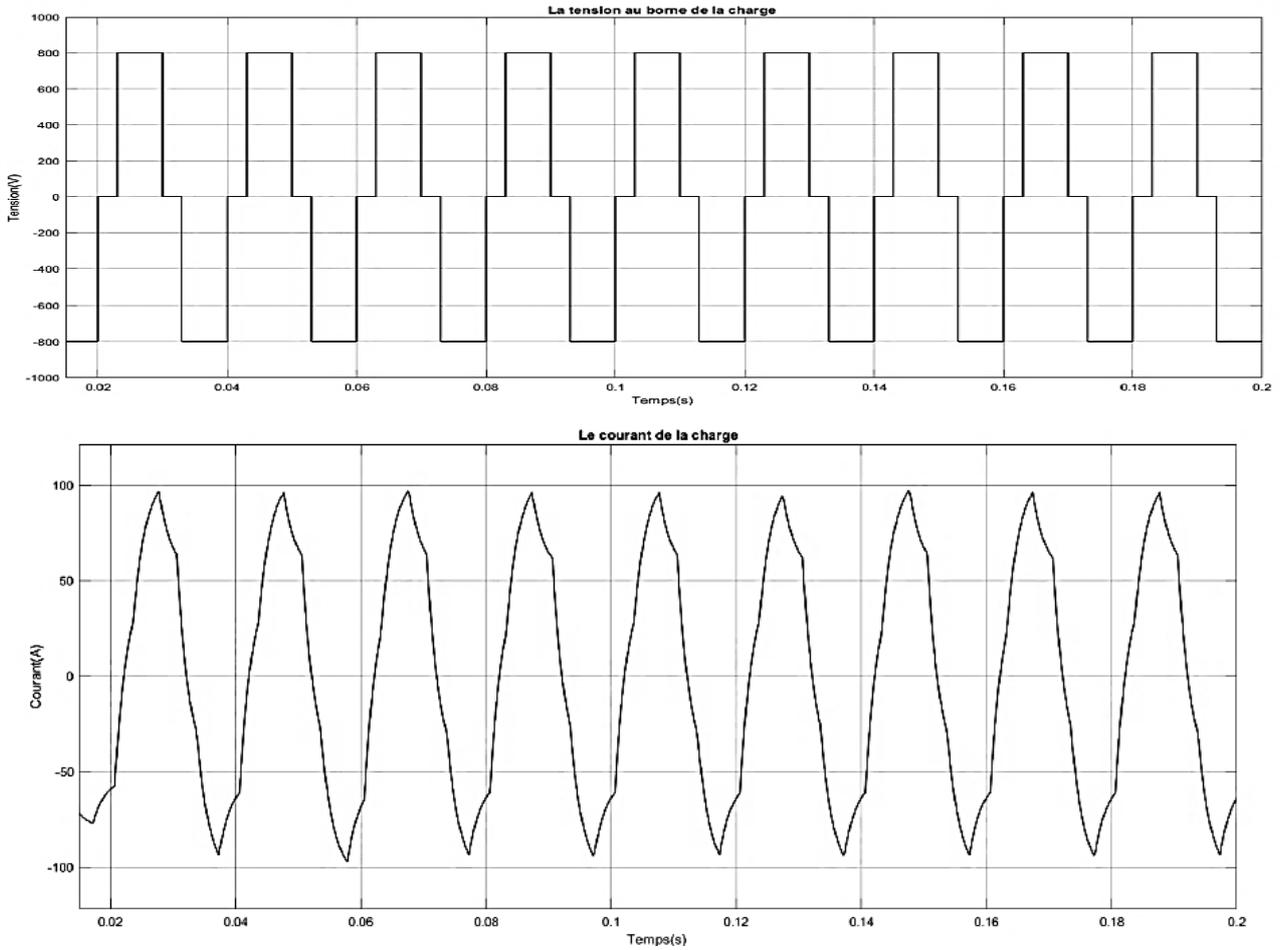


Figure III.11: Allure de la tension de sortie et du courant en fonction du temps.

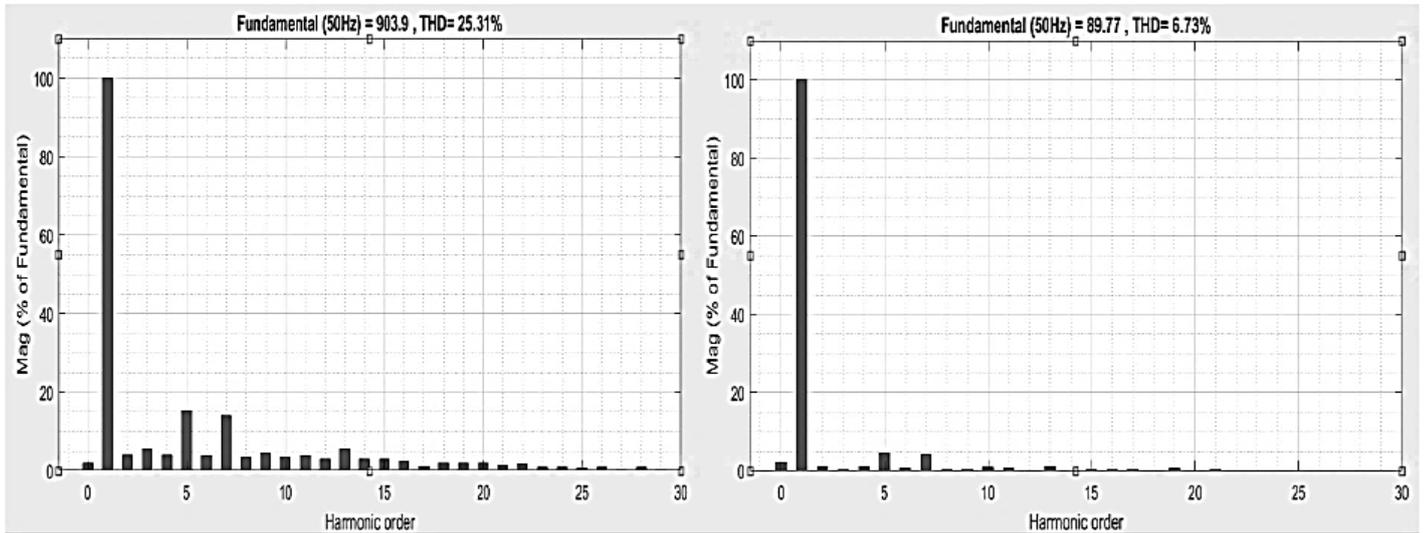


Figure III.12: Spectre d'harmonique de la tension de sortie et le courant (Charge RL).

### III.3.2.1 Interprétation :

➤ L'observation des spectres montre que l'onduleur à commande décalée présente un spectre plus favorable que celui à commande symétrique.

➤ La commande décalée améliore la tension de sortie par rapport à la commande 180° (symétrique). Pour atténuer les harmoniques gênantes, les plus proches du fondamentale, on peut placer en sortie de l'onduleur un filtre ou changer carrément la commande des interrupteur.

Pour diminuer le poids et le prix du filtre, on fait appel à des techniques d'onduleurs plus sophistiquées. Les deux techniques sont la modulation de largeur d'impulsion MLI générée par la composition de signaux sinus triangle et MLI programmée [27].

### III.4 Commande MLI :

#### III.4.1 Commande MLI Sinus Triangle d'un onduleur triphasé :

Cette méthode consiste à adopter une fréquence de commutation supérieure à la fréquence des grandeurs de sortie et à former chaque alternance de la tension de sortie d'une succession de créneaux de largeurs convenables. Le schéma de l'onduleur triphasé commandé par la technique MLI sur l'environnement Matlab Simulink est le suivant :

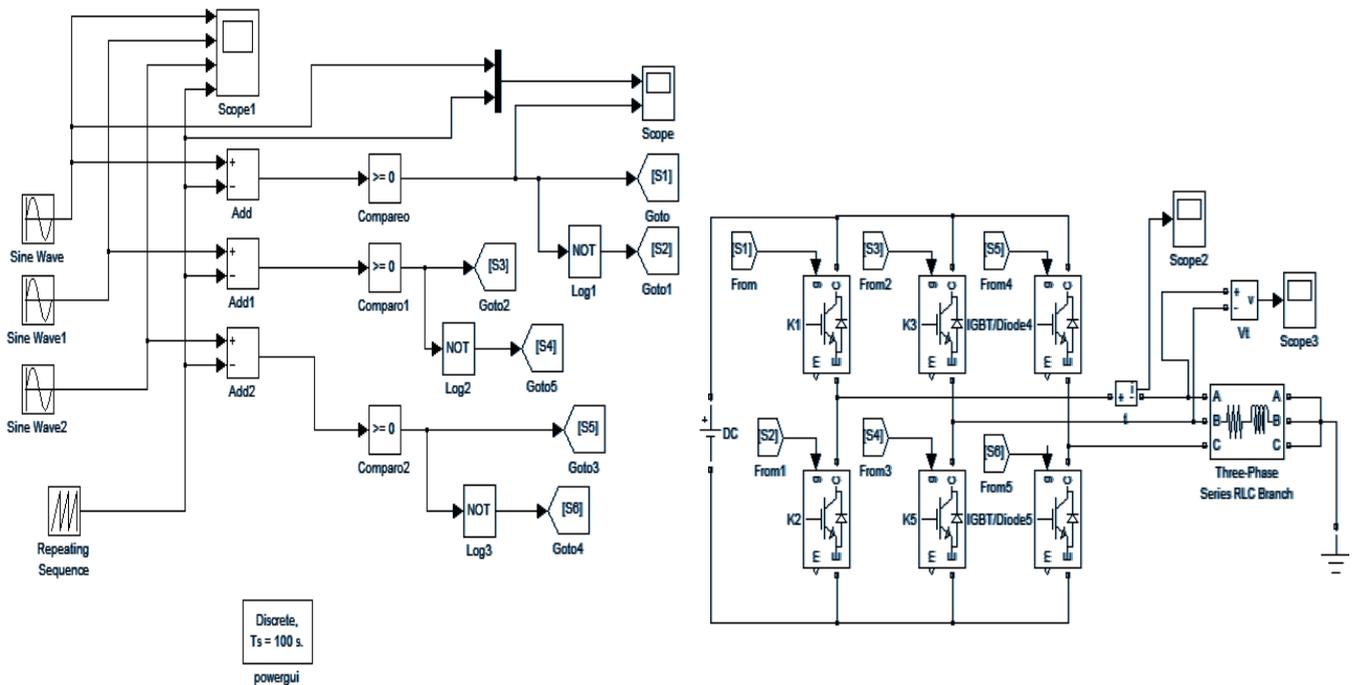


Figure III.13: Schéma de montage de la MLI sinus-triangulaire avec onduleur triphasé.

Les figures suivantes présentent l'allure du courant, de tension et le spectre d'harmoniques pour différents indices de modulation :

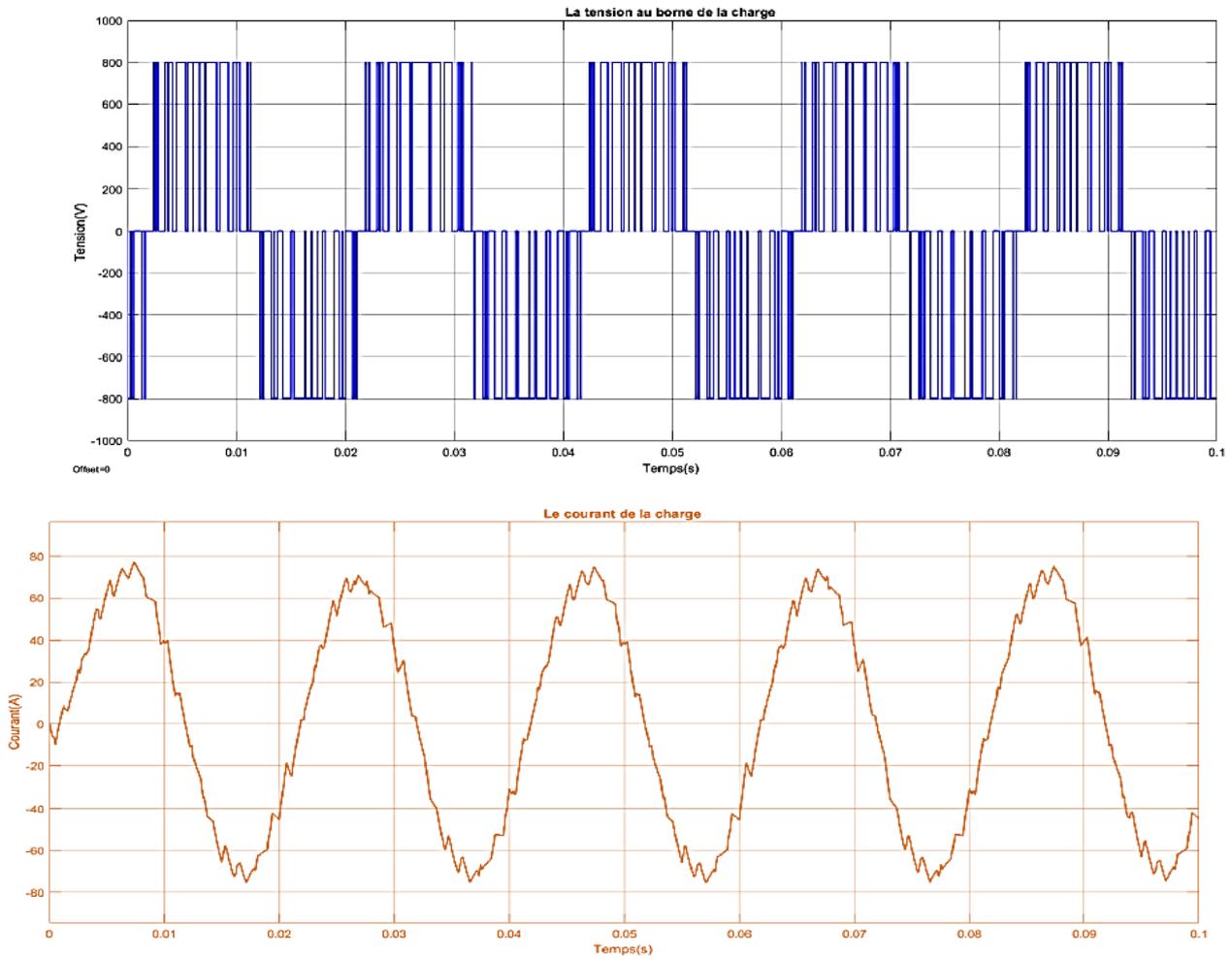


Figure III.14: Allure de tension de sortie et du courant en fonction du temps ( $M=0.7$ ).

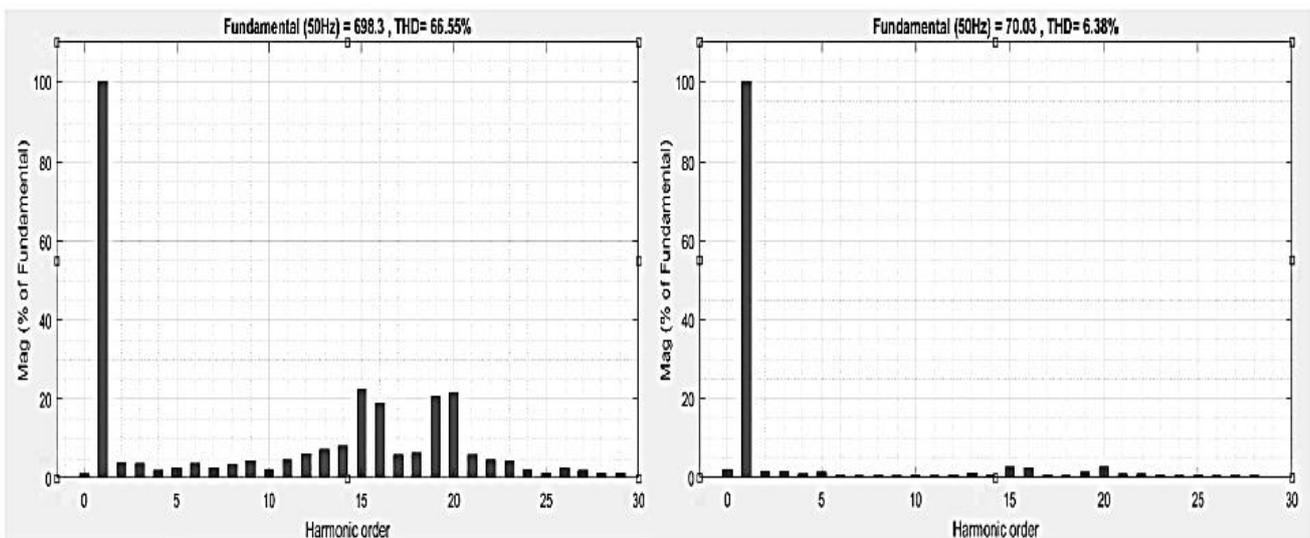


Figure III.15: Spectre d'harmonique de la tension du courant (charge RL)  $M=0.7$ .

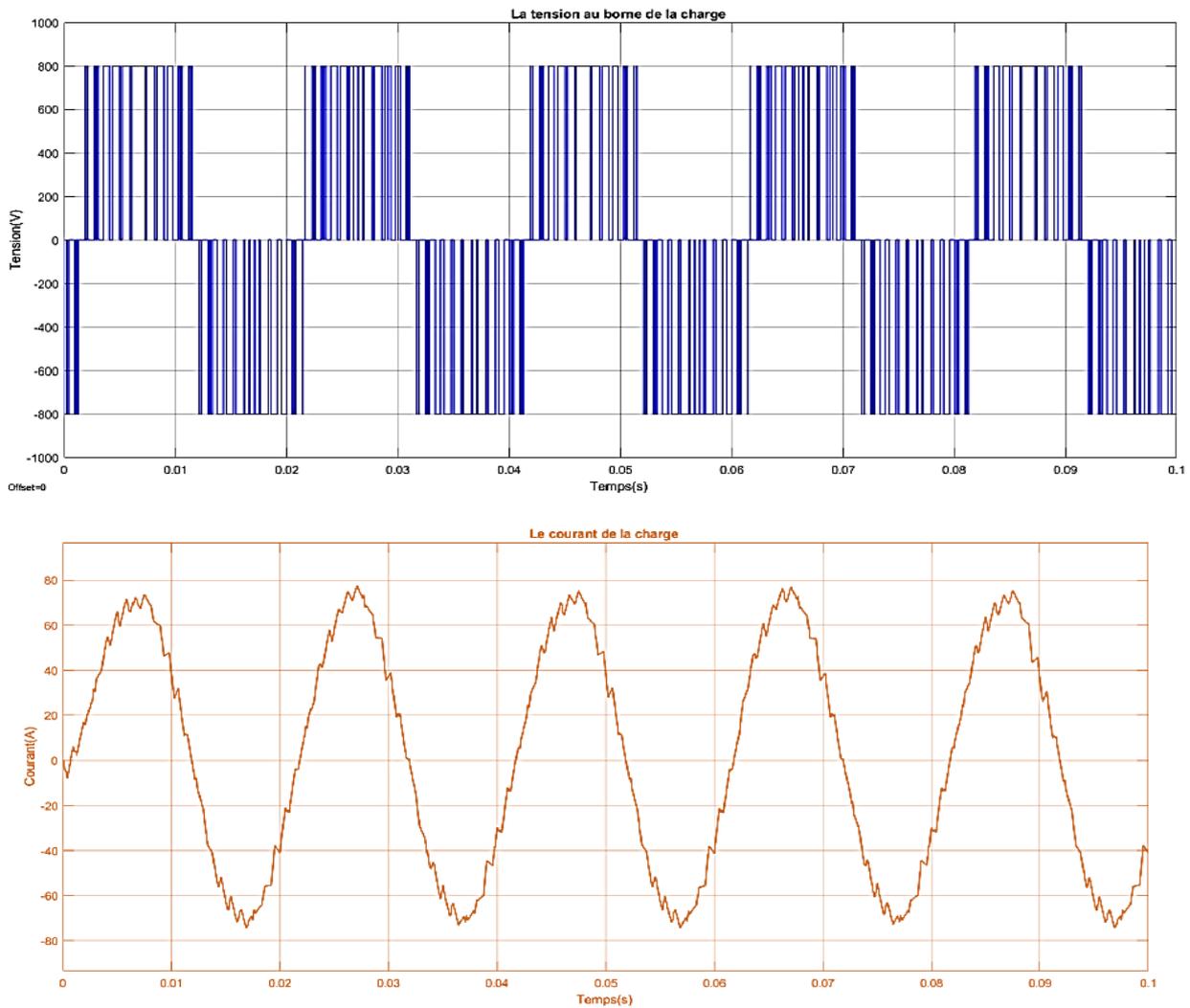


Figure III. 16: Allure de la tension de sortie et du courant en fonction du temps ( $M=0.9$ ).

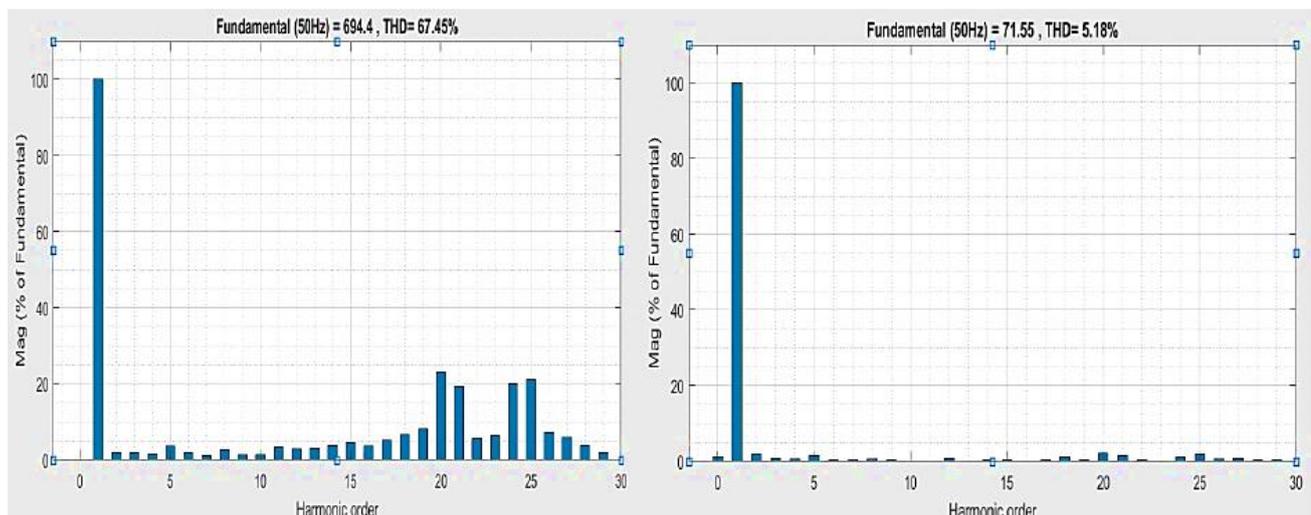


Figure III. 17: Spectre d'harmonique de la tension du courant (charge RL)  $M=0.9$ .

### III.4.1.1 Interprétation :

D'après les résultats de Simulation on remarque :

- Pour un faible indice de modulation, les harmoniques proches du fondamentale, (3<sup>ème</sup> et 5<sup>ème</sup> harmonique), sont faibles tandis que les harmoniques de rang élevé prennent une amplitude importante.
- Pour l'indice de modulation  $M=0.9$ , le taux de distorsion du signal du (courant-tension) diminue ce qui donne un signal proche de la sinusoïde.
- L'augmentation de l'indice de modulation « m » permet de repousser les harmoniques de la tension de phase vers les fréquences très élevées.
- La MLI sinusoïdale triangulaire permet de faire varier la valeur du fondamental de la tension de sortie.
- L'augmentation de la valeur de l'indice de modulation, améliore les performances des grandeurs de sortie notamment le THD.
- Les harmoniques de rang 3 ou multiple de 3 sont supprimées dans la tension de sortie pour  $M=0.9$ .
- Pour le choix de « m », on doit tenir compte des pertes supplémentaires pendant les commutations d'un état à l'autre. Ces pertes croissent lorsque la fréquence de modulation augmente.
- Le contenu d'harmonique généré par une onde MLI entraîne des pertes dans le réseau et dans la charge. Elles génèrent dans les machines tournantes des oscillations du couple, des bruits acoustiques. Il faut, donc, minimiser ces harmoniques. D'où la nécessité d'avoir une technique plus performante.

### III.5 Conclusion :

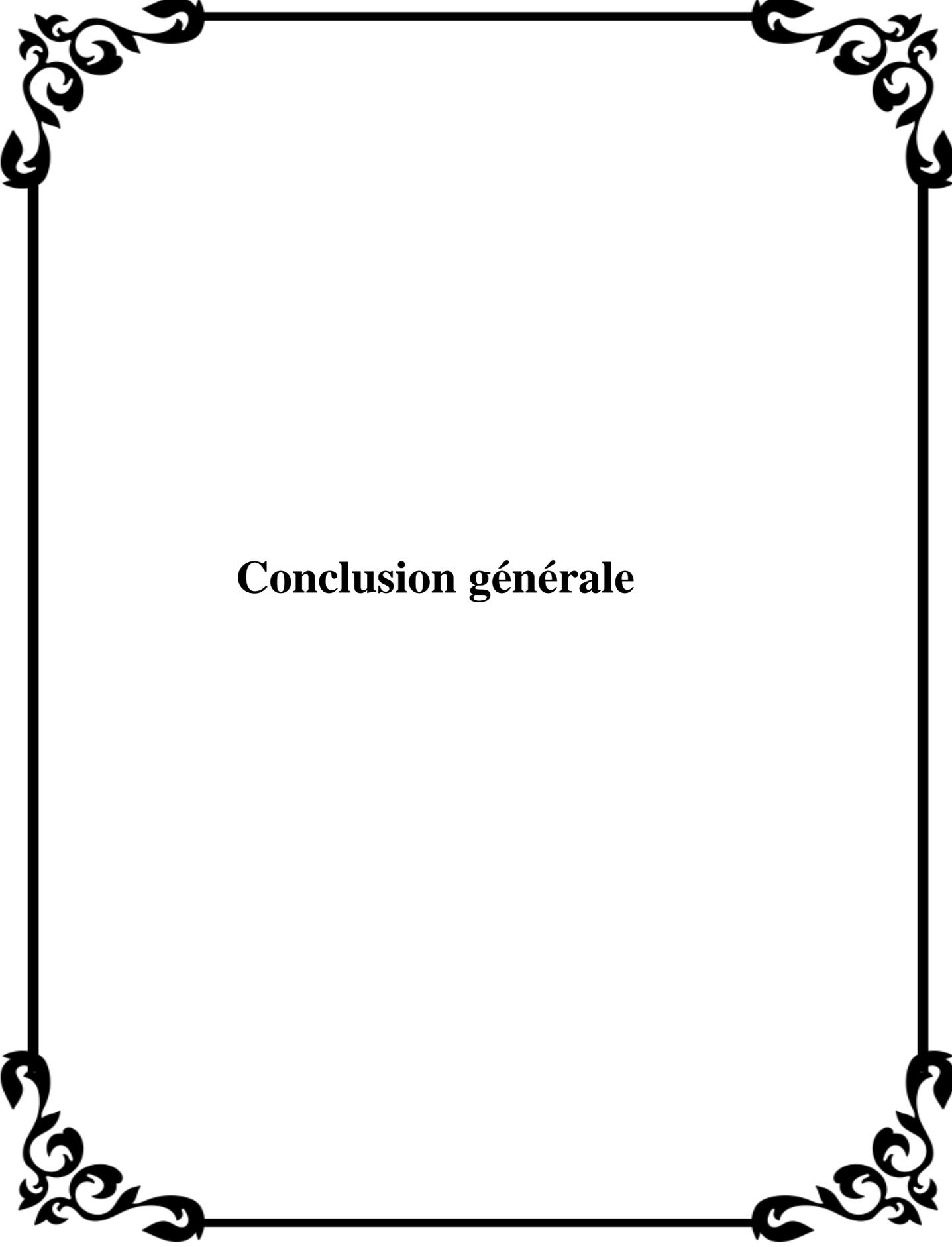
L'amélioration des performances d'un système alimenté par un onduleur passe par le choix d'une bonne stratégie de commande. Après avoir simulé les différentes stratégies de commande, nous avons tiré les conclusions suivantes :

Les commandes classiques ne permettent un réglage efficace de la tension de sortie que par variation de tension de bus continu. Le contenu harmonique des commandes  $120^\circ$ ,  $180^\circ$  et  $150^\circ$  est plus important que celui des techniques à modulation de largeur d'impulsion notamment les composants de faible fréquence.

Concernant la modulation de largeur d'impulsion :

La forme d'onde de la tension de sortie est meilleure que celle issue des commandes classiques. Elle permet une bonne neutralisation d'harmoniques par rapport aux onduleurs à onde carrée ou en un seul créneau. Elle permet de repousser vers des fréquences élevées et non de supprimer les harmoniques de la tension de sortie. Cela facilite le filtrage.

Les harmoniques résultants de cette commande, se regroupent en familles centrées autour de l'indice de modulation. Elle permet de faire varier la valeur du fondamental de la tension de sortie.



## **Conclusion générale**

### Conclusion générale

Les onduleurs sont très utilisés dans les domaines d'applications les plus variés, dont le plus connu est sans doute, celui pour des applications domestiques dans des sites isolés, ceci pour des raisons de coût, sachant le budget élevé des installations classiques. L'objectif de ce travail était de simuler les onduleurs solaires monophasés et triphasés.

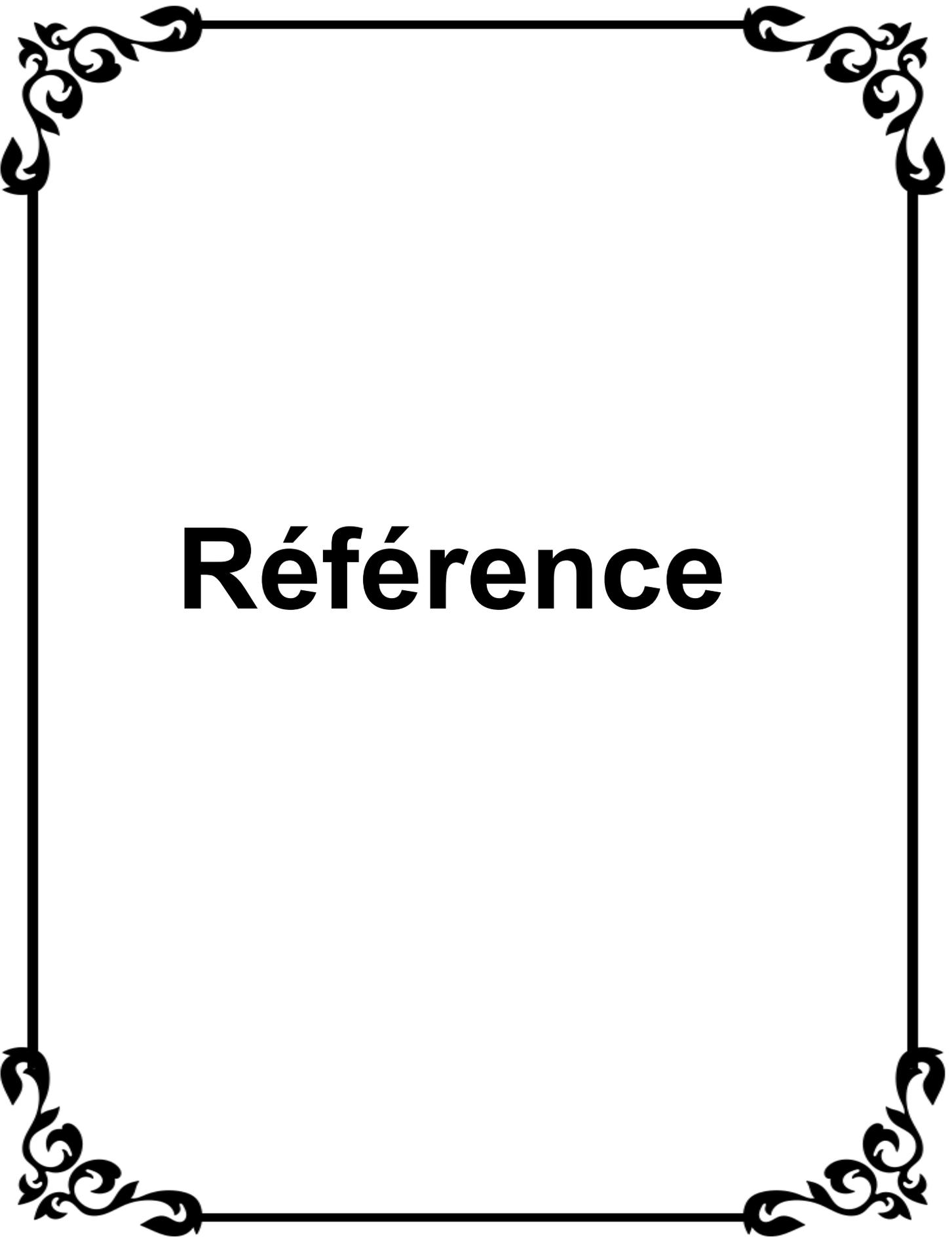
Dans le domaine de la conception des onduleurs, la problématique est que le signal, issu de la conversion de l'énergie solaire en courant continu, n'est pas sinusoïdale et donc non approprié avec les charges AC.

A cet effet, on a fait appel aux commandes, dont le rôle fondamental est d'améliorer la qualité du signal (tension, taux d'harmonique) et de permettre la modification des fréquences.

Dans le cadre du présent travail et afin l'amélioration de la qualité du signal de sortie, on a fait appel à deux commandes différentes. La première est dite symétrique dont le résultat est un signal rectangulaire à cause du nombre élevé d'harmoniques proches du fondamentale. La deuxième s'appelle la commande décalée, son résultat est un signal toujours rectangulaire, mais avec un nombre réduit d'harmoniques. Pour avoir un signal approprié pour des charges AC (Sinusoïdal), on a utilisé un autre type de commandes dit MLI, dont le principe est basé essentiellement sur la repousse ou l'élimination des harmoniques. Dans ce cadre, on a eu l'occasion de tester et d'utiliser un seul type de la méthode MLI connue sous le nom MLI sinus triangle, basée sur la repousse des harmoniques proches de la fondamentale. Cette commande permet l'obtention d'un signal sinusoïdal, mais avec des hautes fréquences de commutation, provoquant ainsi des pertes qui réduisent l'amplitude du signal.

A titre de perspective à ce travail on recommande :

- ✓ De tester la deuxième commande de MLI, c'est la MLI programmée, qui élimine carrément les harmoniques sélectionnées, et dans laquelle les angles de commutation sont calculés au préalable en utilisant la méthode numérique (Newton-Raphson).
- ✓ De tester aussi d'autres méthodes de calcul des angles d'amorçages initiaux telle la méthode de Newton-Raphson modifiée ou l'utilisation des algorithmes génétiques.
- ✓ D'investiguer d'autres structures multiniveaux donnant un signal de sortie proche de la sinusoïde.



# Référence

## Référence

---

- [1] **technologie de future**.electricite ecologie,le rayonnement infrarouge de terre :source d energie renouvelable.24décembre 2015
- [2] **M.R. Yaïche, S.M.A. Bekkouche**, « Conception et Validation d'un Programme sous Excel pour L'estimation du Rayonnement Solaire Incident en Algérie ». Cas d'un Ciel Totalelement Clair, Revue des Energies Renouvelables Vol, 11 N°3, 2008, 423 - 436.
- [3] **S.Petibon**, «Nouvelle sarchitectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques»thèse université deToulouse,2009.
- [4]**Attou Nasr-Eddine**, 'Simulation et réalisation d'un onduleur triphasé pour pompage solaire' mémoire de master université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes- 2018
- [5]**Zhao J., Wang A., Altermatt P.P.,Wenham S.R., Green M.A.** "24% efficient silicon solar cells".Photovoltaic Energy Conversion.*Conference Record of the Twenty Fourth.IEEE Photovoltaic Specialists Conference - IEEE First World Conference*, Volume 2,5-9 Dec. 1994 Page(s):1477 - 1480 vol.2
- [6]**Zhao J., Wang A., Campbell P., Green M.A.** "A 19.8% efficient honeycomb multi crystalline silicon solar cell with improved light trapping". *Electron Devices, IEEE Transactions*, Volume 46, Issue10, Oct.1999, Page(s):1978–1983
- [7] **Géotzberger A, Luther J, Willeke G.** solar cells: past, present, future, solar energy materials & solar cells.
- [8] **Luque, S. Hegedus.** *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering (2nd edition)*. John Wiley and Sons, 2011
- [9]**Daoud Amine**, «Contrôle de la puissance d'un générateur photovoltaïque pompage solaire », thèse de doctorat université d'Oran, 2013.
- [10]**Ministère de l'énergie en Algérie**, « *Energies Nouvelles, Renouvelables et Maitrise de l'Energie* ».
- [11] **Jane A. Peterson**, Seth Dunn, «Hydrogen Futures: Toward a Sustainable Energy System » World watch Paper 157, August 2001
- [12] **D.Amina Mekhelfi**, « Evolution des exportations gazières de l'Algérie et son impact au sein de l'Opec (1970 à 2012) », Université Kasdi Merbah – Ouargla, revue 04/ 2013.

## Référence

---

- [13] **AnneMarieLIENHARDT**, « Etude de la Commande Structure de Conversion d'Énergie de Type SMC (Convertisseurs Multicellulaire Superposé) », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2006.
- [14] **B.K. Bose**, « Power Electronic sand AC Drives », Edition Practice Hall, 1986.
- [15] **L. M. Tolbert**, « Multi level Converters for Large Electric Drives », IEEE Transactions on Industry Application, Vol.35, pp.36-44, January/February 1999.
- [16] **BRIGHEN Haroun et HALAIMIA Safouane**, « Etude et analyse de la commande des onduleurs Multi-niveaux par MLI sinusoïdale », MEMOIRE Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master, UNIVERSITE LARBI TEBSSI-TEBESSA-Faculté des Sciences et de la Technologie Département de Génie des Mines, 2016.
- [17] **S. Fernandez**, « Comparaison des performances électriques d'un onduleur triphasé deux niveaux à commandes directes et indirectes connecté au réseau », Thèse de doctorat, Université Lille 1, Nord de France, 2013.
- [18] **Ch. Krishnakantha, P. Deepthi Sree**, « Analysis, Simulation & Comparison of Various Multilevel Inverters Using Different PWM Strategies », IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering, Vol. 9, no. 2, PP 54-65, 2014.
- [19] **Houria. BenZemmouch** « Application de la MLI Vectorielle aux Onduleurs Multi niveaux à base de GTO et d'IGBT », Mémoire Présenté en vue d'obtention du diplôme de Magister, Université Badji Mokhtar Annaba. 2010.
- [20] **MANSOURI Abdallah** « Commande des Onduleurs Multiniveaux », Mémoire Présenté en vue d'obtention du diplôme de MASTER, UNIVERSITE DE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA. 2016.
- [21] **P. Purkait, R.S. Sriramakavacham**, « A New Generalized Space Vector Modulation Algorithm for Neutral Point Clamped Multi level Converters », Progress in Electromagnetics Research Symposium, Cambridge, pp. 330-335, March 2006.
- [22] **Subrata K. Mondal, Joao O. P. Pinto, and Bimal K. Bose**, « A Neural Network Based Space Vector PWM Controller for a Three Level Voltage Fed Inverter Induction Motor Drive », IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.38, N°3, pp.660-669, May/June 2002.

## Référence

---

- [23] **YoHanLee, BumSeokSuh and Dong SeokHyun**, « A Novel PWM Scheme for a Three Level Voltage Source Inverter With GTO Thyristors », IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.32, N°2, pp.260-268, March/April 1996.
- [24] **Houria.BenZemammouch** « Application de la MLI Vectorielle aux Onduleurs Multiniveaux à base de GTO et d'IGBT », Mémoire Présenté en vue d'obtention du diplôme de Magister, Université Badji Mokhtar Annaba. 2010.
- [25] **MANSOURI.Abdallah** « Commande des Onduleurs Multi niveaux », Mémoire Présenté en vue d'obtention du diplôme de MASTER, UNIVERSITE DE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA. 2016.
- [26] **Faiçal.Mnif** « Etude et Réalisation des lois de commande par mode de Glissement et par approche Géométrique: Application à un Onduleur De Tension Monophasés », Thèse présentée à l'université du Québec a Trois-Rivières Comme Exigence Pour l'obtention du Diplôme de maitrisicien ces appliquées en électronique industrielle, Université du Québec. 1991.
- [27] **Ammiche.Abdennour** « Commande des onduleurs multi niveaux de tension à diode flottante » mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du Diplôme de master en génie électrique. Université de m'sila 2012/2013.
- [28] **J-S.MARIETHOZ**, "Etude Form elle pour la Synthèse de convertisseurs Multi niveaux Asymétriques : Topologies, Modulation et Commande", Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne, 2005.
- [29] **B.OUAHID**, "Contribution à l'Analyse des Onduleurs Multi-niveaux Fonctionnement Symétrique et asymétrique", Mémoire d'ingénieur d'état, Département d'électrotechnique, université de Batna, 2005.
- [30] **Berrezek .Farid**, 'Etude des Différentes Techniques de Commande des Onduleurs à MLI Associés à une Machine Asynchrone' Mémoire de magister Université de Annaba 2006
- [31] **AttouNasr-Eddine**, 'Simulation et réalisation d'un onduleur triphasé pour pompage solaire' mémoire de master université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes- 2018
- [32] **M. Bousehaba**, Réalisation d'une commande MLI à choix multiple" Mémoire de Master Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen – 2017
- [33] **A. Aibeche**, 'Commande vectorielle robuste de la machine asynchrone avec estimation du flux rotorique en temps réel' Mémoire de Magister. Université M'hamed Bougara Boumerdes. Faculté Des Hydrocarbures et de La Chimie - 2009.

## Référence

---

[34] **Berrabah. Fouad**, 'Commande d'un onduleur triphasé par MLI vectorielle développé à base de la séquence aligné à droite (right alignedsequence)' Diplôme de Magister Université de Annaba – 2008

[35] **M. Hafedh Ben Abdelghani**, 'Etude, Conception Et Réalisation D'un Convertisseur Statique Hybride Multiniveaux Tolérant Aux Défauts' 'Doctorat De L'université De Toulouse – 2006

