

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البلدية
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie
قسم الآلية والكهروتقني
Département d'Automatique et électrotechnique



Mémoire de Master

Filière : Électrotechnique
Spécialité : Machines électriques

Présenté par

SAID Abdelmalek

&

OUMEDI Oussama

Etude et simulation d'un onduleur multiniveaux

Proposé par : H.KAHLANE

Année Universitaire : 2023-2024

Remerciement

*Mon remerciement s'adresse en premier lieu à **ALLAH**, le tout puissant pour la Volanté, la santé et la patience qu'il m'a donnée durant ces longues années.*

*Je tiens aussi à remercier mon encadreur **Mr. KAHLANE Hamza** qui m'a apporté une aide précieuse, je lui exprime ma gratitude pour sa grande disponibilité, ainsi que pour sa compréhension et les encouragements qu'il m'a apportés.*

Nous remercions également les membres des jury pour l'effort qu'ils feront dans le but d'évaluer et examiner ce travail.

*Mes remerciements aussi s'adressent à tous Les enseignants du
Département d'électrotechnique et automatique,*

Un grand merci à tout les collègues de promotion électrotechnique (2019-2024) à tout l'ambiance et le soutien moral ont accompagné l'évolution de ce travail.

Dédicace

Tout d'abord, je remercie le Dieu, notre créateur de m'avoir donné la force, la volonté et le courage afin d'accomplir ce travail modeste.

Je dédie ce travail

A ma mère, la source de tendresse et la lumière qui guide mes routes et qui m'emmené aux chemins de la réussite,

Pour tous ses sacrifices consentis et ses précieux conseils,

Pour toute son assistance et sa surveillance.

A mon père que je le remercie énormément pour ses efforts,

Ses conseils et sa surveillance

pour tout les encouragent durant ma vie

pour tout le temp dans ma vie

À mes chers frères : Ali et Oussama

À mes chères sœurs

À mon binôme : Oussama Oumedi

À mes chers amis qui me donne l'aide dans ma vie : Ahmed, Nassim et Youcef

A tout ce que je connais sans exception

À tous mes enseignants sans exception

Abdelmalek SAID

Dédicace :

Tout d'abord, je commence par remercier Dieu et sa bonté pour cela

La patience et le courage qu'il m'a donné pour en arriver là.

Je dédie ce travail :

A ma chère mère

Une personne oublie tout, mais elle n'oublie pas l'odeur de sa mère. Elle est source de tendresse, de patience et de générosité. Peu importe ce que vous faites ou dites, je ne pourrai jamais vous remercier.

il doit. Votre compassion me couvre, et votre bienveillance me guide. Votre présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.

A mon cher père :

Aucune dédicace ne peut exprimer l'amour, l'appréciation, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour lui. Rien au monde ne vaut les efforts déployés jour et nuit pour mon éducation et mon bien-être. Ce travail est le résultat des sacrifices que vous avez consentis pour mon éducation et ma formation.

Et je remercie mes petites sœurs.

*Je remercie mon meilleur amis **Ramzi Allal** de m'avoir soutenu*

Exprimez mon amour.

À mes amis, Anis, RedHa, Youssef, Ahmed, Kiram, Nassim, Abderrahman, Ramzi.

À tous mes professeurs qui ont-ils contribué à ma formation.

*Enfin, **Abdelmalek**, qui a tout partagé avec moi dans ce travail*

Circonstances, qui a toujours fait preuve de courage et

Compréhensive envers moi et je le remercie pour la complicité que

Jugement au sein de notre binôme

OUMEDI Oussama

ملخص

الموجات متعددة المستويات تسمح بتوفير جهد اعلى و جودة افضل من الموجات التقليدية ذات المستويين ،يمتد مجال استخدامها الى مجالات الجهد المتوسط و العالى بما في ذلك الصناعة و المركبات الكهربائية و الطاقة المتجددة في اطار هذا العمل سندرس و نحكي هياكل متعددة المستويات جديدة باستخدام اكثر طريقتين شائعتين للتحكم :التردد المتغير بعرض النبض SPWM و تقنية SHE-PWM الهدف من العمل هو تقليل عدد المكونات (مم يقلل من الخسائر و التكاليف و تعقيد التحكم) مع تحسين جودة الجهد و التيار ،في النهاية سنحلل و نناقش النتائج المتحصل عليها

كلمات مفتاحية: SHE-PWM،الموجات متعددة المستويات،PSO,NR.

Résumé :

Les onduleurs multiniveaux permettent de délivrer une tension plus élevée et de meilleure qualité que les onduleurs conventionnels à deux niveaux. Leur champ d'application s'étend aux domaines des moyennes et hautes tensions, notamment dans l'industrie, les véhicules électriques et les énergies renouvelables. Dans le cadre de ce travail, nous étudierons et simulerons de nouvelles structures multiniveaux en utilisant les deux méthodes de commande les plus courantes : la modulation sinusoïdale à largeur d'impulsion (SPWM) et la technique (SHE-PWM). L'objectif est de minimiser le nombre de composants (réduisant ainsi les pertes, les coûts et la complexité de la commande) tout en améliorant la qualité de la tension et du courant (THD). Enfin, nous analyserons et discuterons les résultats obtenus.

Mots-Clés : SHE-PWM, Onduleurs multiniveaux, NR, PSO.

Abstract:

Multilevel inverters allow for higher voltage delivery and better quality than conventional two-level inverters. Their applications extend to medium and high voltage domains, including industry, electric vehicles, and renewable energy. In the scope of this work, we will study and simulate new multilevel structures using the two most common control methods: Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) and Selective Harmonic Elimination PWM (SHE-PWM). The objective is to minimize the number of components (thus reducing losses, costs, and control complexity) while improving voltage and current quality (THD). Finally, we will analyze and discuss the obtained results.

Key-Words : SHE-PWM, Multilevel inverter, NR, PSO.

Sommaire

Introduction générale :	1
Chapitre 01	
I.1 Introduction :	3
I.2 Energie solaire :	3
I.3 Le Rayonnement solaire :	4
I.3.1 Rayonnement direct :	5
I.3.2 Rayonnement diffuse :	6
I.3.3 Rayonnement solaire réfléchi :	6
I.3.3 Rayonnement globale :	6
I.4 Energies renouvelables en Algérie :	6
I.5 Gisement solaire en Algérie :	7
I.6 Effet photovoltaïque :	8
I.6.1 Définition et Historique du photovoltaïque :	8
I.7 La cellule photovoltaïque :	9
I.8 Différentes technologies des cellules solaires :	10
I.8.1 Silicium monocristallin :	10
I.8.2 Silicium poly cristallin :	11
I.8.3 Silicium amorphe :	11
I.8.4. Cellule Tandem :	12
I.8.5. Cellule multi-jonction :	12
I.8.6. Cellule TOPCON :	13
I.8.7. Cellule solaire pérovskite :	13
I.9 Facteurs limitatifs du rendement :	14
I.9.1 Influence de l'éclairement :	14
I.9.2 Influence de la température :	15
I.10 Panneaux Photovoltaïques :	15
I.11 Les systèmes photovoltaïques :	16
I.11.1 définition :	16
I.11.2 Classification d'un système solaire photovoltaïque :	17
I.11.2.1 Système autonome :	17
I.11.2.2 Système PV raccordée aux réseaux :	17
I.11.2.3 Système hybride :	18

Sommaire

I.13 Conclusion :	18
-------------------	----

Chapitre 02

II.1 Introduction :	20
II.2 Définition et généralité sur les onduleurs :	20
II.2.1 Les convertisseur statique :	20
II.2.2 Convertisseur DC-AC (onduleur) :	21
II.2.3 Types d'onduleurs :	21
II.2.3.1 Onduleur autonome :	21
II.2.3.2 Onduleur non autonome :	21
II.2.4 Applications des onduleurs :	22
II.2.5 Onduleur de tension :	22
II.2.5 Principe de fonctionnement d'un onduleur de tension :	22
II.2.6 Les topologies d'un onduleur a deux niveaux :	22
II.2.6.1 Onduleur monophasé en demi pont H :	23
II.2.6.2 Onduleur monophasé en pont H :	23
II.2.7 Onduleur triphasé :	24
II.3 les onduleurs multiniveaux :	25
II.3.1 Définition :	25
II.3.2 principes de fonctionnement d'un onduleur multiniveaux :	25
II.3.3 Différentes topologies des onduleurs multi-niveaux :	26
II.3.4 le développement des topologies des onduleur multiniveaux :	26
II.3.5 Topologies conventionnels :	27
II.3.5.1 Onduleur a diode de bouclage (NPC) :	27
II.3.5.2 Onduleur a condensateurs flotteurs (FC) :	30
II.3.5.3 Onduleurs en cascade (CHB) :	32
II.3.6 Comparaison entre les trois topologies :	35
II.3.7 Les avantages et les inconvénients des topologies conventionnels :	35
II.3.8 Topologies modernes :	38
II.3.8.1 Topologies sans pont H :	39
II.3.8.2 Topologies symétrique avec un pont H :	40
II.3.8.3 Topologies Asymétrique avec un pont H :	41
II.4 CONCLUSION :	43

Chapitre 03

Sommaire

III.1 Introduction :.....	44
III.2 Commande par hystérisées :	44
III.3 Commande plein d'ondes :	45
III.4 Commande par MLI Sinusoïdale (SPWM) :	47
III.5 Commande par MLI vectorielle :.....	46
III.6 La commande par élimination sélective des harmoniques (SHE) :	48
III.6.1 Décomposition en séries de Fourier :.....	49
III.6.2 Les méthodes d'optimisation :	51
III.6.3 Optimisation de la technique SHE :.....	52
III.6.3.1 L'optimisation par Newton-Raphson :.....	52
III.6.3.2 L'optimisation d'essaim de particule (PSO) :.....	54
III.7 Perturbations harmoniques en courant et en tension :	56
III.7.1 Origine des harmoniques :.....	56
III.7.2 l'effet des harmoniques :.....	57
III.8 Conclusion :	58
Chapitre 04	
IV.1 Introduction :.....	59
IV.2 Simulations et résultats :	59
IV.2.1 Le premier scenario :.....	59
IV.2.2 Le deuxième scenario :.....	64
IV.2.3 Le troisième scenario :.....	67
IV.2.4 Le quatrième scenario :	69
IV.2.5 le cinquième scenario :	76
IV.3 Conclusion :	79
Conclusion générale :.....	79

Liste des figures

Figure I. 1: Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la Convention AM	3
Figure I. 2 : Spectres Solaires relevés dans plusieurs conditions selon la convention AM. Source NREL Solar Spectrum.....	4
Figure I. 3: Composantes du rayonnement solaire.	5
Figure I. 4: Les quatre types de rayonnement	6
Figure I. 5: Irradiation globale journalière reçue sur un plan horizontal sur le territoire Algérien.	8
Figure I. 6: Effet photovoltaïque.....	8
Figure I. 7: Schéma d'une cellule photovoltaïque.	10
Figure I. 8 : Cellule monocristalline	11
Figure I. 9: Cellule photovoltaïque en silicium poly cristallin	11
Figure I. 10: Cellule photovoltaïque en silicium amorphe	12
Figure I. 11: Cellule photovoltaïque Tandem	12
Figure I. 12: Cellule photovoltaïque multi jonction	13
Figure I. 13: Cellule TOPCON	13
Figure I. 14: Caractéristique puissance-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement.	14
Figure I. 15: Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement.....	14
Figure I. 16: Caractéristique puissance-tension d'une cellule en fonction de la température.	15
Figure I. 17: Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de la température.....	15
Figure I. 18: Les composantes de panneau photovoltaïque.	16
Figure I. 19: Exemple de la structure d'un système PV autonome.	17
Figure I. 20: Système PV raccordée au réseau.....	18
Figure I. 21: Système hybride.....	18
Figure I. 21 : Système hybride.....	18
Figure I. 21: Système hybride.....	18
Figure I. 21: Système hybride.....	18
Chapitre 02 :	
Figure II. 1 : Les différents convertisseurs	20
Figure II. 2 : Schéma de principe de la conversion continu-Alternative (DC-AC).	21
Figure II. 3: Schéma de principe d'un onduleur monophasé en demi-pont.....	23
Figure II. 4: Schéma de l'onduleur monophasé en pont H	24
Figure II. 5: Schéma de l'onduleur triphasé.....	24
Figure II. 6: Schéma d'un bras d'onduleur.	25
Figure II. 8: L'histoire des onduleurs multiniveaux.....	26
Figure II. 9: Onduleur NPC de cinq niveaux	28
Figure II. 10: Onduleur NPC a sept niveaux.....	29
Figure II. 11: Onduleur FC de cinq niveaux	31
Figure II. 12: Onduleur FC a sept niveaux	32
Figure II. 13: Onduleur CHB de cinq niveaux.....	33
Figure II. 14: Onduleur CHB a sept niveaux	34
Figure II. 15: Classification des nouvelles topologies récentes d'onduleurs multiniveaux.....	38
Figure II. 16 : La Topologie PUC	39

Liste des figures

Figure II. 17: Topologies SCSS à sept niveaux	40
Figure II. 18: Topologie en cascade généralisé par n niveaux propose par Babaie et al [35].....	42
Figure II. 19: Topologie à 6 interrupteurs propose par Babaie et al [35].....	42

Chapitre 03 :

Figure III. 1 : Schéma de commande par hystérésis.....	45
Figure III. 2: Exemple d'un signale de sortie de la commande plein onde	46
Figure III. 3: Exemple de vecteur référence dans le cas de la modulation vectorielle (SVC).....	48
Figure III. 4: Commande SPWM d'un onduleur a 2 niveaux.....	47
Figure III. 5: Différentes formes de porteuses multiniveaux, (a)PD, (b)POD, (c)APOD.	47
Figure III. 6 : Tension de sortie avec une configuration à P niveaux	49
Figure III. 7: Les méthodes d'optimisation	52
Figure III. 8 : Organigramme de calcule les angles par la méthode de newton-raphson.....	54
Figure III. 9 : Organigramme générale de PSO.....	56
Figure III. 10: Diagramme de Fresnel des puissances.....	57

Chapitre 04 :

Figure IV. 1: Simulation de l'onduleur de six interrupteurs.	60
Figure IV. 2: Onduleur sept niveaux avec six interrupteurs.....	60
Figure IV. 3: Signaux de commande.....	61
Figure IV. 4 : Signaux de sortie	61
Figure IV. 5: Spectre de tension et de courant	61
Figure IV. 6 : Angles de commutation en fonction de l'indice de modulation	62
Figure IV. 7: Onduleur cinq niveaux avec six interrupteurs	62
Figure IV. 8 : Les signaux de commande.....	63
Figure IV. 9: Signaux de sortie	63
Figure IV. 10: Spectre de tension et de courant	63
Figure IV. 11 : Simulation de l'onduleur a sept niveaux NPC.....	64
Figure IV. 12: Onduleur a sept niveaux avec topologie NPC	65
Figure IV. 13 : Signaux de commande.....	65
Figure IV. 14: Signaux de sortie	66
Figure IV. 15: Spectre de tension et de courant	66
Figure IV. 16: Schéma de simulation de la commande SPWM.....	67
Figure IV. 17: Simulation de la commande APOD.....	68
Figure IV. 18: Signaux de commande.....	68
Figure IV. 19: Signaux de sortie.	69
Figure IV. 20: Spectre de tension et de courant	69
Figure IV. 21 : Angles de commutation en fonction de l'indice de modulation	70
Figure IV. 22 : Spectre de tension.....	70
Figure IV. 23: Spectre de tension (à fréquence limite 1000 Hz).....	71
Figure IV. 24 : Spectre de tension (à fréquence limite 400 Hz).....	71

Liste des figures

Figure IV. 25: Spectre de tension	71
Figure IV. 26: Spectre de tension (à fréquence limite 1000 Hz).....	72
Figure IV. 27: Spectre de tension (à fréquence limite 400 Hz).....	72
Figure IV. 28: Spectre de tension	74
Figure IV. 29: Spectre de tension (à fréquence limite 1000 Hz).....	74
Figure IV. 30: Spectre de tension (à fréquence limite 400 Hz).....	74
Figure IV. 31: Spectre de tension	75
Figure IV. 32: Spectre de tension (à fréquence limite 1000 Hz).....	75
Figure IV. 33: Spectre de tension (à fréquence limite 400 Hz).....	75
Figure IV. 34: Filtre passe-bas LC et son diagramme de Bode	77
Figure IV. 35: Simulation d'un onduleur sept niveaux plus filtre.....	77
Figure IV. 36: Signaux de sortie	78
Figure IV. 37: Spectre de tension et de courant	78

Liste des tableaux

Liste des tableaux :

Chapitre 01

Tableau I.1: Potentiel solaire.....	7
-------------------------------------	---

Chapitre 02

Tableau I. 1 les trios niveaux de tension possibles.....	23
--	----

Tableau II.2 : Nombre des composants de la structure NPC.....	27
---	----

Tableau II.3 :les cinq niveaux possibles pour un onduleur NPC.....	28
--	----

Tableau II.4 : les sept niveaux possibles pour un onduleur NPC.....	29
---	----

Tableau II.5 : Nombre des composants de la structure FC.....	30
--	----

Tableau II.6 : les cinq niveaux possibles pour un onduleur CHB.....	33
---	----

Tableau II.7 : les sept niveaux possibles pour un onduleur CHB.....	34
---	----

Tableau II.8 : comparaison des trois topologies de base.....	35
--	----

Tableau II.9 : comparaison entre les trois topologies conventionnelles.....	37
---	----

Tableau II.10 : commutation des interrupteurs pour chaque niveau(SCSS).....	41
---	----

Tableau II.11 : commutation des interrupteurs pour chaque niveau.....	43
---	----

Chapitre 04

Tableau IV.1 : Comparaison des composants des topologie NPC et onduleur de six interrupteurs.....	65
---	----

Tableau IV.2 : comparaison entre les valeurs de THD.....	74
--	----

Abréviation

AC	Alternative Courant
AM	Air Masse
CHB	Cascade H-Bridges
DC	Direct Courant
PV	Photovoltaïque
FC	Flying Capacitor
GPV	Générateur Photovoltaïque
MN	Multiniveaux
MLI	Multilevel Inverter
NPC	Neutral Point Clamped
NR	Newton-Raphson
PPM	Point de Puissance Maximale
PWM	Pulse Width Modulation
SCSS	Series Connected Switched Sources
SHE	Selective Harmonic Elimination
SPWM	Sinusoidal Pulse Width Modulation
THD	Total Harmonic Distortion

INTRODUCTION

GÉNÉRALE

Introduction générale

L'électronique de puissance est un domaine essentiel dans le domaine de l'électricité, touchant plusieurs secteurs tels que le réseau électrique, les transports (urbains, ferroviaires, maritimes, etc.), les énergies renouvelables et l'industrie. À notre époque, l'énergie est devenue l'un des éléments essentiels de la vie quotidienne. Par conséquent, il est nécessaire d'améliorer les performances des dispositifs d'électronique de puissance, car ils contribuent à l'amélioration des signaux électriques.

Les convertisseurs électriques sont des dispositifs basés sur des composants semi-conducteurs, ainsi que sur des éléments passifs tels que les résistances, les condensateurs et les inductances. Leur combinaison permet de convertir la forme du signal électrique, que ce soit la tension ou le courant, en une autre forme utilisée dans les applications industrielles actuelles. Cela nous donne quatre types de convertisseurs :

DC/DC : L'hacheur permet de convertir un signal continu en un signal continu commandable.

DC/AC : L'onduleur permet de convertir un signal continu en un signal alternatif.

AC/DC : Le redresseur permet de convertir un signal alternatif en un signal continu.

AC/AC : Le gradateur permet de convertir un signal continu en un signal continu commandable.

Un onduleur est un convertisseur statique qui assure la conversion entre le courant continu et alternatif. Ces dernières années, les convertisseurs statiques sont de plus en plus utilisés dans diverses applications. Certaines d'entre elles nécessitent une alimentation électrique à haute tension, facilement réglable et offrant de bonnes performances spectrales. De nouvelles techniques, telles que les convertisseurs multiniveaux et les nouvelles topologies, ont été développées. Elles permettent de générer plusieurs niveaux de tension en sortie du convertisseur. Le nombre de semi-conducteurs nécessaires pour réaliser ces topologies augmente avec le nombre de niveaux souhaités.

Dans ce travail, nous nous intéressons à l'étude des convertisseurs multiniveaux et aux différentes stratégies de commande. Nous comparons certaines stratégies pour minimiser le taux de distorsion harmonique (THD) et obtenir un signal presque sinusoïdal conforme aux normes nationales. Les chercheurs ont développé plusieurs topologies pour résoudre les problèmes des convertisseurs classiques à deux niveaux. Cette évolution a conduit aux convertisseurs multiniveaux, qui présentent de nombreux avantages et stimulent la recherche pour résoudre divers problèmes.

Parmi les méthodes utilisées pour améliorer les performances des onduleurs, nous examinons le nombre de niveaux de l'onduleur et le choix d'une stratégie de commande. Dans ce travail, nous étudions

Introduction générale

l'onduleur multiniveaux avec un nombre réduit des composants pour évaluer l'influence du nombre de niveaux sur les performances du convertisseur. Nous comparons également deux stratégies MLI sinusoïdales (SPWM) et la commande d'élimination des harmonique (SHE)

Cette étude repose sur des simulations réalisées sous Matlab Simulink.

L'objectif de notre étude théorique et de sa simulation est de déterminer une stratégie de commande efficace et de sélectionner le niveau de tension souhaité qui offre les meilleurs résultats pour notre approche. Nous avons restreint notre travail aux niveaux de tension à cinq et sept niveaux de tension.

- Le premier chapitre sera consacré aux systèmes photovoltaïques
- Le deuxième chapitre est consacré l'étude des onduleur deux niveaux et multiniveaux avec différent topologie
- Le troisième chapitre, on va étudie la commande des onduleurs multi niveaux.
- Le quatrième chapitre, Simulation et interprétation des résultats.
- Finalement, on termine notre travail par une conclusion générale.

CHAPITRE I:

***GÉNÉRALITÉ SUR LES
SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUE***

I.1 Introduction :

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion directe de l'énergie provenant des photons, compris dans le rayonnement solaire, en énergie électrique, par le biais de capteurs fabriqués avec des matériaux sensibles d'ondes du visible (cellules photovoltaïque PV). L'association de plusieurs cellules PV en série et /ou parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV). Ce dernier a une caractéristique statique courant tension $I(v)$ non linéaire et présentant un point de puissance maximale (PPM). Cette caractéristique dépend du niveau d'éclairement et de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble. [1]

I.2 Energie solaire :

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet ($0.2 \mu\text{m}$) à l'infrarouge lointain ($2.5 \mu\text{m}$). On utilise la notion AM pour Air Mass afin de caractériser le spectre solaire en termes d'énergie. L'énergie totale transportée par le rayonnement solaire sur une distance soleil-terre est de l'ordre de $1350\text{W}/\text{m}^2$ (AM0) dans l'espace hors atmosphère terrestre Figure I.1. Lorsque le rayonnement solaire traverse l'atmosphère, il subit une atténuation et une modification de son spectre, à la suite de phénomènes d'absorption et de diffusion dans les gaz, l'eau et les poussières. Ainsi, la couche d'ozone absorbe une partie du spectre lumineux provenant du soleil, et en particulier une partie des ultraviolets dangereux pour la santé. Le rayonnement solaire direct reçu au niveau du sol (à 90° d'inclinaison) atteint $1000\text{W}/\text{m}^2$ du fait de l'absorption dans l'atmosphère (AM1). Cette valeur change en

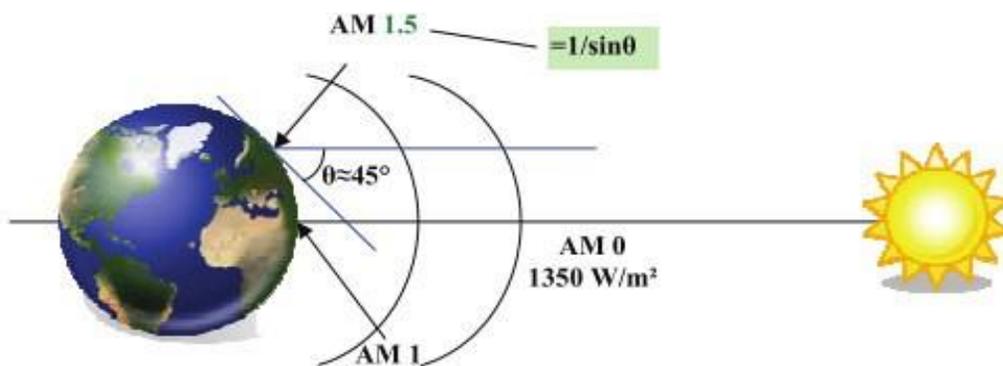


Figure I. 1: Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la Convention AM [2]

fonction de l'inclinaison des rayons lumineux par rapport au sol. Plus l'angle de pénétration θ est faible, plus l'épaisseur atmosphérique que les rayons auront à traverser sera grande, d'où une perte d'énergie conséquente. Par exemple, l'énergie directe transportée par le rayonnement solaire atteignant le sol avec un angle de 48° avoisine les 833 W/m^2 (AM1.5).

Pour connaître le rayonnement global reçu au sol, il faut ajouter à ce dernier le rayonnement diffus. Le rayonnement diffus concerne tout le rayonnement dont la trajectoire entre le soleil et le point d'observation n'est pas géométriquement rectiligne et qui est dispersé ou réfléchi par l'atmosphère ou bien le sol. En considérant ceci, on obtient une référence du spectre global notée AM1.5 avec une puissance de 1000 W/m^2 , la Figure I.2 correspondant à nos latitudes [2].

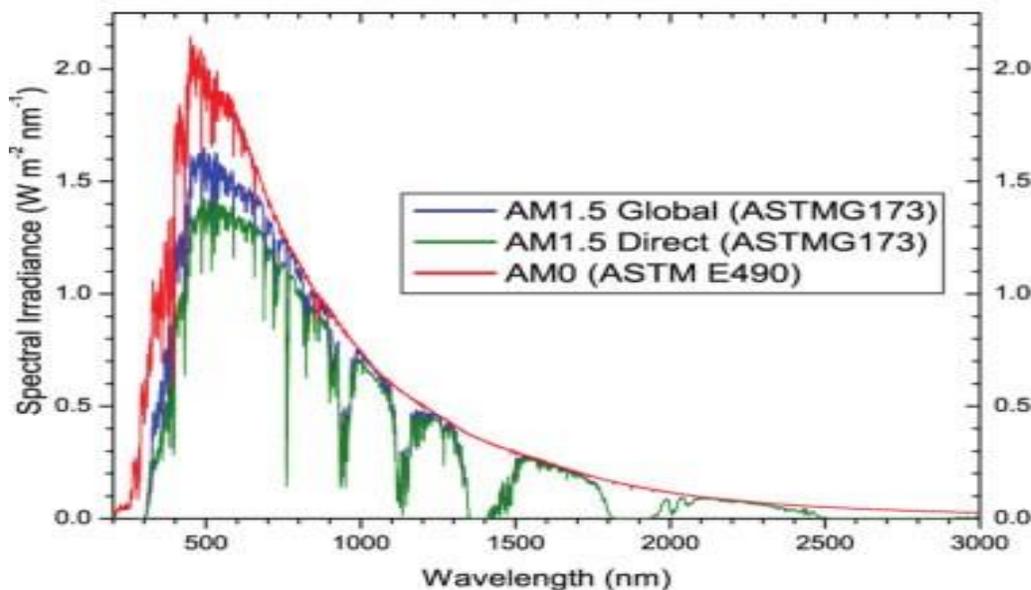


Figure I. 2 : Spectres Solaires relevés dans plusieurs conditions selon la convention AM. Source NREL Solar Spectrum

I.3 Le Rayonnement solaire :

Après son voyage dans l'espace le rayonnement solaire atteint l'atmosphère, une certaine quantité de ce rayonnement est absorbée par l'atmosphère, les nuages et les particules en suspension dans l'atmosphère, une autre partie est réfléchiée dans l'espace et une certaine quantité est absorbée par la surface de la terre. La surface de la terre renvoie aussi une certaine partie sous forme d'un rayonnement de différentes longueurs d'ondes en raison de la température superficielle de la terre. Environ 70% du rayonnement solaire total reste dans la surface de la terre et dans l'atmosphère. La rotation de la terre autour de son axe produit des variations

horaires dans l'intensité du rayonnement reçue par un emplacement donné pendant le jour et aboutit même à l'extinction complète pendant la nuit. [3]

associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement à :

- 9% dans la bande des ultraviolets (<0.4 μm)
- 47% dans la bande des visibles (0.4 à 0.8 μm)
- 44% dans la bande des infrarouges (>0,8 μm). [4]

Une des difficultés de l'énergie solaire est sa dépendance à la présence du soleil. Il n'est pas possible de stocker ou de transporter le rayonnement solaire. Par conséquent, le concepteur d'un système qui utilise l'énergie solaire doit connaître la quantité et la périodicité du rayonnement solaire à l'endroit choisi.

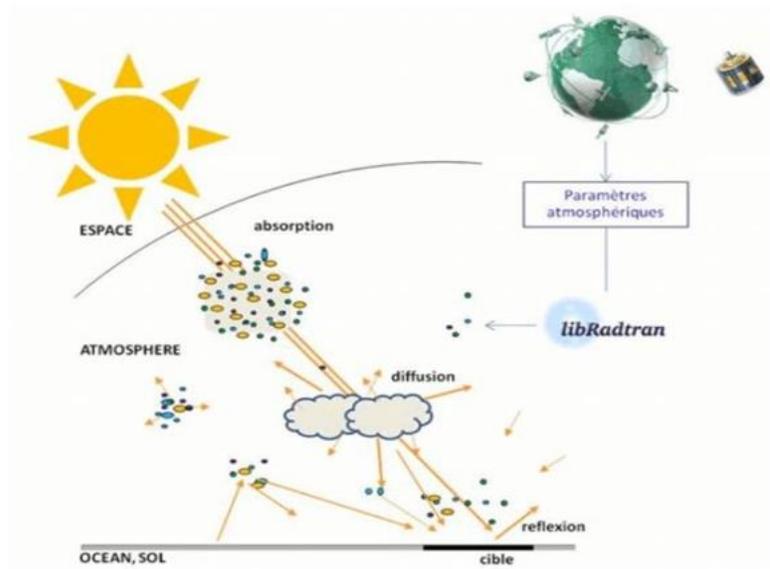


Figure I. 3: Composantes du rayonnement solaire. [5]

En réalité, il existe quatre catégories de rayonnement solaire :

I.3.1 Rayonnement direct :

Le rayonnement direct est le rayonnement solaire qui arrive sans obstacle sur un point de la Terre depuis le soleil. Le rayonnement réfléchi est celui qui rebondit sur la surface de réception, et cette composante est assez importante au Sahara. La quantité de rayonnement solaire sur un point de la Terre varie selon la position

du point, la saison, la diffusion atmosphérique, la nébulosité, la forme et la réflectivité de la surface de réception.

I.3.2 Rayonnement diffuse :

Cela s'explique par le fait qu'une partie du rayonnement solaire total est absorbée et diffusée par l'atmosphère, ainsi que réfléchi par les nuages et les aérosols. On peut évaluer cette situation à l'aide d'un pyranomètre équipé d'un écran qui cache le soleil.

I.3.3 Rayonnement solaire réfléchi :

Il s'agit du rayonnement qui rebondit sur le sol ou sur des éléments situés à sa surface. Cette réflectivité peut être élevée lorsque le sol renvoie beaucoup de lumière (eau, neige).

I.3.3 Rayonnement globale :

C'est la somme du rayonnement solaire direct, diffus et réfléchi par le sol. On peut le mesurer avec un pyranomètre ou un solarimètre qui n'ont pas d'écran.

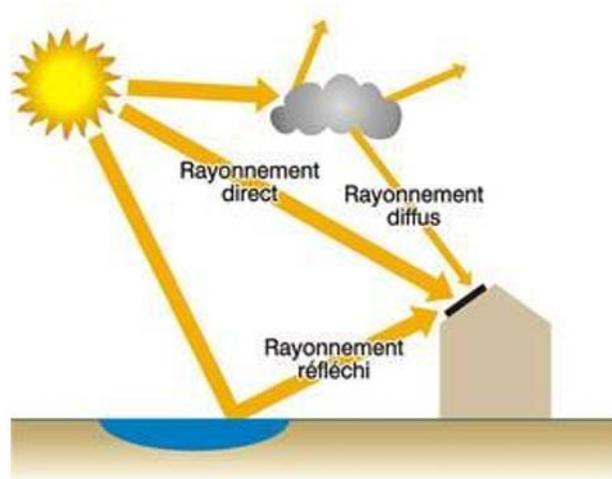


Figure I. 4: Les quatre types de rayonnement [5]

I.4 Energies renouvelables en Algérie :

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants du monde et en particulier de la région. 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). Le tableau I.1 résume le potentiel solaire en Algérie. [6]

Tableau I.1: Potentiel solaire. [6]

Régions	Région côtière	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m ² /an)	1700	1900	2650

I.5 Gisement solaire en Algérie :

Un champ solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible pour un lieu donné et sur une période de temps donnée. Son évaluation peut être effectuée en fonction des données globales de rayonnement solaire. L'Algérie possède l'un des plus grands gisements solaires au monde. Presque tous les territoires du pays reçoivent plus de 2000 heures d'ensoleillement par ans atteignant 3900 heures (l'Altiplano et le désert du Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² de surface horizontale représente environ 5 kWh dans la majeure partie du pays, soit près de 1700 kWh/m²/an dans le nord du pays et 2263 kWh/m²/an dans le sud du pays. L'énergie moyenne reçue quotidiennement sur une surface inclinée à la latitude est d'environ 7kWh/m²/jour. Elle est répartie comme suit :

- Au Nord : 5,6 kWh/m²/jour.
- Au Sud : 7,2 kWh/m²/jour [7].

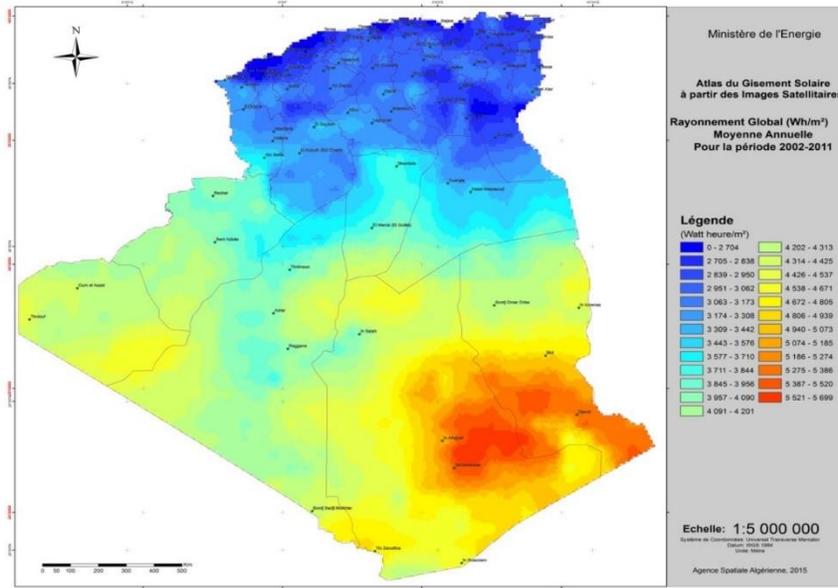


Figure I. 5: Irradiation globale journalière reçue sur un plan horizontal sur le territoire Algérien. [5]

I.6 Effet photovoltaïque :

I.6.1 Définition et Historique du photovoltaïque :

Le terme « photovoltaïque », souvent abrégé par les lettres PV, a été formé à partir des mots « photo », un mot grec signifiant lumière et « Volta », le nom du physicien italien Alessandro Volta, qui a inventé la pile électrochimique en 1800. L'effet photovoltaïque, c'est la conversion directe de l'énergie solaire en électricité [8].

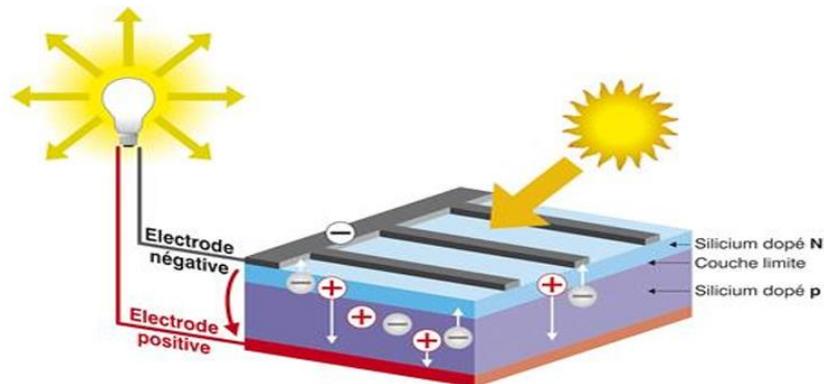


Figure I. 6: Effet photovoltaïque.[5]

I.7 La cellule photovoltaïque :

Les cellules solaires sont des composants optoélectroniques qui transforment directement La lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque » Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés Intermédiaires entre les conducteurs et les isolants. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque. Les cellules photovoltaïques sont de fines tranches planes fabriquées à partir de matériaux appelés semi-conducteurs qui sont capables de conduire l'électricité ou de la transporter. Plus de 90 % des cellules solaire fabriquées à l'heure actuelle sont en silicium, un semi-conducteur, ou métalloïde, présentant à la fois les propriétés d'un métal et d'un isolant.

Dans un semi-conducteur exposé à la lumière, un photon d'énergie suffisante arrache un électron, créant au passage un « trou ». Normalement, l'électron trouve rapidement un trou pour se replacer, et l'énergie apportée par le photon est ainsi dissipée. Le principe d'une cellule photovoltaïque est de forcer les électrons et les trous à se diriger chacun vers une face opposée du matériau au lieu de se recombiner simplement en son sein : ainsi, il apparaîtra une différence de potentiel et donc une tension entre les deux faces, comme une pile.[10] Pour cela, on s'arrange pour crée un champ électrique permanent au moyen d'une jonction PN, entre deux couches dopées respectivement P et N [9]. Comparable à une diode utilisée classiquement en électronique, une cellule PV peut être réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) [11]. Entre les deux zones se développent une jonction PN avec une batterie de potentiel. La zone N est couverte par une grille métallique qui sert de cathode (contact avant) et surtout de collecteurs d'électrons, tandis qu'une plaque métallique (contact arrière) recouvre l'autre face de cristal et joue le rôle d'anode [10].

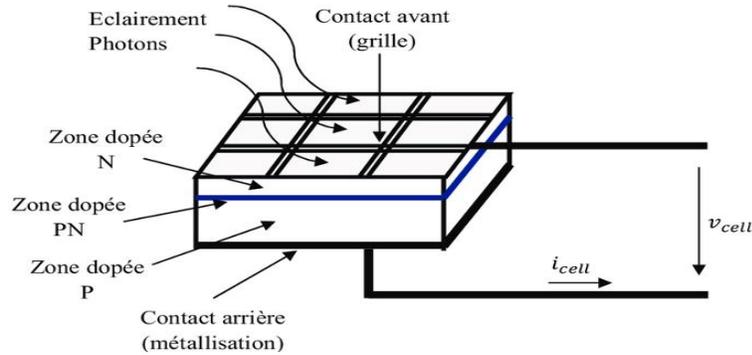


Figure I. 7: Schéma d'une cellule photovoltaïque. [5]

La cellule photovoltaïque comprend les éléments suivants :

- **Substrat semi-conducteur** : C'est la base de la cellule, généralement en silicium. Il est dopé avec des impuretés pour créer une jonction p-n.
- **Couche p-n** : Cette couche est formée par la jonction p-n, où une partie du matériau est dopée avec des impuretés de type p (trous) et une autre partie avec des impuretés de type n (électrons).
- **Couche antireflet** : Il s'agit d'une couche mince transparente qui réduit la réflexion de la lumière incidente, augmentant ainsi l'absorption de la lumière par la cellule.
- **Contacts métalliques** : Des contacts métalliques sont placés sur la face supérieure et inférieure de la cellule pour collecter le courant électrique généré. Le contact supérieur est généralement réalisé sous forme de grille pour permettre le passage de la lumière.

I.8 Différentes technologies des cellules solaires :

Plusieurs techniques permettant la conversion directe de la lumière solaire en électricité, et cela à l'aide de matériaux semi-conducteurs tel que le silicium (Si), le germanium (Ge), le sélénium (Se) ou les composés semi-conducteurs tel que l'arséniure de gallium (GaAs), ou le tellure de cadmium (CdTe). Les cellules solaires de type GaAs sont très coûteuses dans leur fabrication et leur utilisation est en général limitée aux applications spatiales, mais le matériau le plus utilisé reste le silicium.

I.8.1 Silicium monocristallin :

Elles sont considérées comme la première génération de photopile, elles ont un taux de rendement excellent (12 – 16% et jusqu'à 24 % en laboratoire) mais leur méthode de production est laborieuse et

délicate, et donc, très chère ; il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir du cristal pur. Il présente l'inconvénient d'avoir un mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux...) [12].

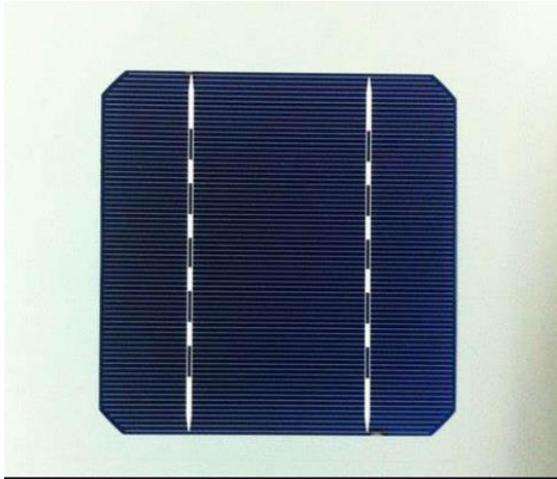


Figure I. 8 : Cellule monocristalline [5].

I.8.2 Silicium poly cristallin :

Elles ont un coût de production moins élevé et un rendement qui varie entre 11 – 13% (autour de 18 % en laboratoire). Comme le monocristallin il présente l'inconvénient d'avoir un mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux...) [12].



Figure I. 9: Cellule photovoltaïque en silicium poly cristallin [5].

I.8.3 Silicium amorphe :

Leur coût de production bien plus bas, mais malheureusement aussi, ont un rendement plus bas qui varie entre 8 –10 % (autour de 13 % en laboratoire pour une cellule non dégradée). Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium de 0.3 à 1.0 nanomètre seulement (500 nanomètres pour les deux autres types). On peut donc appliquer de très fines couches de silicium amorphe sur des vitres, du

métal, voir du plastique souple par un procédé de vaporisation sous vide. C'est le silicium amorphe que l'on trouve le plus souvent dans les petits produits de consommation comme les calculatrices, les montres, ... Les cellules amorphes ont besoin d'environ deux fois plus de surface (comparé aux cellules cristallin) pour produire la même quantité d'électricité, et semblent se dégrader plus rapidement, mais ils ont l'avantage de mieux réagir à la lumière diffuse et à la lumière fluorescente et d'être plus performants à des températures élevées [12].

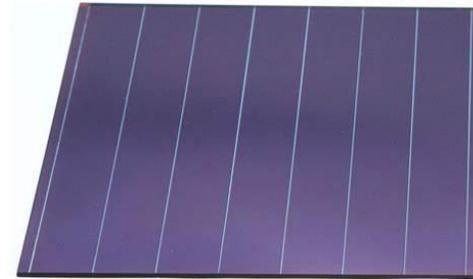


Figure I. 10: Cellule photovoltaïque en silicium amorphe [5]

I.8.4. Cellule Tandem :

Empilement monolithique de deux cellules simples. En combinant deux cellules (couche mince de silicium amorphe sur silicium cristallin par exemple) absorbantes dans des domaines spectraux se chevauchant, on améliore le rendement théorique par rapport à des cellules simples distinctes, qu'elles soient amorphes, cristallines ou microcristallines [12].

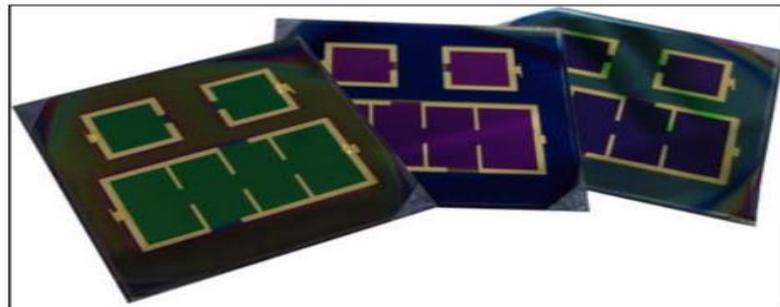


Figure I. 11: Cellule photovoltaïque Tandem [12].

I.8.5. Cellule multi-jonction :

Des cellules ayant une grande efficacité ont été développées pour des applications spatiales. Les cellules multi-jonctions sont constituées de plusieurs couches minces. Chaque type de semi-conducteur est caractérisé par une longueur d'onde maximal de laquelle il est incapable de convertir le photon en énergie

électrique. D'un autre côté, en deçà de cette longueur d'onde, le surplus d'énergie véhiculé par le photon est perdu. D'où l'intérêt de choisir des matériaux avec des longueurs aussi proches les unes des autres que possible (en multipliant leur nombre d'autant) de manière à ce qu'une majorité du spectre solaire soit absorbé, ce qui génère un maximum d'électricité à partir du flux solaire [12].



Figure I. 12: Cellule photovoltaïque multi jonction [5]

I.8.6. Cellule TOPCON :

Les cellules solaires TOPCon sont une innovation majeure dans le domaine du photovoltaïque, qui permettent d'obtenir une meilleure efficacité, une moindre détérioration et une meilleure adaptation à différentes situations climatiques. Face aux progrès constants de l'industrie solaire, les cellules solaires TOPCon ont un rôle essentiel à jouer dans la recherche continue de solutions énergétiques plus performantes et plus respectueuses de l'environnement.



Figure I. 13: Cellule TOPCON [5].

I.8.7. Cellule solaire pérovskite :

Une cellule solaire pérovskite est un type de cellule solaire qui utilise un matériau à structure pérovskite, souvent un composé hybride organique-inorganique à base d'halogénure de plomb ou d'étain, comme couche

active pour absorber la lumière. Les cellules solaires pérovskites ont un rendement élevé, un faible coût de fabrication et une bonne adaptabilité à différentes conditions climatiques. Elles sont considérées comme une technologie solaire prometteuse, mais elles doivent encore résoudre des problèmes de stabilité et de durabilité

I.9 Facteurs limitatifs du rendement :

I.9.1 Influence de l'éclairement :

L'énergie électrique produite par une cellule dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface. La figure I.15 représente la caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement, à une température et une vitesse de circulation de l'air ambiant constantes : Le courant est directement proportionnel au rayonnement, contrairement à la tension qui ne varie que très peu en fonction de l'éclairement.

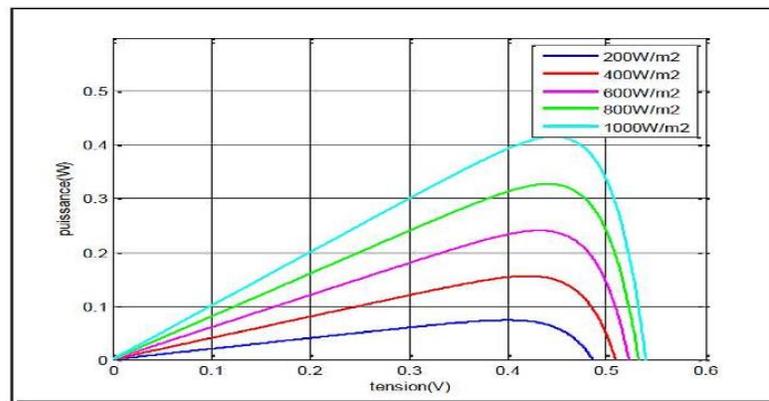


Figure I. 14: Caractéristique puissance-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement.

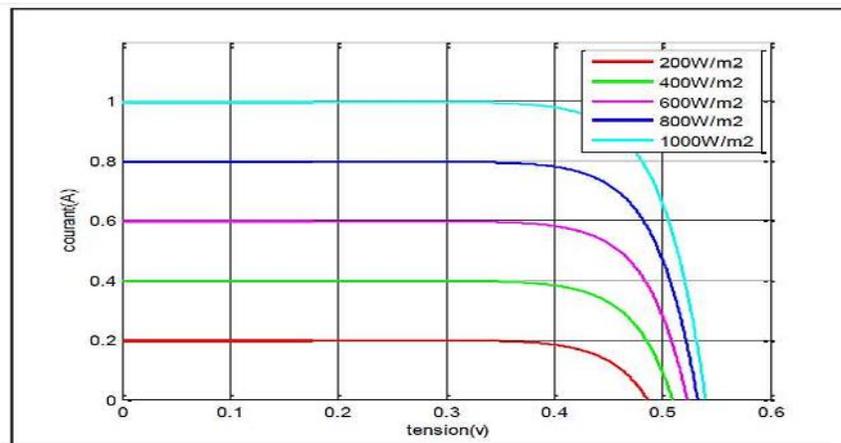


Figure I. 15: Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement.

I.9.2 Influence de la température :

Quand la température diminue, la tension à vide augmente, mais le courant de court-circuit diminue dans des proportions moindres. La diminution du courant de saturation est la principale cause de la chute de courant à basse température. Aussi, on considère en première approximation que le fonctionnement optimal du générateur PV correspond sensiblement à un fonctionnement à tension optimale constante. [13]

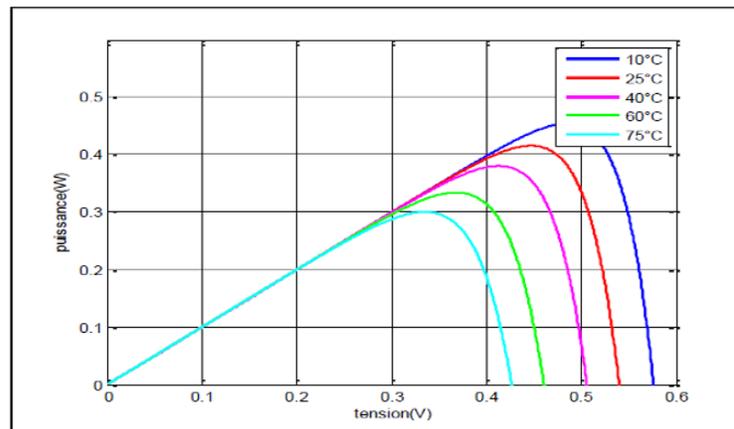


Figure I. 16: Caractéristique puissance-tension d'une cellule en fonction de la température.

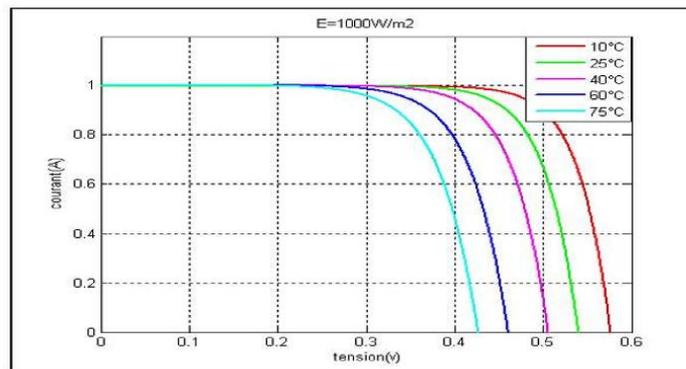


Figure I. 17: Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de la température.

I.10 Panneaux Photovoltaïques :

Un module solaire, aussi nommé panneau photovoltaïque, est un ensemble de plusieurs cellules photovoltaïques reliées entre elles. C'est l'un des principaux types d'installation solaire employé pour produire de l'électricité à partir de la lumière du soleil. Les panneaux photovoltaïques sont conçus pour être posés sur des structures, comme des toitures, des supports au sol ou des structures de suivi solaire, afin de

capter la lumière solaire et de créer de l'électricité. Quand la lumière du soleil touche les cellules photovoltaïques, elle provoque un courant électrique continu, qui peut être utilisé directement ou transformé en courant alternatif grâce à des onduleurs pour alimenter des appareils et des systèmes électriques.

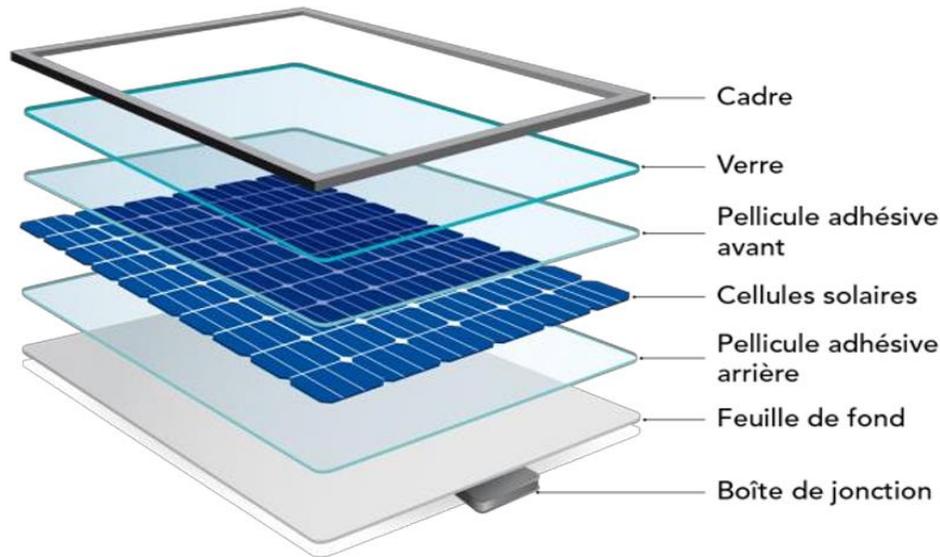


Figure I. 18: Les composantes de panneau photovoltaïque. [5]

Comme vu dans la Figure I.18 un panneau photovoltaïque est généralement constitué des éléments suivants:

- Cellules photovoltaïques
- Encapsulation
- Couche antireflet
- Encadrement
- Câbles de connexion

I.11 Les systèmes photovoltaïques :

I.11.1 définition :

Un système photovoltaïque se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adapte l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs. Cet ensemble, appelé aussi "Balance of System" ou BOS, comprend tous les équipements entre le champ de modules et la charge finale, à savoir

la structure rigide (fixe ou mobile) pour poser les modules, les câblages, la batterie en cas de stockage et sont régulateur de charge, et l'onduleur lorsque les appareils fonctionnent en courant alternatif [14].

I.11.2 Classification d'un système solaire photovoltaïque :

I.11.2.1 Système autonome :

Le rôle des systèmes autonomes est d'alimenter un ou plusieurs consommateurs situés dans une zone isolée du réseau électrique. [15]

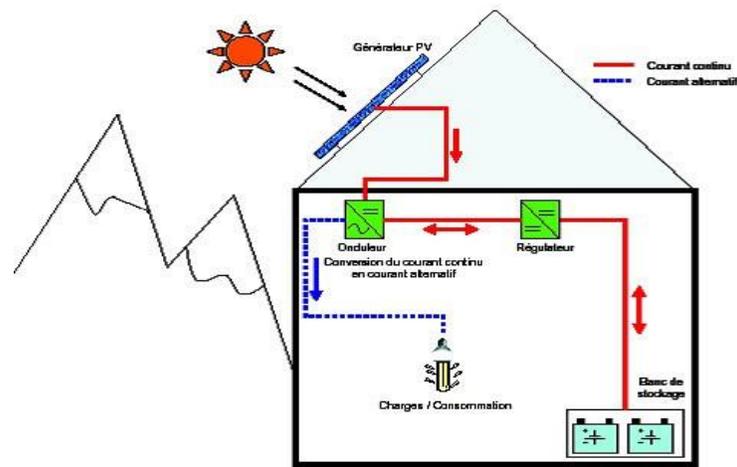


Figure I. 19: Exemple de la structure d'un système PV autonome.

I.11.2.2 Système PV raccorder aux réseaux :

Une installation PV peut être connectée en parallèle avec le réseau d'électricité. Les panneaux solaires sont connectés en série pour former des « strings », eux même reliés à un onduleur. La tâche de l'onduleur est de transformer le courant continu sortant des panneaux en courant alternatif. Chaque onduleur est choisi en fonction de la puissance des panneaux et peut accueillir un ou plusieurs strings.

Si la consommation locale est supérieure à la production de l'installation PV, l'appoint est fourni par le réseau. Dans le cas contraire, l'énergie est fournie au réseau public et sert à alimenter les consommateurs [16].

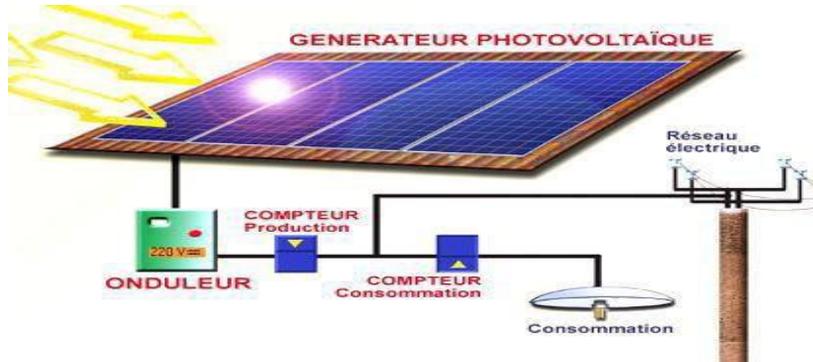


Figure I. 20: Système PV raccordée au réseau.

I.11.2.3 Système hybride :

Les systèmes hybrides reçoivent une partie de leur énergie d'une ou plusieurs sources supplémentaires, qui sont également indépendants des réseaux de distribution d'électricité.

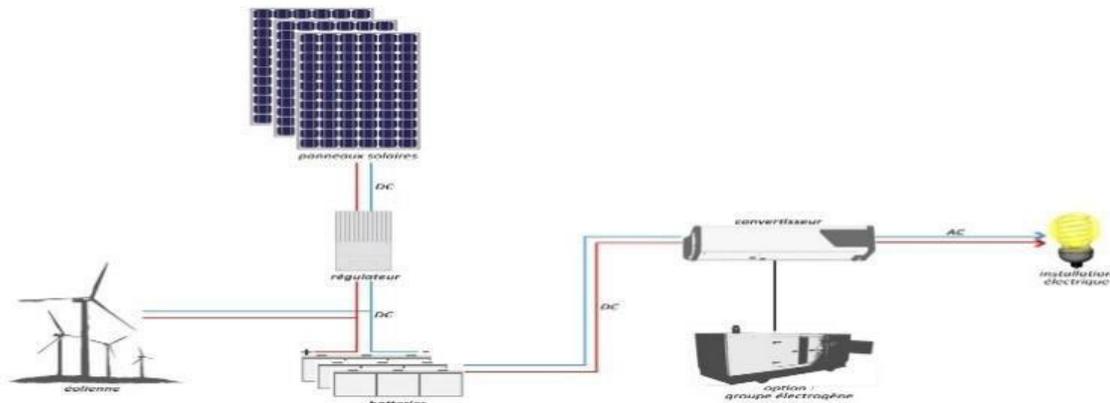


Figure I. 22 : Système hybride.

En pratique le générateur photovoltaïque est combiné à une éolienne ou à un groupe électrogène combustible, ou aux deux à la fois avec des accumulateurs de stockage de l'énergie. Un tel système s'avère un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée [16].

I.13 Conclusion :

Pour conclure, les systèmes photovoltaïques représentent une méthode durable et écologique de production d'électricité. Ils trouvent leur utilité dans diverses applications et contribuent à diminuer notre dépendance envers les énergies fossiles. Grâce aux avancées technologiques et aux politiques

favorables aux énergies renouvelables, l'usage des systèmes photovoltaïques s'étend progressivement à travers le monde.

Pour obtenir une énergie électrique alternative compatible a le réseau en utilise un onduleur qui permet de transfère l'énergie solaire (DC) a une énergie alternative, dans le chapitre suivant on va étudie les différents types des onduleurs qui permet d'améliorer les performances de ce transfère d'énergie.

CHAPITRE II :
ÉTUDE DES ONDULEURS
MULTINIVEAUX

II.1 Introduction :

Ce chapitre examine les avancées dans la qualité des onduleurs de tension multiniveau (MN), mettant en lumière leur fonctionnement, les trois topologies principales et des topologies plus moderne, et les innovations réduisant les pertes de commutation. Les onduleurs MN, utilisés dans diverses applications industrielles, offrent une meilleure qualité de tension et une gestion optimisée des charges, malgré des coûts et une complexité accrue. Les recherches visent à améliorer leur rendement énergétique et à développer des onduleurs plus compacts et économiques.

II.2 Définition et généralité sur les onduleurs :

II.2.1 Les convertisseur statique :

L'électronique de puissance, ou plus correctement « électronique de conversion d'énergie », à moins de 50 ans. Elle a connu un tel essor qu'aujourd'hui près de 15 % de l'énergie électrique produite est convertie sous une forme ou une autre. Au cours de ces années, la taille, le poids et le coût des convertisseurs n'ont fait que diminuer, en grande partie grâce aux progrès faits dans le domaine des interrupteurs électroniques [18].

Les 4 convertisseurs sont des dispositifs ayant pour rôle la conversion du courant et de la tension électrique d'un certain genre en un courant d'un autre genre. Il existe plusieurs types des convertisseurs, représentés comme suit :

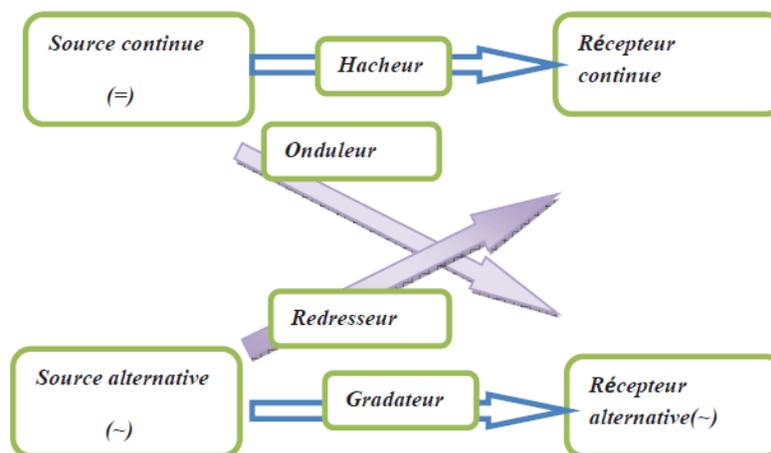


Figure II. 1 : Les différents convertisseurs

II.2.2 Convertisseur DC-AC (onduleur) :

Un onduleur est un dispositif conçu pour transformer le courant continu produit par un générateur photovoltaïque en courant alternatif. Pour ce faire, il emploie des transistors de puissance ou des thyristors. Dans sa forme la plus élémentaire, l'onde de sortie de l'onduleur est carrée, ce qui convient à certains types de charges mais entraîne d'importantes pertes en l'absence de charge, particulièrement à basse puissance. La majorité des onduleurs sont construits sous forme de ponts et intègrent généralement des commutateurs électroniques.

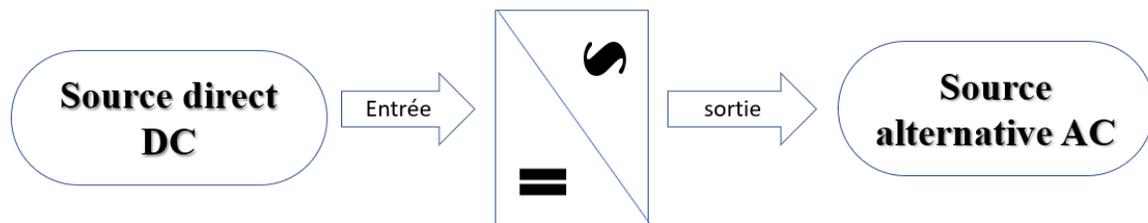


Figure II. 2 : Schéma de principe de la conversion continu-Alternative (DC-AC).

II.2.3 Types d'onduleurs :

II.2.3.1 Onduleur autonome :

Un onduleur est dit autonome s'il utilise l'énergie d'un circuit auxiliaire propre à lui pour la commutation des thyristors ou l'autre semi-conducteurs dans ce cas nous commandons la fréquence la forme d'onde de la tension de sortie. On distingue deux types d'onduleurs autonomes [22], [23] :

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

II.2.3.2 Onduleur non autonome :

C'est le nom donné au montage redresseur tous les thyristors (pont de Graëtz) qui, en commutation naturelle assistée par le réseau auquel il est raccordé, permet un fonctionnement en onduleur (par exemple par récupération de l'énergie lors des périodes de freinage dans les entraînements à moteurs électriques). À la base du développement des entraînements statiques à vitesse variable pour moteurs à courant continu et alternatif, cyclo-convertisseurs, onduleurs de courant pour machines synchrones et asynchrones, jusqu'à

des puissances de plusieurs MW, ce type de montage est progressivement supplanté, au profit de convertisseurs à IGBT ou GTO [23].

II.2.4 Applications des onduleurs :

Parmi les nombreux domaines d'emploi des onduleurs autonomes, on trouve principalement les onduleurs à fréquence fixe à commutation forcée : Alimentés le plus souvent par une batterie d'accumulateurs, ils jouent d'ordinaire le rôle d'alimentation de sécurité [24].

Les applications des onduleurs sont utilisées en électrotechnique pour :

- Soit fournir des tensions ou courants alternatifs de fréquence et amplitudes variables.
- Soit fournir une ou des tensions alternatives de fréquence et d'amplitude fixes. Nous citons quelques domaines d'application :
- Production des tensions sinusoïdales de fréquences moyennes (de quelques kHz à quelques 10Khz) : soudage, ...
- Alimentations alternatives de secours fonctionnant sur batteries d'accumulateurs, chauffage à induction, ...
- Alimentation des moteurs à courant alternatif à fréquence variable [25].

II.2.5 Onduleur de tension :

Un onduleur de tension est un onduleur qui est alimenté par une source de tension continue (source d'impédance interne négligeable), la tension n'est pas affectée par les variations du courant qui la traverse, la source continue impose la tension à l'entrée de l'onduleur et donc à sa sortie. Le courant à la sortie et donc le courant à l'entrée dépende de la charge placée du côté alternatif [19].

II.2.5 Principe de fonctionnement d'un onduleur de tension :

Dans le dispositif de l'onduleur, des composants semi-conducteurs tels que les IGBT et les MOSFET sont utilisés pour leur capacité à s'auto-commuter. À travers une série de commutations soigneusement orchestrées, souvent réalisées via une modulation de largeur d'impulsion, la source est modulée pour générer un courant alternatif de la fréquence requise.

II.2.6 Les topologies d'un onduleur a deux niveaux :

Il y a deux principales topologies d'un onduleur a deux niveaux :

- Onduleur monophasé en demi pont H
- Onduleur monophasé en pont H

II.2.6.1 Onduleur monophasé en demi pont H :

Le dispositif est principalement composé de deux commutateurs de puissance, désignés par k_1 et k_2 , qui sont actionnés de manière complémentaire. Chaque commutateur conduit pendant une demi-période de 180° , ce qui correspond à la fréquence nécessaire pour le signal de sortie. Quand le commutateur T_1 est activé, la tension à la charge est de $+E/2$, et elle passe à $-E/2$ lorsque le second commutateur, $T'1$, est fermé. Les diodes D_1 et $D'1$, appelées diodes de roue libre, permettent le passage d'un courant inverse si celui-ci est déphasé par rapport à la tension de la charge. La charge connectée à l'onduleur est souvent inductive, entraînant une forme de courant $i(t)$ qui diffère de celle de la tension $u(t)$.

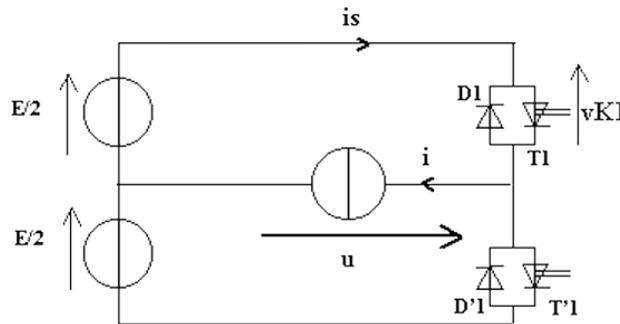


Figure II. 3: Schéma de principe d'un onduleur monophasé en demi-pont.

II.2.6.2 Onduleur monophasé en pont H :

L'onduleur monophasé en configuration de pont H est principalement un onduleur qui utilise une source de tension. Pour son fonctionnement, il requiert l'utilisation de quatre éléments de commutation, illustrés dans la figure (II.4). Son principe de fonctionnement est le suivant :

Tableau II.1 Les trios niveaux de tension possibles.

S1	S2	S3	S4	Vs
1	0	1	0	0
0	1	0	1	0
1	0	0	1	Vdc
0	1	1	0	-Vdc

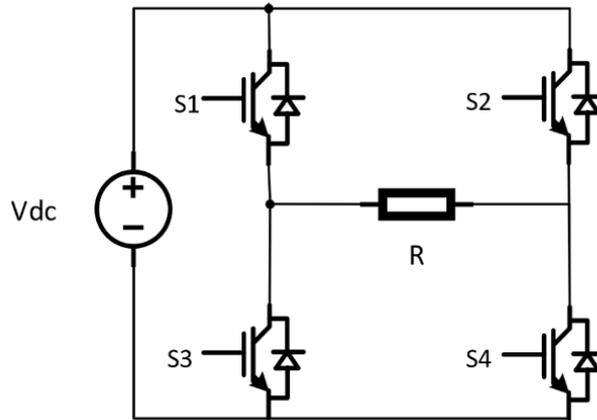


Figure II. 4: Schéma de l'onduleur monophasé en pont H

II.2.7 Onduleur triphasé :

La principale fonction de cet onduleur est de convertir une entrée en courant continu (DC) en une sortie en courant alternatif (AC) triphasé. Ce type d'onduleur est couramment employé dans des applications nécessitant une puissance élevée et une fréquence ajustable, comme dans les cas de transmission d'énergie ou de contrôle de vitesse. Un onduleur triphasé standard se compose de trois branches d'onduleur monophasé, chacune pouvant être reliée à une des trois bornes de la charge, tel qu'illustré dans la figure (II.5). La gestion de la commutation pour chaque pont est conçue pour produire trois phases qui sont décalées de 120° les unes par rapport aux autres.

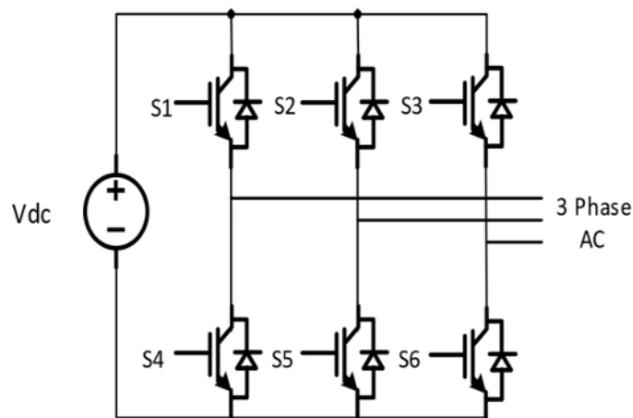


Figure II. 5: Schéma de l'onduleur triphasé.

II.3 les onduleurs multiniveaux :

II.3.1 Définition :

Un convertisseur statique est dit « multi-niveaux » lorsqu'il génère une tension découpée de sortie composée d'au moins trois niveaux. 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 [27].

Les convertisseurs multiniveaux sont de plus en plus utilisés grâce à leurs divers avantages [26], Ils sont capables de générer plus de deux niveaux de tensions de sortie, permettant de délivrer une tension de meilleure qualité que les convertisseurs à deux niveaux et de réduire ainsi le dimensionnement du filtre de sortie.

II.3.2 principes de fonctionnement d'un onduleur multiniveaux :

La figure II.6 aide à comprendre comment travaillent les convertisseurs multiniveaux. Un convertisseur à deux niveaux est représenté à la figure (a), dans laquelle les commutateurs semi-conducteurs ont été remplacés par un interrupteur idéal [28].

La tension de sortie ne peut prendre que deux valeurs : 0 ou V_{dc} . Sur la figure (b), la tension de sortie de trois niveaux peut prendre trois valeurs : 0, V_{dc1} ou $+V_{dc1}+V_{dc2}$. Dans la figure (c) le cas général de (m) niveaux est présenté.

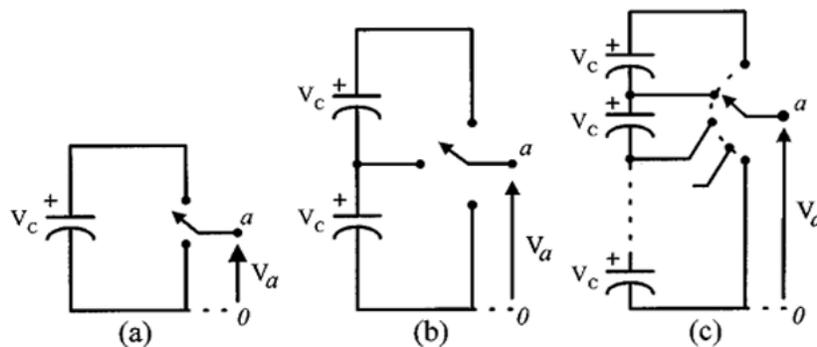


Figure II. 6: Schéma d'un bras d'onduleur.

II.3.3 Différentes topologies des onduleurs multi-niveaux :

On peut résumer les Différentes topologies des onduleurs dans la Figure II.7.

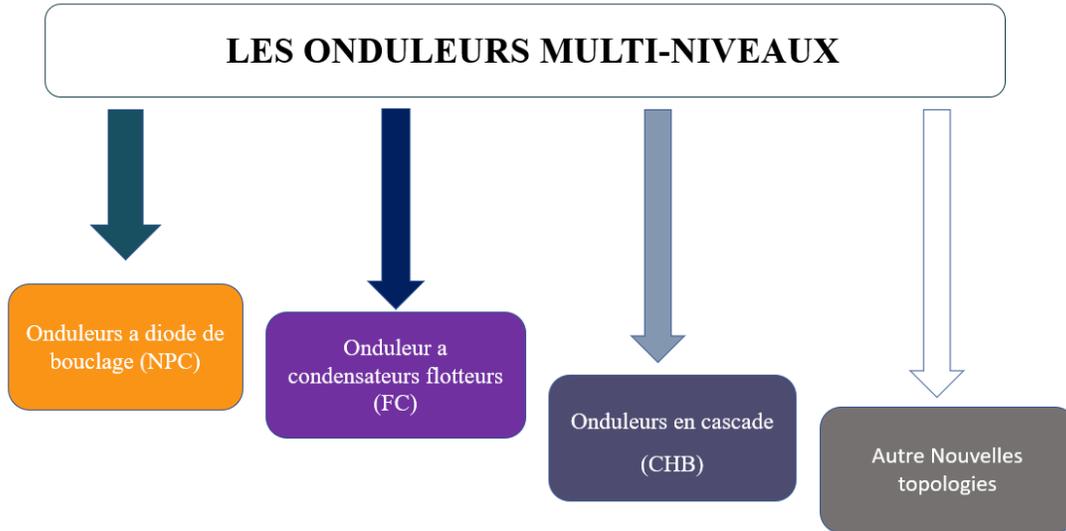


Figure II.7: Différentes topologies des onduleurs multiniveaux.

II.3.4 le développement des topologies des onduleurs multiniveaux :

On peut l'explique l'histoire des topologies des onduleurs dans la Figure II.8.

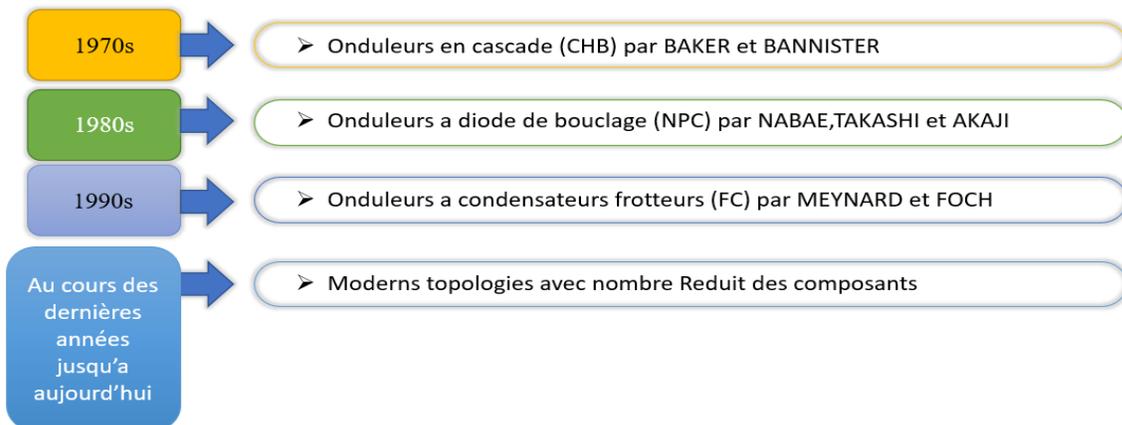


Figure II. 7: L'histoire des onduleurs multiniveaux.

II.3.5 Topologies conventionnels :

Les topologies conventionnelles principal sont :

- I. Onduleur a diode de bouclage (NPC)
- II. Onduleur a condensateurs flotteurs (FC)
- III. Onduleurs en cascade (CHB)

II.3.5.1 Onduleur a diode de bouclage (NPC) :

La première topologie la plus pratique d'onduleur de tension multi-niveau est le NPC. Elle a été proposée, la première fois en 1980, par Nabae et Al. L'objectif était de réduire l'amplitude des harmoniques injectés par l'onduleur dans la charge pour des applications de type alimentation de moteur [29].

Tableau II.2 : Nombre des composants de la structure NPC.

Topologie	n	S	k	D	Db	C
NPC	n	(n-1)	2(n-1)	2(n-1)	(n-1). (n-2)	0

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.

Db : le nombre des diodes de bouclage.

C : le nombre de condensateurs d'équilibrage.

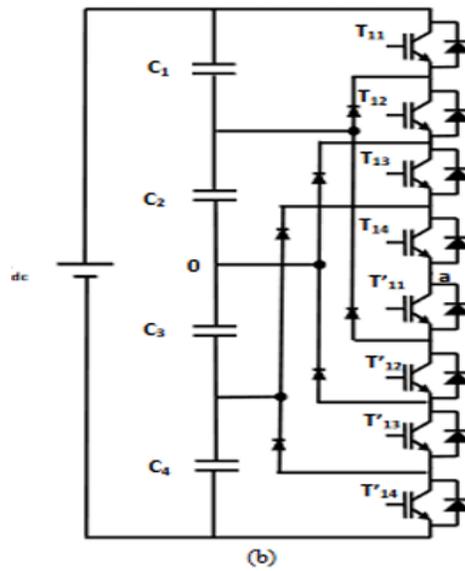


Figure II. 8: Onduleur NPC de cinq niveaux

• **Principe de fonctionnement :**

Le tableau II.2 explique le fonctionnement d'un onduleur de cinq niveaux avec la topologie NPC :

Tableau II.3 : Les cinq niveaux possibles pour un onduleur NPC

T11	T12	T13	T14	T'11	T'12	T'13	T'14	VS
1	1	1	1	0	0	0	0	E/2
0	1	1	1	1	0	0	0	E/4
0	0	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	1	1	1	1	0	-E/4
0	0	0	0	1	1	1	1	-E/2

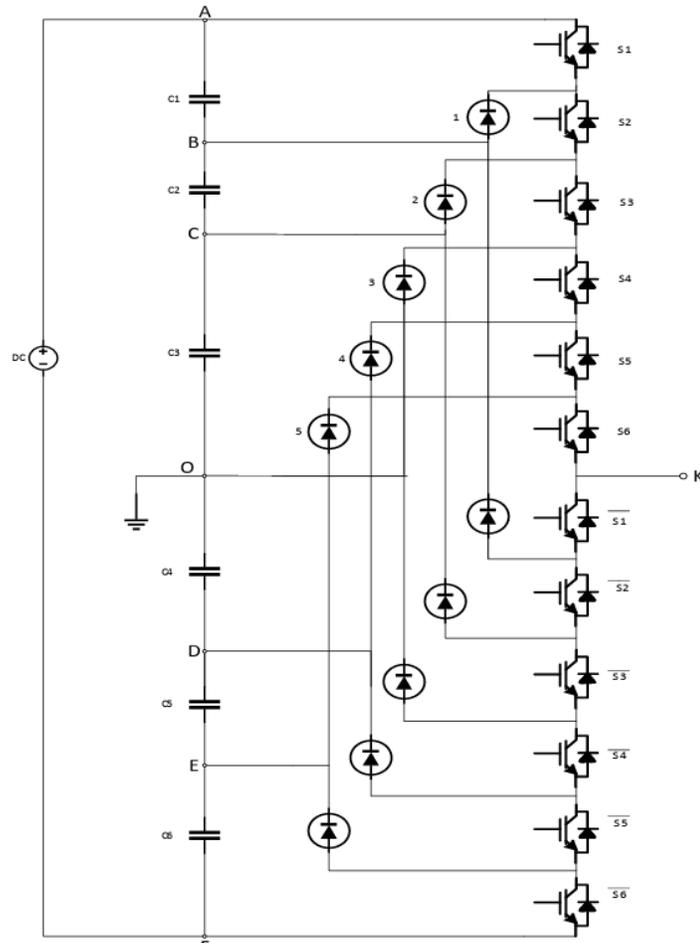


Figure II. 9: Onduleur NPC a sept niveaux

• Principe de fonctionnement :

Le tableau II.3 exprime le fonctionnement d'un onduleur a sept niveaux avec la topologie NPC :

Tableau II.4 : Les sept niveaux possibles pour un onduleur NPC

S1	S2	S3	S4	S5	S6	V_s
1	1	1	1	1	1	$V_{dc}/2$
0	1	1	1	1	1	$V_{dc}/3$
0	0	1	1	1	1	$V_{dc}/6$
0	0	0	1	1	1	0
0	0	0	0	0	1	$-V_{dc}/6$
0	0	0	0	0	1	$-V_{dc}/3$
0	0	0	0	0	0	$-V_{dc}/2$

II.3.5.2 Onduleur a condensateurs flotteurs (FC) :

La topologie de l'onduleur multiniveau à cellules imbriquées ou à condensateurs flottants (flying capacitor multilevel inverter) a été proposée par Meynard et Foch en 1992. Elle est constituée de plusieurs cellules (condensateurs et paires d'interrupteurs) imbriquées les unes dans les autres, la valeur de la tension maximale de sortie générée par un bras d'onduleur FC ne dépasse pas la demie tension d'entrée V_{dc} . Un onduleur avec n niveaux est formé par $(n-1)$ cellules. Ce type d'onduleur est développé pour résoudre d'une part le problème de l'équilibrage des tensions existant dans la topologie NPC, et d'autre part pour réduire le nombre excessif de diodes [13].

Tableau II.5 : Nombre des composants de la structure FC

Topologie	n	S	k	D	Db	C
Condensateur flotteur	n	$(n-1)$	$2(n-1)$	$2(n-1)$	0	$(n-1) \cdot (n-2)/2$

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.

Db : le nombre des diodes de bouclage.

C : le nombre de condensateurs d'équilibrage.

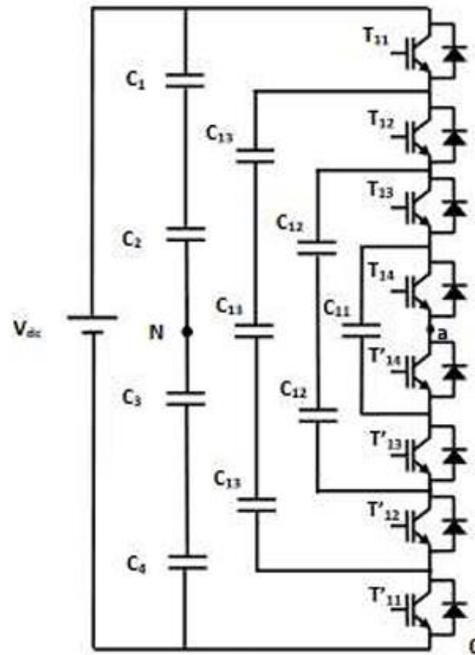


Figure II. 10: Onduleur FC de cinq niveaux

- **Principe de fonctionnement :**

Le principe de fonctionnement de cette topologie est quasiment identique à celui de la topologie NPC. Dans le Tableau II.3.

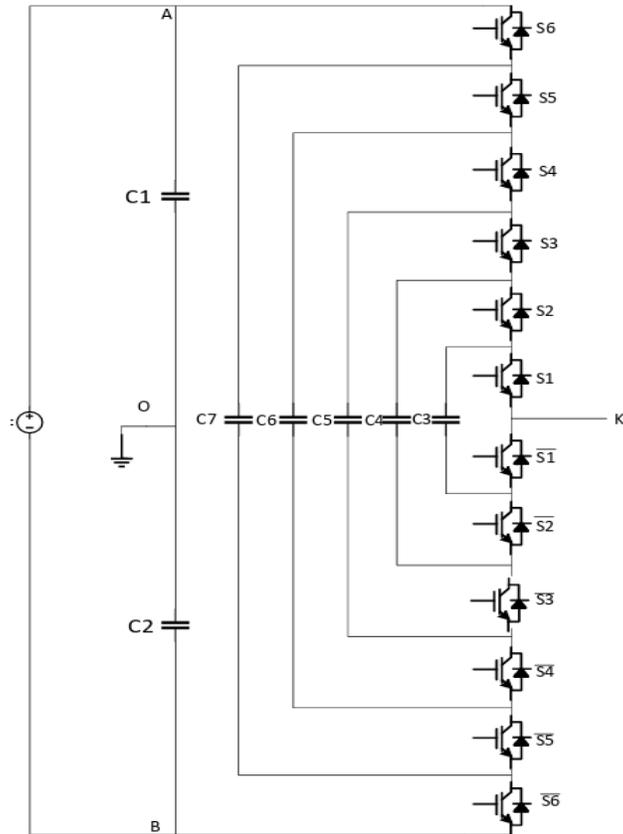


Figure II. 11: Onduleur FC a sept niveaux

• **Principe de fonctionnement :**

Le principe de fonctionnement de cette topologie est quasiment identique à celui de la topologie NPC. Dans le tableau II.4.

II.3.5.3 Onduleurs en cascade (CHB) :

Le premier modèle d'onduleur était l'onduleur en pont H (en anglais H-bridge), apparu en 1975 un progrès des onduleurs multiniveaux a été dû au modèle en pont H cascadié en sérié. La première application d'onduleur pont H était pour la stabilisation des plasmas en 1988. Les sorties des onduleurs en pont sont connectées en série de telle sorte que l'onde de la tension synthétisée soit la somme des tensions de sortie. L'avantage majeur de cette approche est que le nombre de paliers sur le motif de la tension de sortie peut être augmenté sans aucun ajout de nouveaux composants. L'utilisation de cellules de conversion de puissance en série permet d'accroître le nombre de niveau de tension et de puissance du convertisseur. Mais l'inconvénient Majeur de cette topologie est le grand nombre de tensions continues isolées exigées pour chaque pont [32].

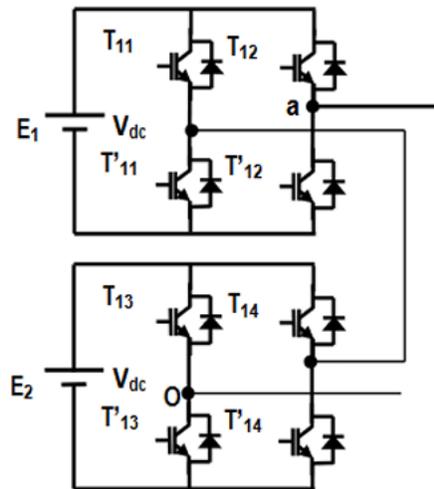


Figure II. 12: Onduleur CHB de cinq niveaux

• **Principe de fonctionnement :**

Le tableau II.6 exprime le fonctionnement d'un onduleur a cinq niveaux avec la topologie CHB :

Tableau II.6 : Les cinq niveaux possibles pour un onduleur CHB

T11	T'11	T13	T'13	VS
0	1	0	1	-2E
0	1	0	0	-E
0	0	0	0	0
1	0	0	0	E
1	0	1	0	2E

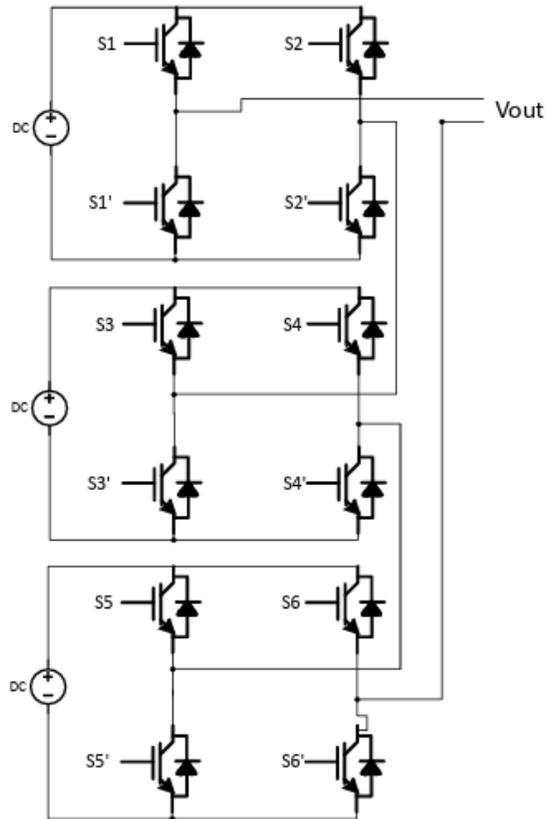


Figure II. 13: Onduleur CHB a sept niveaux

• **Principe de fonctionnement :**

Le tableau II.7 exprime le fonctionnement d'un onduleur a sept niveaux avec la topologie CHB :

Tableau II.7 : Les sept niveaux possibles pour un onduleur CHB

S1	S2	S3	S4	S5	S6	VS
1	1	1	1	1	1	0
1	0	1	1	1	1	V
1	0	1	0	1	1	2V
1	0	1	0	1	0	3V
0	1	0	0	0	0	-V
0	1	0	1	0	0	-2V
0	1	0	1	0	1	-3V

II.3.6 Comparaison entre les trois topologies :

Il est important de souligner que la quantité de composants requis pour la construction d'un onduleur MN est un facteur déterminant qui influence significativement l'efficacité opérationnelle du convertisseur, notamment en termes de volume, coût et pertes énergétiques [33], Par conséquent, une synthèse détaillée du nombre de composants divers nécessaires à l'élaboration de chacune des trois topologies fondamentales des onduleurs multiniveaux est présentée dans le tableau II.8.

Tableau II.8 : Comparaison des trois topologies de base [33]

Configuration	Les trois topologies de base des onduleurs multiniveaux		
	NPC	FC	CHB
Dispositifs principaux de commutation	$2(m-1)$	$2(m-1)$	$2(m-1)$
Diode antiparallèle	$2(m-1)$	$2(m-1)$	$2(m-1)$
Diode de bouclage	$2(m-2)$	0	0
Condensateur	$(m-1)$	$(m-1)$	0
Condensateur d'équilibrage	0	$(m-1)(m-2)/2$	0
Total	$m^2 + 2m - 3$	$(m^2 + 8m - 8)/2$	$(9/2)(m-1)$

II.3.7 Les avantages et les inconvénients des topologies conventionnelles :

Les onduleurs multiniveaux conventionnels, bien qu'ils représentent une avancée significative dans la technologie de conversion de puissance, présentent un ensemble de caractéristiques à double tranchant. D'une part, ils offrent une série d'avantages qui les rendent particulièrement attrayants pour des applications exigeant une haute qualité de l'énergie électrique. Ces avantages incluent une réduction notable des harmoniques et des interférences électromagnétiques, une meilleure qualité de la forme d'onde de sortie, ainsi qu'une diminution des contraintes thermiques sur les composants électroniques, ce qui se traduit par une durée de vie prolongée des équipements.

D'autre part, ces systèmes ne sont pas exempts de défis. Leur complexité intrinsèque, due à l'utilisation d'un nombre plus élevé de composants semi-conducteurs, se répercute sur le coût global du système et sa maintenance. De plus, la gestion de multiples niveaux de tension nécessite des stratégies de contrôle

avancées et des dispositifs de commande sophistiqués, ce qui peut représenter un obstacle non négligeable pour leur intégration dans des systèmes existants.

En somme, les onduleurs multiniveaux conventionnels se distinguent par leur capacité à améliorer la performance des systèmes électriques tout en imposant certaines contraintes opérationnelles et financières. Leur adoption doit donc être soigneusement évaluée en fonction des spécificités de chaque application, en pesant méticuleusement les bénéfices attendus face aux investissements et aux compétences techniques requises pour leur exploitation optimale.

▪ **Comparaison entre les avantages et les inconvénients des topologies conventionnelles :**

En peut exprimer la différence entre les trois topologies dans le tableau II.8 suivant :

Tableau II.9 : Comparaison entre les trois topologies conventionnelles [34].

Topologies	Les avantages	Les inconvénients
NPC	<ul style="list-style-type: none"> -Alimentation CC simple indépendante. -Structure simple et facile à mettre en œuvre. -La méthode de contrôle est très simple. -Haute efficacité. -Dépend uniquement d'une alimentation CC simple. 	<ul style="list-style-type: none"> -Pour des niveaux élevés, un plus grand nombre de diodes sont nécessaires. -Besoin de diodes à haute tension pour bloquer les tensions inverses.
FC	<ul style="list-style-type: none"> -structure simple. -Le système prend en charge la modularité. -Les problèmes de creux de tension profonds et de coupures de courte durée peuvent être surmontés grâce au grand nombre de condensateurs dans l'onduleur. 	<ul style="list-style-type: none"> -Un grand nombre de condensateurs sont encombrants et plus coûteux que les diodes de bouclage dans la topologie NPC. -Il faut un contrôle complexe pour maintenir l'équilibre des tensions des condensateurs -L'utilisation des commutations et l'efficacité sont faibles pour la transmission réelle de puissance
CHB	<ul style="list-style-type: none"> -Comparé aux topologies NPC et FC, il synthétise un nombre réduit de dispositifs de commutation. -Pas besoin des diodes de puissance ou des condensateurs encombrants. -A une large gamme d'applications de génération d'énergie renouvelable, notamment dans les applications d'énergie solaire photovoltaïque. 	<ul style="list-style-type: none"> -Un grand nombre de sources d'alimentation CC en cas d'extension du système. -Des commutateurs supplémentaires et des alimentations CC sont nécessaires pour augmenter les niveaux de tension de sortie.

II.3.8 Topologies modernes :

L'étude des trois topologies de base des convertisseurs multiniveaux conventionnels révèle qu'ils sont capables de convertir des puissances élevées tout en garantissant une qualité d'énergie satisfaisante. Cependant, ils présentent un inconvénient majeur : ils nécessitent un nombre important de composants, qui augmente avec le nombre de niveaux. Pour pallier cette limitation, au cours des deux dernières décennies, de nouvelles topologies d'onduleurs multiniveaux ont été développées en mettant l'accent sur la réduction du nombre de composants (RNC). Cette approche vise à améliorer l'efficacité énergétique, le THD des signaux de sortie, la stratégie de commande, ainsi que le volume et le coût des onduleurs multiniveaux. L'objectif est également d'élargir leur champ d'application pour les rendre plus attractifs et compétitifs que les topologies classiques à deux niveaux [33]. La Figure II.15 explique les types des onduleur MN (modernes et conventionnels).

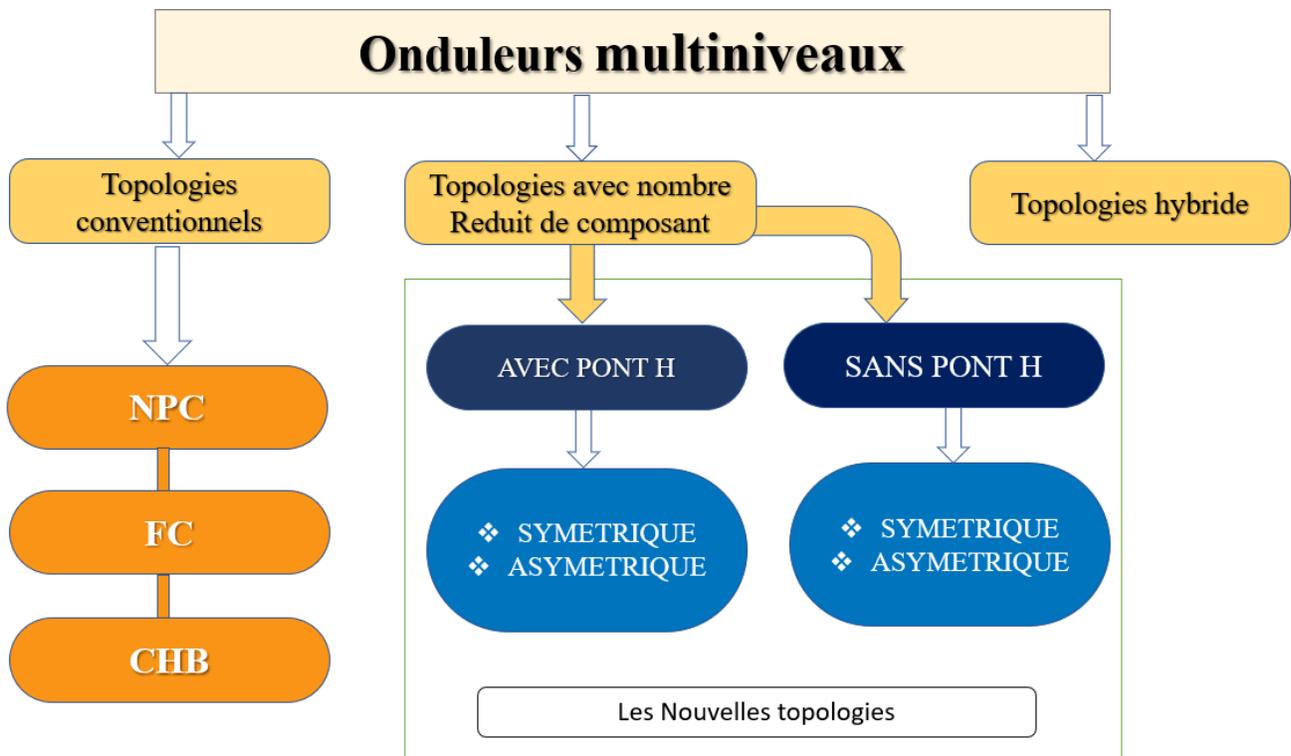


Figure II. 14: Classification des nouvelles topologies récentes d'onduleurs multiniveaux

II.3.8.1 Topologies sans pont H :

Les topologies d'onduleurs multiniveaux sans pont H sont couramment employées dans les applications de moyenne et haute tension. Elles se composent d'unités de cellules en cascade capables de générer des ondes bipolaires sans nécessiter de pont H. Ces topologies se divisent en deux catégories : symétriques et asymétriques. La plupart des topologies de RNC sans pont H sont conçues avec des configurations symétriques, pouvant également être adaptées à des configurations de sources DC asymétriques [33]. Ainsi, nous nous concentrons ici exclusivement sur les topologies sans pont H symétriques, en prenant comme exemple la topologie PUC.

- **Topologie PUC :** La topologie Packed U-cells (PUC) d'onduleur multiniveau sans pont H, développée par Ounejjar et al., repose sur une combinaison ingénieuse de condensateurs, de sources de tension DC et d'interrupteurs unidirectionnels pour produire les niveaux de tension requis. Chaque cellule de base, appelée U-cellule, est constituée d'un élément DC et de deux interrupteurs de puissance. Cette topologie assure l'équilibrage des tensions aux bornes des condensateurs.

L'avantage majeur de la topologie PUC réside dans la répartition efficace de la charge entre les interrupteurs : chaque interrupteur ne supporte que la tension correspondant au niveau le plus bas, ce qui réduit le stress et permet un fonctionnement à des fréquences plus basses. Cette flexibilité permet de modifier facilement le nombre de niveaux, améliorant ainsi les performances globales de l'onduleur [33]. La configuration de base de cette topologie, comprenant une source DC et deux condensateurs, est illustrée dans la Figure II. 16 ci-dessous.

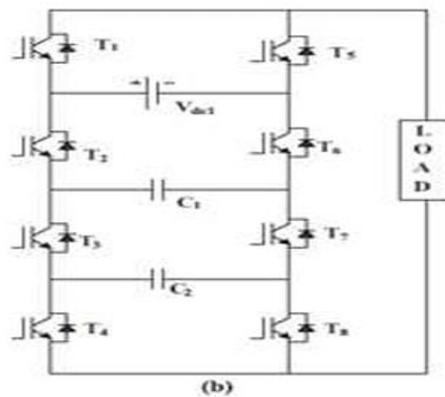


Figure II. 15 : La Topologie PUC.

II.3.8.2 Topologies symétrique avec un pont H :

Les topologies symétriques d'onduleurs multiniveaux avec un pont H se composent généralement de deux blocs distincts. Le premier bloc est dédié à la génération de la tension multiniveau DC (demi-cycle positif, unipolaire) en utilisant n cellules de base en cascade, tandis que le deuxième bloc est constitué d'un pont H pour obtenir l'onde alternative (ou bipolaire) multiniveau. Ces topologies symétriques avec un pont H présentent l'inconvénient d'utiliser un grand nombre de composants en raison de l'égalité des valeurs des tensions des sources DC, contrairement aux topologies asymétriques [33]. En prenant comme exemple la topologie SCSS

❖ **La topologie SCSS :** La topologie d'ondeur multiniveau avec pont H symétrique SCSS (Series Connected Switched Sources) est proposée par Choi et al. Elle est basée sur la connexion en série de différentes sources de tension DC commutées à travers des interrupteurs de puissance comme le montre la figure II.16. Le lien entre ces différentes sources DC synthétise la tension DC multiniveau. Le nombre de sources de tension DC et d'interrupteurs de puissance augmente avec l'augmentation du niveau. Le nombre de niveau N en fonction du nombre de sources DC "n" est $N=2.n+1$. L'inconvénient majeur de cette structure est la difficulté de son implantation avec une configuration asymétrique [33].

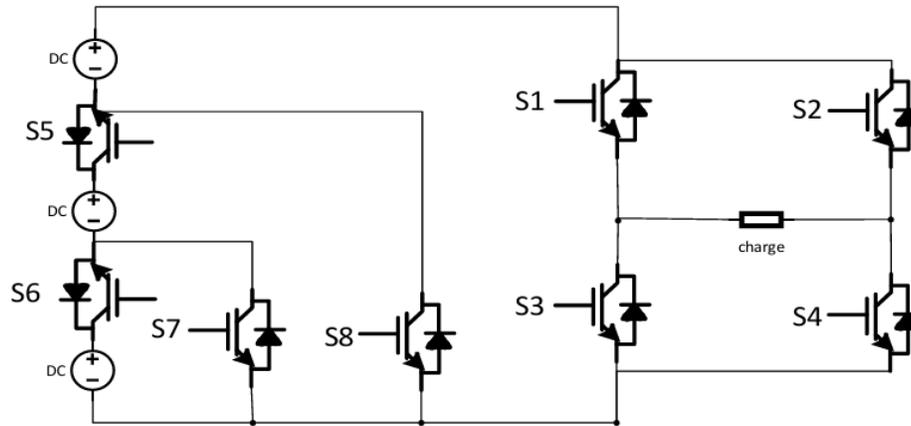


Figure II. 16: Topologies SCSS à sept niveaux

Le tableau suivant présente les différents sept niveaux possibles pour cette topologie SCSS :

Tableau II.10 : commutation des interrupteurs pour chaque niveau (SCSS)

S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	Vs
0	0	1	1	0	0	1	1	0
1	1	0	0	0	0	1	1	0
1	0	0	1	0	0	1	1	V _{dc}
1	0	0	1	1	0	1	0	2V _{dc}
1	0	0	1	1	1	0	0	3V _{dc}
0	1	1	0	0	0	1	1	-V _{dc}
0	1	1	0	1	0	1	0	-2V _{dc}
0	1	1	0	1	1	0	0	-3V _{dc}

II.3.8.3 Topologies Asymétrique avec un pont H :

Pour réduire le volume et le coût des onduleurs multiniveaux symétriques, plusieurs topologies en cascade asymétriques ont été développées. Ce type de configuration offre l'avantage de générer un nombre élevé de niveaux par rapport aux topologies symétriques utilisant le même nombre d'interrupteurs de puissance. De plus, elles permettent de minimiser les états redondants nécessaires pour générer des niveaux de tension spécifiques. Cependant, elles ont l'inconvénient d'utiliser des valeurs de tension élevées pour les sources DC [16]. On prend comme exemple la topologie qui est proposé par Babaei et al [35].

❖ **Structure en cascade propose par Babaei et al :** Cette topologie est proposée par Babaei et al.

Le nombre des niveaux de tension dans la sortie (N_{step}), nombre d'interrupteurs (N_{switch}), nombre des sources de tension continue (N_{source}), et l'amplitude maximale de la tension générée (V_{omax}) sont calculés comme suit, respectivement [35].

$$N_{step} = 2^{2n+1} - 1 \quad (II.1)$$

$$N_{switch} = 4n + 2 \quad (II.2)$$

$$N_{source} = 2n \quad (II.3)$$

$$V_{omax} = V_{Ln} + V_{Rn} \quad (II.4)$$

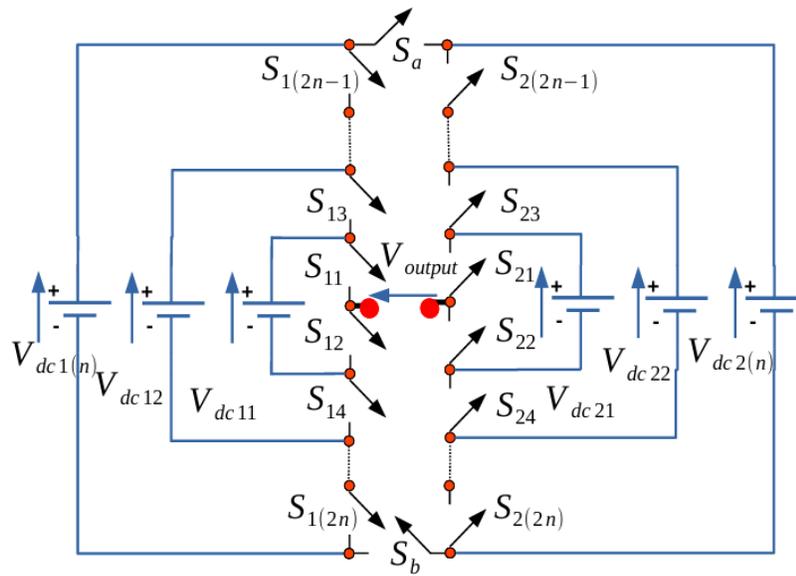


Figure II. 17 : Topologie en cascade généralisé par n niveaux propose par Babaie et al [35].

- ❖ Pour obtenir sept niveaux, en ajoutant deux interrupteurs de puissance unidirectionnels et une Source de tension inverse continue égale à $2V_{dc}$ à la structure de l'onduleur en pont H, comme montre la figure II.18, [35].

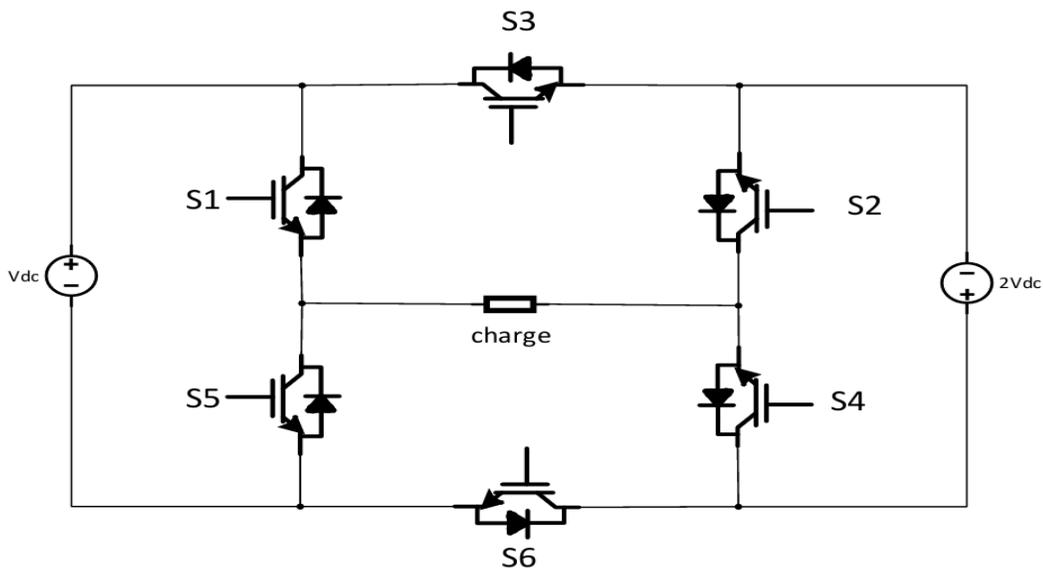


Figure II. 18: Topologie à 6 interrupteurs propose par Babaie et al [35].

Le tableau suivant exprime le fonctionnement de cette topologie a 6 interrupteurs :

Tableau II.11 : commutation des interrupteurs pour chaque niveau

S1	S2	S3	S4	S5	S6	Vs
0	0	0	1	1	1	0
1	1	1	0	0	0	0
1	0	0	0	1	1	V_{dc}
0	1	0	1	0	1	$2V_{dc}$
1	1	0	0	0	1	$3V_{dc}$
0	1	1	1	0	0	$-V_{dc}$
1	0	1	0	1	0	$-2V_{dc}$
0	0	1	1	1	0	$-3V_{dc}$

II.4 CONCLUSION :

A partir de ce chapitre en conclue, les nouvelles topologies d'onduleurs multiniveaux visent à améliorer l'efficacité énergétique, à réduire les coûts et la complexité, tout en élargissant leurs domaines d'application. Ces avancées les rendent plus compétitives et attrayantes par rapport aux topologies conventionnelles à deux niveaux.

Pour obtenir un bon rendement et minimiser les pertes il nécessite d'utilise et développe des stratégies de commande plus pratique et plus fiable pour ces onduleurs. Dans le chapitre suivant en va explore et étudie les types de ces commandes.

CHAPITRE III :

STRATÉGIES DE COMMANDE D'UN ONDULEUR MULTINIVEAU

III.1 Introduction :

Les onduleurs multiniveaux constituent une avancée significative dans le domaine de l'électronique de puissance, offrant des avantages en termes d'efficacité énergétique, de qualité de l'énergie électrique, et de réduction des harmoniques. Ces dispositifs sont largement utilisés dans les applications de conversion d'énergie, telles que les systèmes de génération d'énergie renouvelable, les entraînements de moteurs électriques et les réseaux électriques. La performance globale d'un onduleur multiniveau dépend en grande partie de sa stratégie de commande, qui joue un rôle crucial dans la régulation de la tension de sortie, la réduction des pertes et la gestion des harmoniques.

L'objectif principal de ce chapitre est d'explorer les différentes stratégies de commande utilisées dans les onduleurs multiniveaux, en mettant en évidence leurs avantages, leurs limitations et leurs applications spécifiques.

Enfin, nous aborderons les tendances actuelles en matière de recherche et d'innovation dans le domaine de la commande des onduleurs multiniveaux, en mettant en lumière les développements récents et les perspectives d'avenir.

La tension de sortie dépend essentiellement de la commande à utiliser, les techniques de commande les plus utilisées sont :

- Commande par hystérisées
- Commande plein d'ondes
- Commande par MLI Sinusoïdale (SPWM)
- Commande par MLI vectorielle (SVC)
- Commande par élimination sélectives d'harmoniques (SHE)

III.2 Commande par hystérisées :

La commande par hystérésis, également connue sous le nom de commande tout ou rien, est une méthode non linéaire qui repose sur la comparaison entre l'erreur entre le courant de référence et le courant généré par l'onduleur. Cette erreur est évaluée par rapport à une plage de tolérance appelée bande d'hystérésis. Lorsque l'erreur dépasse les limites de cette bande, une commande est émise pour maintenir l'erreur dans les limites. Cette méthode est caractérisée par sa simplicité de mise en œuvre, comme illustré dans la Figure III.1. Cependant, en raison de la nature libre des commutations à l'intérieur de la bande d'hystérésis,

il peut être difficile de contrôler les fréquences élevées près des limites supérieures de la bande en raison des commutations rapides [36].

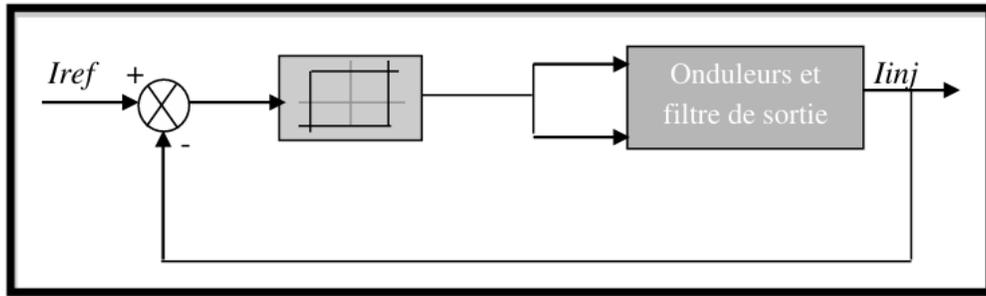


Figure III. 1 : Schéma de commande par hystérésis.

La commande par hystérésis assure en même temps la modulation et la protection contre les surcharges ou les courts-circuits. De plus le nombre des commutations par période change automatiquement en fonction des variables de commande [37].

III.3 Commande plein d'ondes :

La commande plein onde dans le contexte d'un onduleur fait référence à une technique de commande qui assure que la tension de sortie imite une forme d'onde complète, typiquement une onde sinusoïdale. Dans un onduleur monophasé multiniveaux, cette technique implique l'activation séquentielle des commutateurs électroniques pour générer plusieurs niveaux de tension, ce qui permet de créer une onde de sortie plus lisse et plus proche d'une sinusoïde naturelle.

Le fonctionnement de cette commande repose sur l'utilisation stratégique des commutateurs pour moduler la tension de sortie. En alternant l'ouverture et la fermeture de ces commutateurs à des intervalles précis, l'onduleur peut produire différents niveaux de tension qui, lorsqu'ils sont combinés, forment une onde sinusoïdale qui alimente efficacement les appareils en courant alternatif. En somme, la commande plein onde est essentielle pour les onduleurs, en particulier ceux utilisés dans les systèmes critiques tels que les alimentations sans interruption (ASI) ou les contrôleurs de vitesse pour les moteurs électriques, car elle permet de fournir une électricité de haute qualité avec moins de perturbations et d'harmoniques.

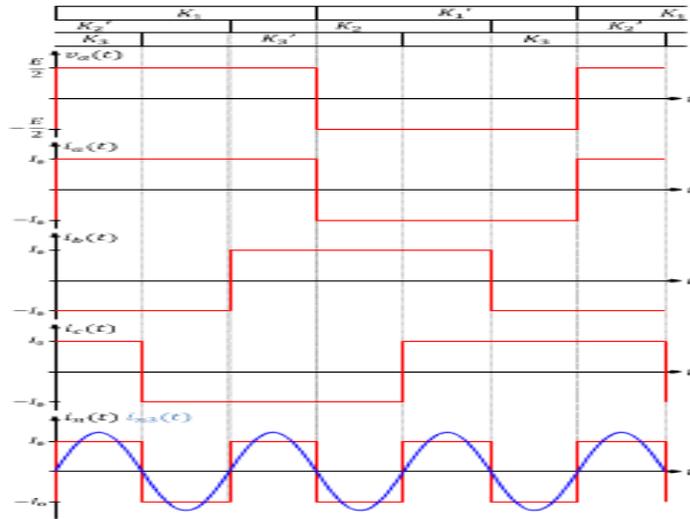


Figure III. 2: Exemple d'un signal de sortie de la commande plein onde

III.4 Commande par MLI Sinusoïdale (SPWM) :

Dans cette méthode, un signal sinusoïdal, désigné comme le signal de référence ou de modulation (V_m), est mis en comparaison avec un signal triangulaire, connu sous le nom de porteuse. Cette comparaison est illustrée dans la figure III.4, Et a pour but de produire des signaux de modulation de largeur d'impulsion (PWM). Ces signaux PWM sont ensuite utilisés pour activer les commutateurs de l'onduleur.

La principale distinction entre la modulation SPWM à deux niveaux et celle à plusieurs niveaux se trouve dans le nombre de porteuses nécessaires. Pour un système à 'm' niveaux, 'm-1' porteuses sont requises. Dans les systèmes de haute puissance, la gestion de l'énergie dissipée est cruciale. La technique de contrôle SPWM opérant à la fréquence fondamentale a été développée pour réduire les pertes dues aux commutations. Les stratégies de contrôle SPWM utilisant plusieurs porteuses ont également été adoptées pour améliorer l'efficacité des onduleurs multiniveaux (MN), et sont classées selon l'orientation des signaux porteuses, soit verticale soit horizontale. L'avantage des porteuses alignées horizontalement est que chaque module s'active et se désactive un nombre fixe de fois par cycle, sans égard à l'amplitude de la tension produite. En revanche, l'approche avec des porteuses alignées verticalement peut être implémentée plus aisément sur divers types de contrôleurs numériques [39].

La SPWM se divise en deux catégories principales : la SPWM avec référence et la MCPWM qui utilise plusieurs porteuses triangulaires. Cette dernière comprend des sous-catégories telles que PD, POD et APOD, qui diffèrent par l'arrangement des porteuses triangulaires, illustré par la figure III.4 [35].

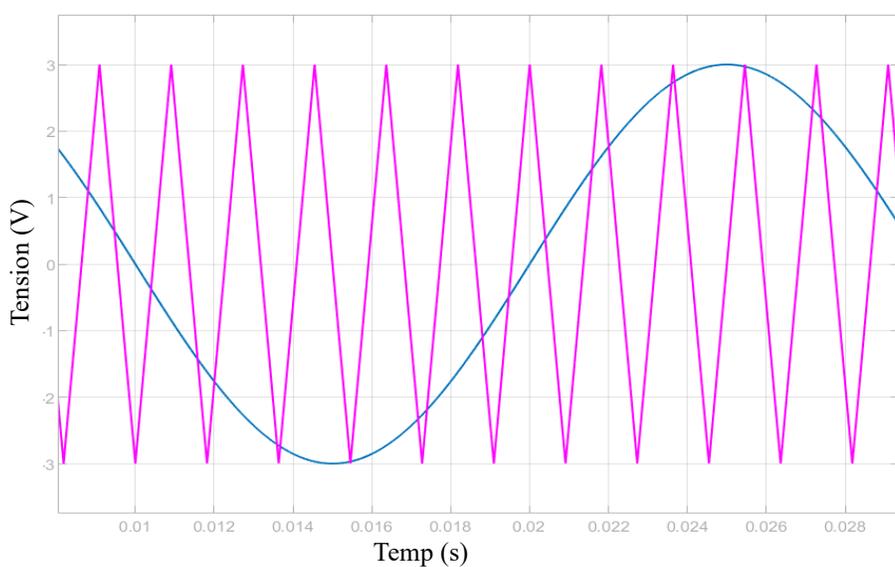


Figure III. 3: Commande SPWM d'un onduleur a 2 niveaux.

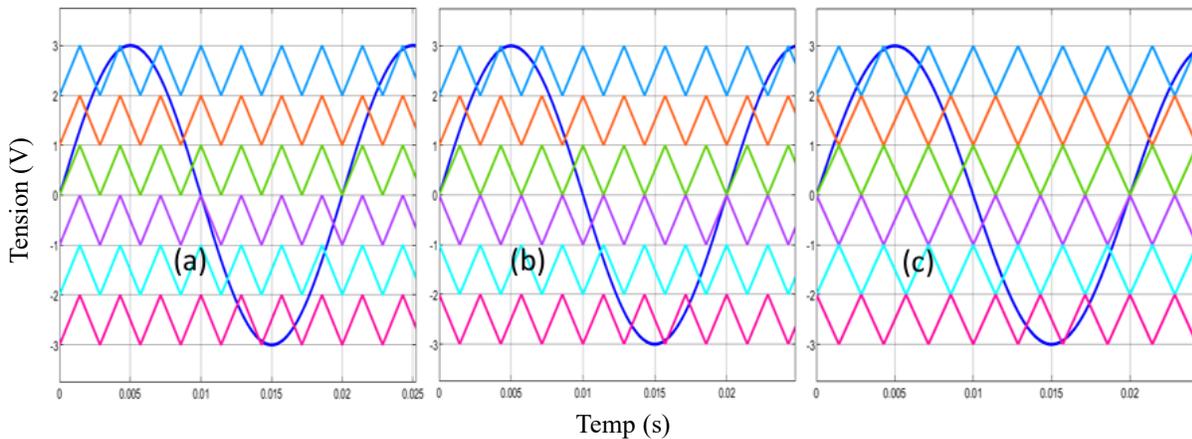


Figure III. 4: Différentes formes de porteuses multiniveaux, (a)PD, (b)POD, (c)APOD [44].

III.5 Commande par MLI vectorielle :

Cette technique, connue sous le nom de Contrôle Vectoriel Proche (CVP) ou Nearest Vector Control (NVC), est préconisée comme une alternative à la méthode SHE. Fondée sur la théorie du contrôle vectoriel, elle vise à créer un vecteur de tension de référence en sélectionnant parmi une multitude de vecteurs de tension disponibles de l'onduleur, celui qui minimise l'erreur. Chaque vecteur est associé à un

état spécifique des commutateurs de l'onduleur. Le vecteur le plus proche de la référence est alors produit directement dans le plan vectoriel, éliminant le besoin de modulation, comme illustré dans la figure 1.30. Cette forme de modulation est idéale pour les convertisseurs multiniveaux avec un grand nombre de niveaux, car l'augmentation du nombre de niveaux réduit proportionnellement l'erreur. Ainsi, il n'est pas nécessaire de recourir à un schéma de modulation plus élaboré. La fréquence de commutation pour chaque interrupteur de puissance est maintenue égale à celle du signal fondamental, ce qui diminue les pertes dues aux commutations et permet d'utiliser cette technique de modulation même avec des dispositifs de commutation plus lents, comme les thyristors GTO (Gate Turn Off), dans des contextes de forte puissance [38] [35].

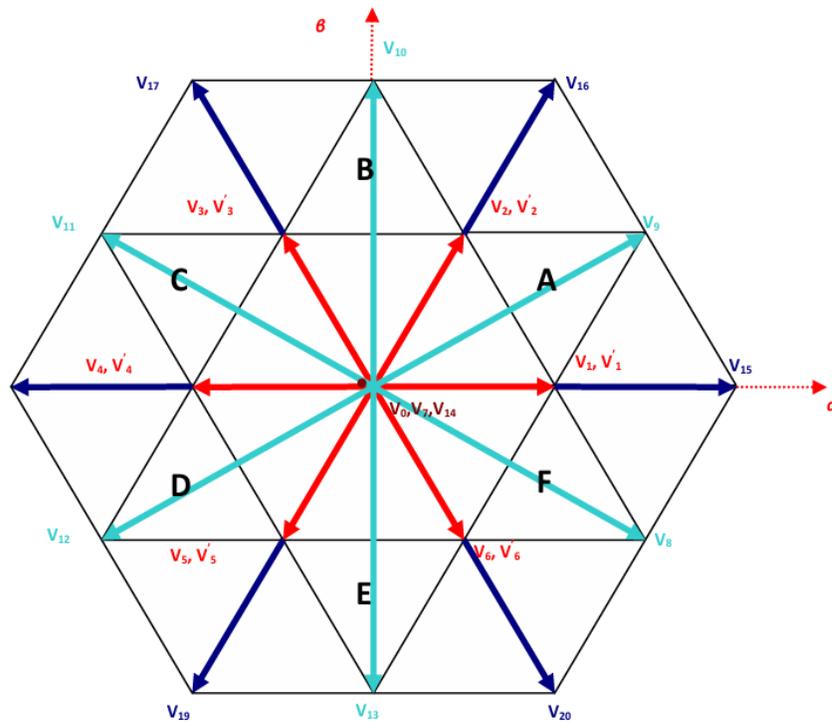


Figure III. 5: Exemple de vecteur référence dans le cas de la modulation vectorielle (SVC).

III.6 La commande par élimination sélective des harmoniques (SHE) :

Cette méthode, introduite par Patel et al. En 1973[40], implique le calcul préliminaire des angles de commutation optimaux pour les interrupteurs à semi-conducteurs de l'onduleur. L'objectif est d'éliminer les harmoniques de bas ordre prédominants dans la forme d'onde de la tension de sortie. Cette approche contribue à minimiser le Taux de Distorsion Harmonique (THD), permettant ainsi de réduire la dimension et le coût du filtre de sortie. Pour éliminer des harmoniques spécifiques, on formule les équations

harmoniques en fonction des angles de commutation de l'onduleur multiniveau. Les angles étant calculés à l'avance de manière off-line, cette technique est qualifiée de stratégie de contrôle en boucle ouverte. Par conséquent, les buts principaux de la méthode de l'Élimination Sélective des Harmoniques (SHE) sont de diminuer les harmoniques ciblés, le THD, ainsi que les pertes liées à la commutation [41][33].

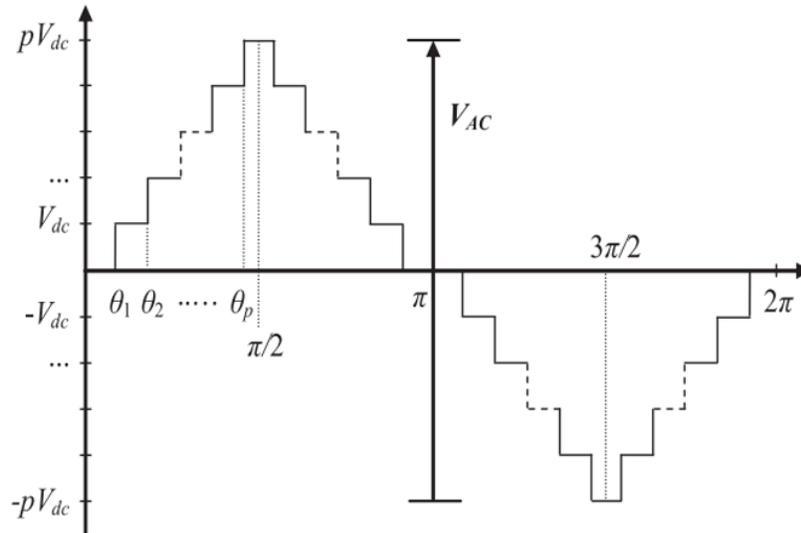


Figure III. 3 : Tension de sortie avec une configuration à P niveaux

III.6.1 Décomposition en séries de Fourier :

Soit une fonction $f(t)$ de période T , la fonction $f(t)$ est décomposée en une somme de fonctions sinusoïdales comme suit :

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(2\pi n f_0 t) + b_n \sin(2\pi n f_0 t) \quad \text{avec } (n = \text{nombre entier}) \quad (\text{III.1})$$

Les paramètres a_0 , a_n et b_n appelés : coefficients de Fourier, on note aussi que f_0 est la fréquence du fondamental. Pour une fonction périodique les coefficients a_0 , a_n et b_n sont déterminés par les relations suivantes :

$$\begin{cases} a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \\ a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega t) dt \\ b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(n\omega t) dt \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

Avec T = la période du signal $f(t)$ et $\omega = \frac{2\pi}{T}$

On peut remarquer que a_0 est la valeur moyenne de signal $f(t)$, donc a_0 est nul si le signal $f(t)$ est un signal sinusoïdal.

Si la courbe représentative de la fonction $f(t)$ admet un centre de symétrie situé sur l'axe Ox, alors, donc une fonction périodique possède la symétrie impaire, en choisissant ce point comme origine des temps :

$$f(-t) = -f(t) \quad (III.3)$$

Dans le cas d'une fonction périodique impaire, son expression en séries de Fourier contiendra exclusivement des composantes sinusoïdales. Pour calculer l'amplitude de ces composantes sinusoïdales, il suffit de réaliser l'intégration sur la moitié ou le quart de la période de la fonction.

$$\begin{cases} a_0 = 0 \\ a_n = 0 \\ b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(n\omega t) dt \end{cases} \quad (III.4)$$

Dans notre cas de 7 niveaux on peut prendre 3 angles pour calculer b_n

Avec : $0 < \alpha_1 < \alpha_2 < \alpha_3 < \frac{\pi}{2}$

Alors :

$$b_n = \frac{4}{T} \int_0^{\frac{\pi}{2}} V_s(t) \sin(n\omega t) dt \quad (III.5)$$

$$b_n = \frac{4}{T} \int_0^{\alpha_1} V_{dc} \sin(n\omega t) dt + \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} V_{dc} \sin(n\omega t) dt + \int_{\alpha_2}^{\alpha_3} V_{dc} \sin(n\omega t) dt \quad (III.6)$$

$$b_n = \frac{4V_{dc}}{n\pi} [\cos(n\alpha_1) + \cos(n\alpha_2) + \cos(n\alpha_3)] \quad \text{avec } n=1,3,5,\dots \quad (III.7)$$

La formule générale devient :

$$v(\omega t) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \left(\frac{4V_{dc}}{n\pi} \sum_{i=1}^p \cos(n\alpha_i) \right) \sin(n\omega t) \quad (III.8)$$

L'équation (12) est l'équation principale de l'onduleur proposé et $\alpha, \alpha_2, \alpha_3 \dots \alpha_p$ sont les angles de commutation à optimiser, idéalement pour V_1 tension fondamentale souhaitée, les angles de commutation est possible de sorte que $V_{out}(\omega t) = V_1 \sin(\omega t)$ et les harmoniques supérieurs spécifiques soient égaux à zéro [7].

Pour contrôler la valeur de crête de la tension de sortie à V_1 et éliminer les harmoniques de rang 3 et 5, les équations résultantes doivent être :

$$\begin{cases} V1 = \frac{4V_{dc}}{\pi} \sum_{i=1}^p \cos(\alpha_i) \\ V3 = \frac{4V_{dc}}{3\pi} \sum_{i=1}^p \cos(3\alpha_i) \\ V5 = \frac{4V_{dc}}{5\pi} \sum_{i=1}^p \cos(5\alpha_i) \end{cases} \quad (III.9)$$

$$\begin{cases} \cos(\alpha_1) + \cos(\alpha_2) + \cos(\alpha_3) = M \times 3 \\ \cos(3\alpha_1) + \cos(3\alpha_2) + \cos(3\alpha_3) = 0 \\ \cos(5\alpha_1) + \cos(5\alpha_2) + \cos(5\alpha_3) = 0 \end{cases} \quad (III.10)$$

Avec : $M = \frac{r \times \pi}{4}$

r : Coefficient de réglage , C'est le rapport de la tension de sortie fondamentale V_1 à la tension maximale $V_{out\ max}$, $r = \frac{V_1}{V_{dc}}$.

M : Indice de modulation

III.6.2 Les méthodes d'optimisation :

Pour le calcul d'optimisation de la méthode SHE on peut utiliser plusieurs méthodes d'optimisation différent, qui se résume dans la figure suivante :

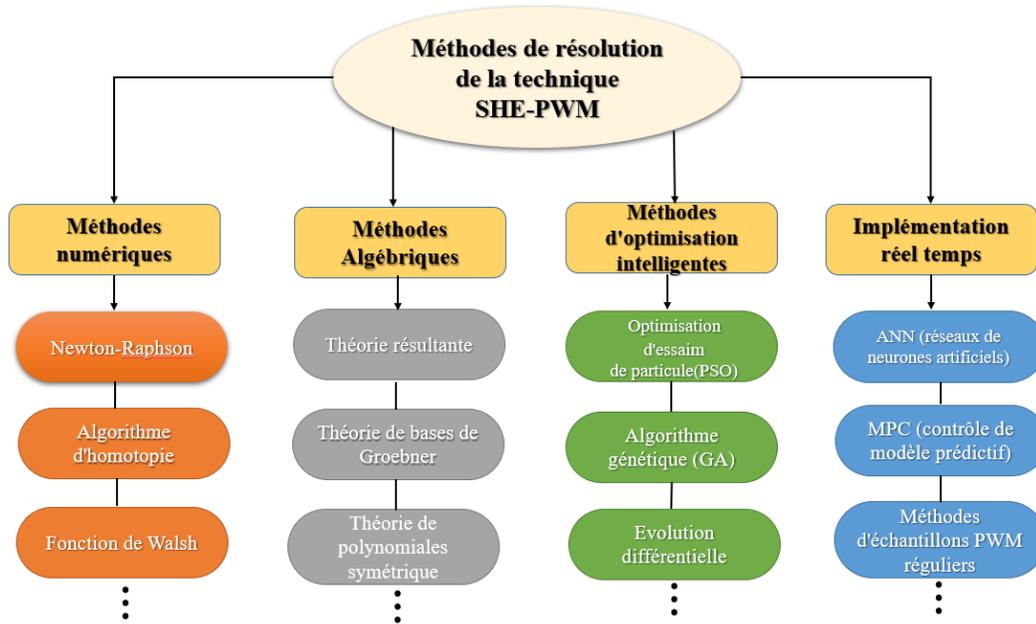


Figure III. 4: Les méthodes d'optimisation [43].

III.6.3 Optimisation de la technique SHE :

III.6.3.1 L'optimisation par Newton-Raphson :

La méthode de Newton-Raphson est une technique employée pour résoudre des équations algébriques non linéaires, reposant sur une série d'approximations successives. D'une façon générale, le système d'équation non-linéaire de N variables peut être représenté par :

$$\begin{cases} f(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n) = K1 \\ f(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n) = K2 \\ f(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n) = Kn \end{cases} \quad (III.11)$$

Alors :

$$F(\alpha) = K \quad (III.12)$$

Avec :

$$\begin{cases} F = [f1, f2, f3, \dots, fn]^T \\ \alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n]^T \\ K = [K1, K2, K3, \dots, Kn] \end{cases} \quad (III.13)$$

Dans un système d'équations non linéaire, l'algorithme de la méthode de newton peut être présenté par les étapes suivantes :

a) Donner les valeurs initiales des alphas qui assurant la convergence de la méthode pour α^0

En pose que : $\alpha^0 = [\alpha_1^0, \alpha_2^0, \alpha_3^0, \dots, \alpha_n^0]$.

b) Le calcul de matrice :

$$F(\alpha^j) = F^j \tag{III.14}$$

c) Linéarisation de l'équation :

$$F^j + \left[\frac{df}{d\alpha} \right] d\alpha^j = K \tag{III.15}$$

D'où

$$\left[\frac{df}{d\alpha} \right] = \begin{bmatrix} \frac{df_1}{d\alpha_1} & \dots & \frac{df_n}{d\alpha_1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{df_1}{d\alpha_n} & \dots & \frac{df_n}{d\alpha_n} \end{bmatrix} \tag{III.16}$$

Et :

$$d\alpha^j = [\alpha_1^j, \alpha_2^j, \alpha_3^j, \dots, \alpha_n^j]^T \tag{III.16}$$

d) A partir de l'équation (14 et 16) on trouve :

$$d\alpha^j = INV \left[\frac{df}{d\alpha} \right]^j \times (K - F^j) \tag{III.18}$$

Avec : $INV \left[\frac{df}{d\alpha} \right]$ c'est l'inverse de la matrice $\left[\frac{df}{d\alpha} \right]$

e) Les angles suivants :

$$\alpha^{j+1} = \alpha^j + d\alpha^j \tag{III.19}$$

f) Répéter le processus de l'équation (III.14) à (III.18), jusqu'à la valeur désirée de $d\alpha^j$

L'organigramme dans la figure suivante explique et résume toutes les étapes précédentes :

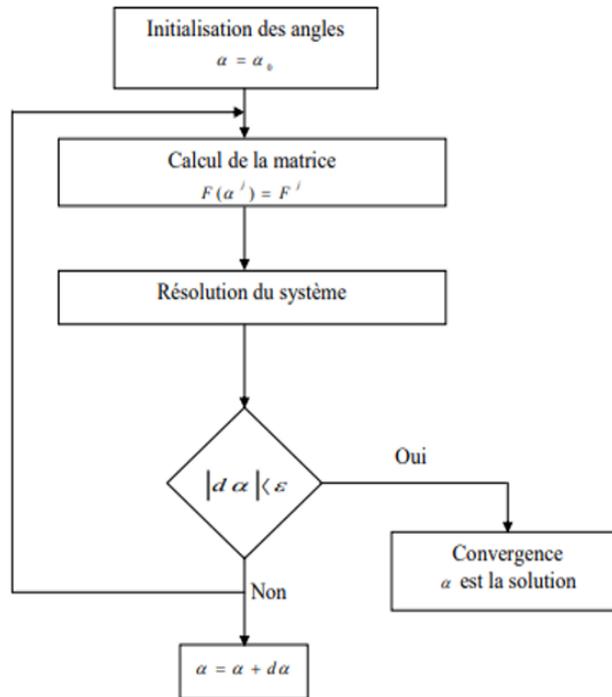


Figure III. 5 : Organigramme de calcul des angles par la méthode de Newton-Raphson.

III.6.3.2 L'optimisation d'essaim de particule (PSO) :

En 1995, un article sur l'optimisation par essaim particulaire (PSO) a été présenté au Congrès sur la computation évolutive (Kennedy et Eberhart, 1995). Cet article historique a déclenché une vague de publications au cours de la dernière décennie sur diverses applications réussies de PSO pour résoudre de nombreux problèmes d'optimisation difficiles. Il est très attrayant en raison du cadre conceptuel simple et de l'analogie avec le vol d'oiseaux qui facilite la visualisation conceptuelle du processus de recherche.

En PSO, une solution est représentée par une particule, et l'ensemble des solutions est appelé un essaim de particules. Chaque particule a deux propriétés principales : sa position et sa vitesse. Chaque particule se déplace vers une nouvelle position en utilisant sa vitesse. Une fois qu'une nouvelle position est atteinte, la meilleure position de chaque particule et la meilleure position de l'essaim sont mises à jour si nécessaire. La vitesse de chaque particule est ensuite ajustée en fonction des expériences de la particule. Le processus est répété jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit atteint. Lorsqu'une particule se déplace, elle prend en compte trois aspects principaux :

- Inertie : elle garde une partie de sa trajectoire précédente.
- Cognition : elle est attirée par les meilleures solutions qu'elle a déjà trouvées.

- Sociabilité : elle s'oriente vers les solutions les plus performantes découvertes par ses voisines, en s'appuyant sur leur expérience collective.

L'algorithme de fonctionnement :

Pour mettre en œuvre dans un problème d'optimisation à n dimensions, les vecteurs de position et de vitesse de la particule \mathbf{u} sont représentés par :

$$\chi_{pr} = [\chi_{2pr}, \chi_{2pr}, \dots, \chi_{npr}] \quad v_{pr} = [v_{2pr}, v_{2pr}, \dots, v_{npr}] \quad (\text{III.20})$$

La meilleure position antérieure de la particule ρ_{best} est définie en fonction de l'évaluation de la fonction de fitness, symbolisée par :

$$\rho_{best_{pr}} = [\rho_{2pr}, \rho_{2pr}, \dots, \rho_{npr}] \quad (\text{III.21})$$

La particule optimale est symbolisée par g_{best} . Les mises à jour de vitesse pour chaque particule peuvent être calculées selon la formule suivante :

$$V_i^{k+1} = C_0 V_i^k + C_1 \times rand_1 \times (p_{best}_i^k - X_i^k) + C_2 \times rand_2 \times (g_{best}_i^k - X_i^k) \quad (\text{III.22})$$

Chaque particule ajuste sa position vers une nouvelle position en ajoutant sa vitesse modifiée selon l'équation suivante :

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \quad (\text{III.23})$$

Le coefficient d'inertie C_0 décroît linéairement de C_1 à C_2 en suivant l'équation suivante :

$$C_0 = C_{\max} - (C_{\max} - C_{\min}) / \text{iter}_{\max} \times \text{iter} \quad (\text{III.24})$$

- L'algorithme PSO de base est présenté dans la Figure III.8 suivant :

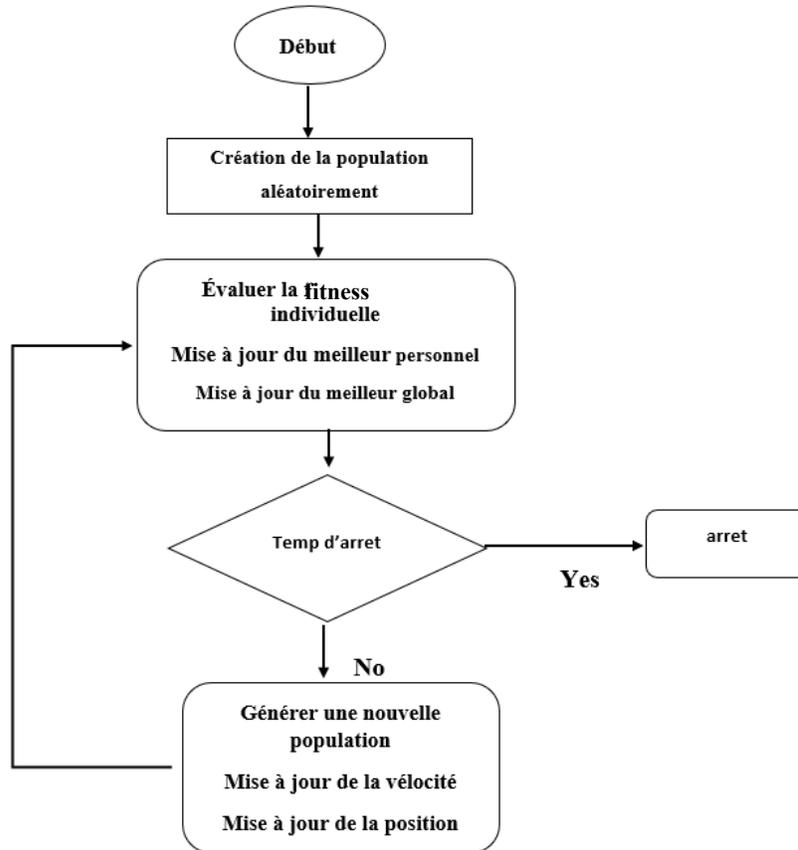


Figure III. 6 : Organigramme générale de PSO

III.7 Perturbations harmoniques en courant et en tension :

III.7.1 Origine des harmoniques :

La multiplication des appareils électriques utilisant des convertisseurs statiques a entraîné ces dernières années une hausse significative de la pollution harmonique dans les réseaux électriques. Ces appareils sont considérés comme des charges non linéaires qui émettent des courants harmoniques à des fréquences multiples de la fréquence de base, voire à des fréquences arbitraires. L'impact de ces courants harmoniques sur les impédances du réseau peut entraîner l'apparition de tensions harmoniques aux points de connexion, polluant ainsi les consommateurs alimentés par le même réseau. Les secteurs industriels concernés comprennent aussi bien des applications secondaires (gradateurs, redresseurs, onduleurs, etc.) que tertiaires (informatique, éclairage dans les bureaux, commerces, etc.) ou domestiques (téléviseurs, électroménagers en grand nombre).

III.7.2 l'effet des harmoniques :

Il est possible de mentionner de nombreux effets des harmoniques sur les installations et les équipements électriques. En va donner les plus importants effets :

- L'échauffement
- L'interférence avec les réseaux de télécommunication
- Les défauts de fonctionnements de certains équipements électriques
- Le risque d'excitation de résonance
- Le facteur de puissance : Normalement, pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance est donné par le rapport entre la puissance active P et la puissance apparente S. Les générateurs, les transformateurs, les lignes de transport et les appareils de contrôle et de mesure sont dimensionnés pour la tension et le courant nominaux. Une faible valeur du facteur de puissance se traduit par une mauvaise utilisation de ces équipements. Dans le cas où il y a des harmoniques, une puissance supplémentaire appelée la puissance déformante (D), donnée par la relation (I.3), apparaît comme le montre le diagramme de Fresnel de la Figure III.11.

$$D = V_1 \sqrt{\sum_{h=2}^{50} I_h^2} \quad (\text{III.25})$$

Le facteur de puissance FP devient :

$$FP = \frac{P}{\sqrt{p^2 + Q^2 + D^2}} \quad (\text{III.26})$$

On voit bien que les harmoniques affectent aussi le facteur de puissance.

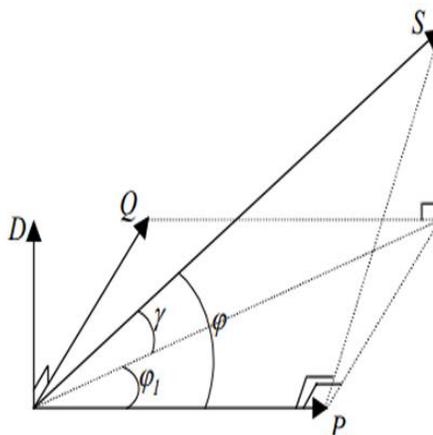


Figure III. 7: Diagramme de Fresnel des puissances

➤ Le taux global de distorsion harmonique :

$$THD = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \frac{h_n^2}{h_1^2}} \quad (\text{III.27})$$

Avec : h_n représente la composante harmonique de rang n , h_1 représente la composante harmonique fondamentale

III.8 Conclusion :

En conclue, les stratégies de commande des onduleurs multiniveaux se sont avérées être un domaine d'étude riche et prometteur. Les études dans ce chapitre ont permis de mettre en lumière l'importance de la sélection d'une stratégie de commande adaptée pour optimiser les performances d'un onduleur multiniveaux. Que ce soit pour les applications de ce dernier, la commande joue un rôle très important dans la gestion des harmoniques et la qualité du signal de sortie.

CHAPITRE IV :

SIMULATION ET RÉSULTATS

IV.1 Introduction :

Pour générer une tension sinusoïdale aussi précise que possible dans un onduleur à 6 interrupteurs, plusieurs stratégies de commande ont été proposées. Trois méthodes conventionnelles ont joué un rôle clé dans les recherches : la modulation vectorielle, la modulation de largeur d'impulsion (PWM) et la technique (SHE-PWM). Dans ce chapitre, nous nous pencherons sur la simulation et la commande de cet onduleur, en présentant brièvement les simulations avec les deux techniques de commande (SHE et SPWM), avec et sans filtre. De plus, nous aborderons une méthode d'optimisation du système non linéaire, à savoir la méthode de Newton-Raphson (NR) et l'optimisation par essaim de particules (PSO), pour déterminer les angles optimaux de commutation des semi-conducteurs de puissance. L'objectif est d'assurer l'efficacité de cette topologie avec la bonne technique de commande, tout en tenant compte de l'influence du filtrage

IV.2 Simulations et résultats :

Dans notre chapitre, nous examinerons cinq scénarios principaux :

- 1- Le premier scénario consiste en une comparaison entre deux niveaux de tension différents en utilisant la même stratégie de commande.
- 2- Le deuxième scénario se penche sur la comparaison entre une topologie conventionnelle et une topologie avec un nombre réduit de composants, tout en maintenant la même stratégie de commande.
- 3- Le troisième scénario explore la comparaison entre deux onduleurs de même topologie, mais avec deux stratégies de commande différentes.
- 4- Le quatrième scénario se concentre sur la comparaison entre deux méthodes d'optimisation pour la technique SHE-PWM.
- 5- le cinquième scénario implique la simulation de cet onduleur avec la technique SHE-PWM, associée à un filtre.

IV.2.1 Le premier scenario :

Dans ce scenario en va comparer entre un onduleur de sept niveaux et un onduleur de cinq niveaux avec la même technique de commande (la commande SHE).

➤ Simulation de l'onduleur a sept niveaux :

L'onduleur utilisé dans ce cas est un onduleur avec un nombre réduit de composant avec six interrupteurs.

Lorsque nous utilisons la méthode d'optimisation de Newton-Raphson (NR) pour déterminer les angles de commutation d'un onduleur à sept niveaux, les résultats optimaux sont les suivants :

$$\alpha_1=9.6041^\circ, \alpha_2=28.2237^\circ, \alpha_3=54.3713^\circ, \text{ pour } r=1.036.$$

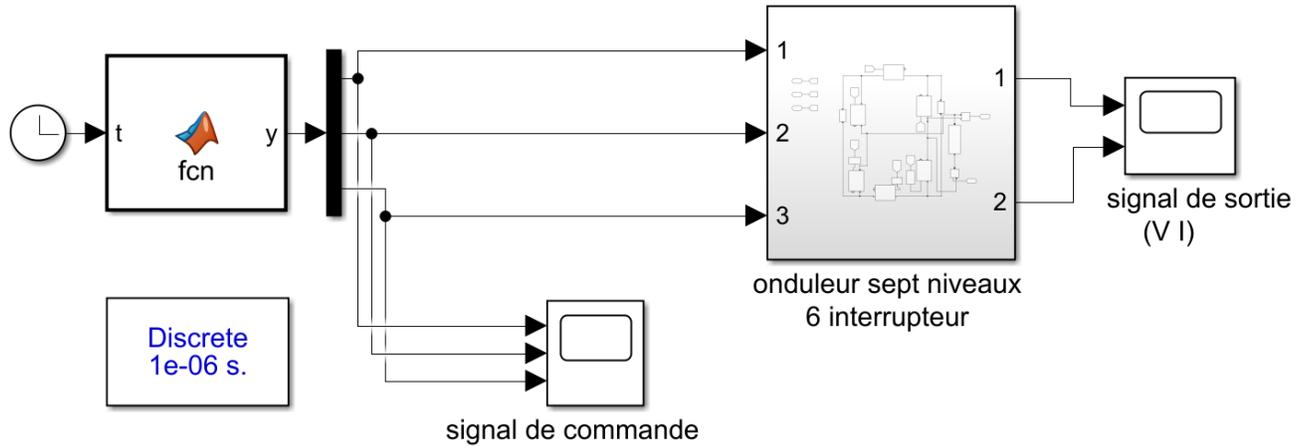


Figure IV. 1: Simulation de l'onduleur de six interrupteurs.

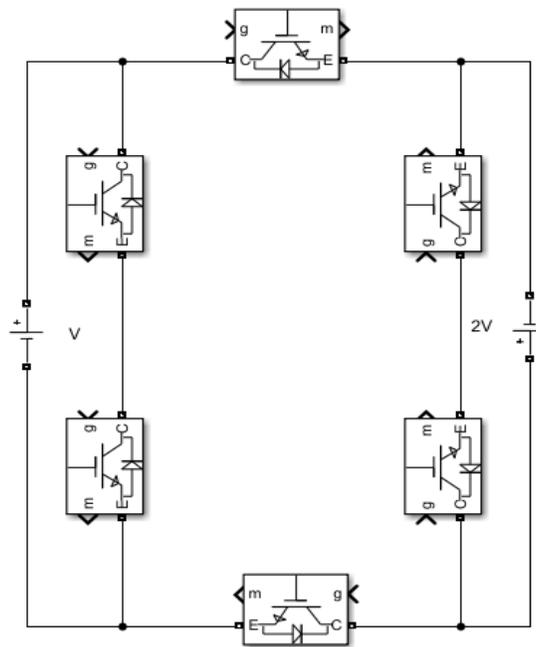


Figure IV. 2: Onduleur sept niveaux avec six interrupteurs.

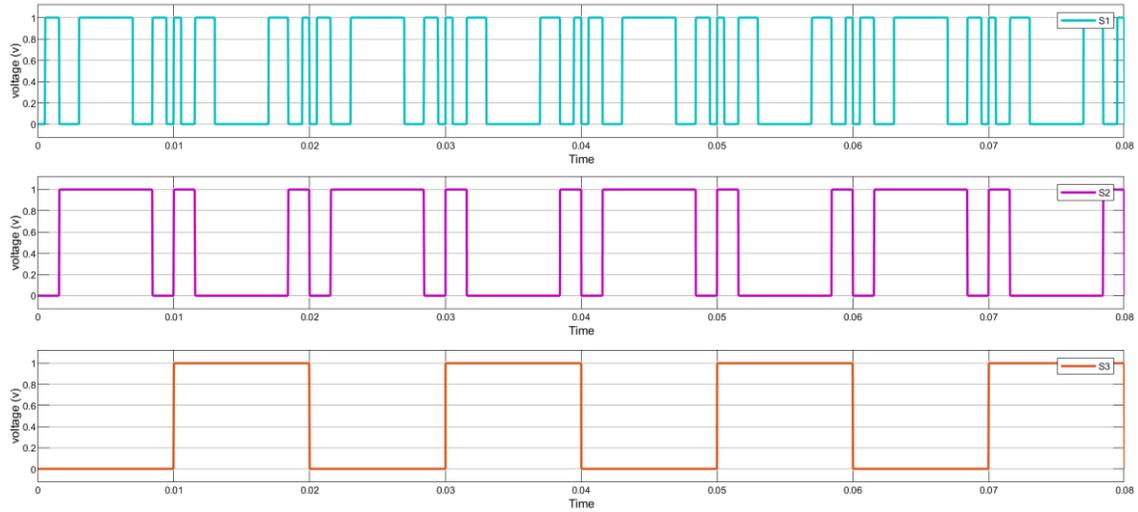


Figure IV. 3: Signaux de commande

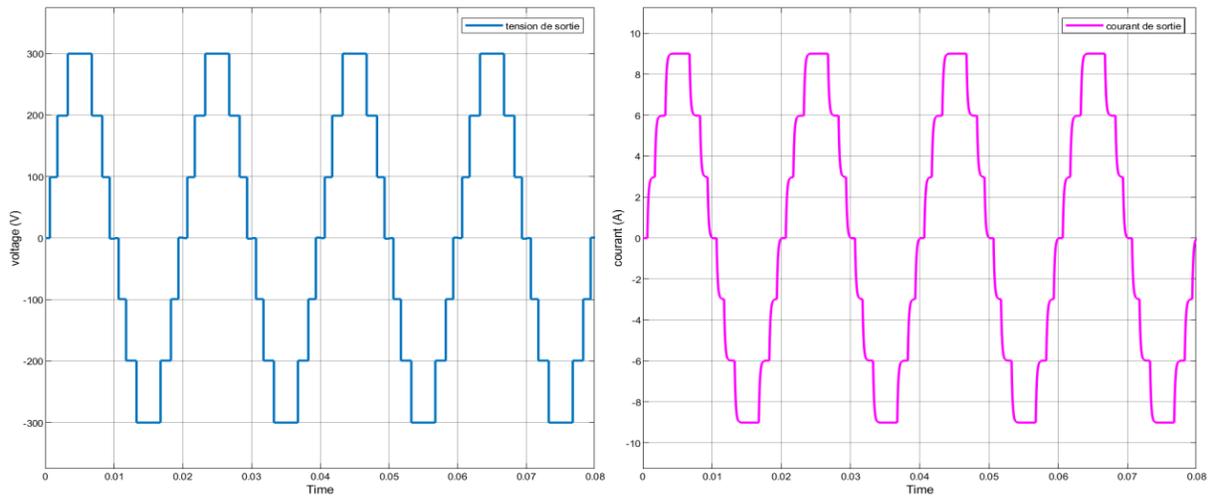


Figure IV. 4 : Signaux de sortie

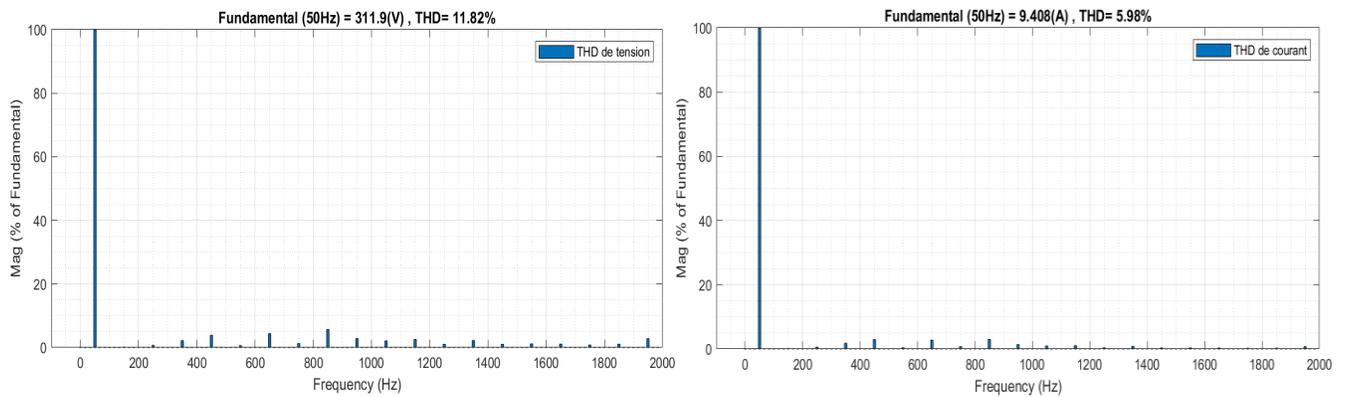


Figure IV. 5: Spectre de tension et de courant

➤ **Simulation de l'onduleur a cinq niveaux :**

Dans ce cas, nous obtenons un onduleur à cinq niveaux à partir de l'onduleur à sept niveaux du premier scénario. Nous modifions la tension V_{dc2} pour qu'elle soit égale à $V_{dc1}=V_{dc2}$, tout en conservant le même schéma. Les seuls changements sont les angles de commutation, qui deviennent :

$$\alpha_1=12.2216^\circ, \alpha_2=47.7784^\circ, \text{ pour } r= 0.9.$$

Le nouveau schéma d'onduleur doit être :

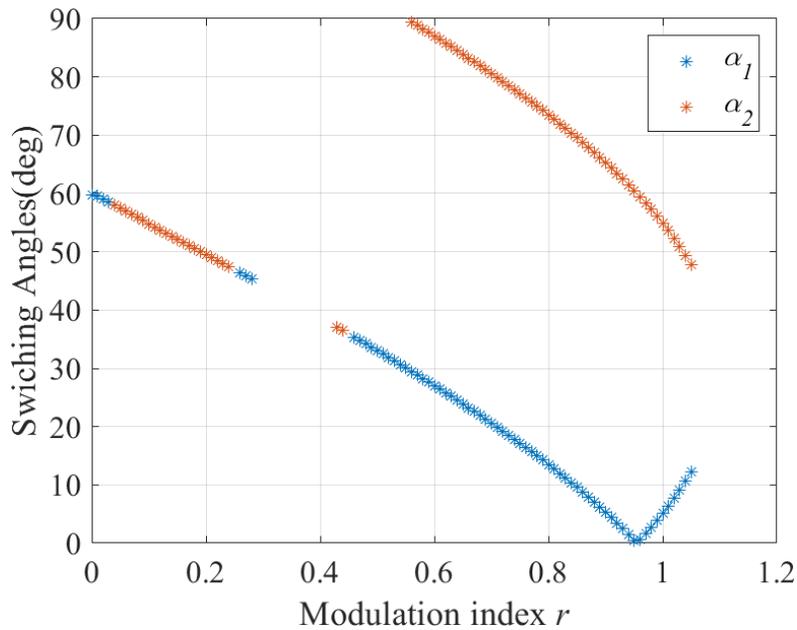


Figure IV. 6 : Angles de commutation en fonction de l'indice de modulation

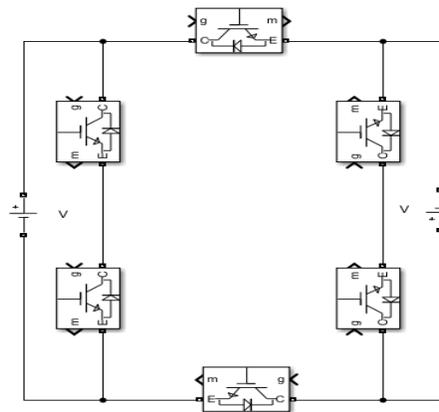


Figure IV. 7: Onduleur cinq niveaux avec six interrupteurs

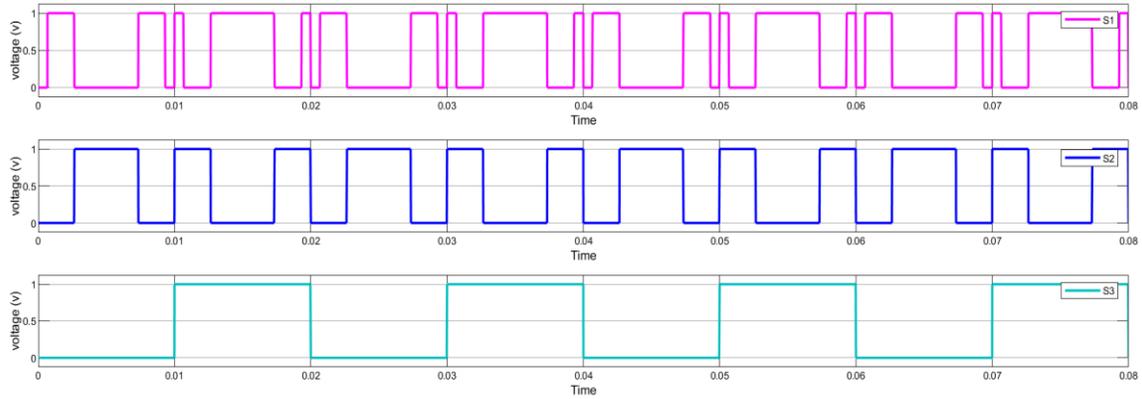


Figure IV. 8 : Les signaux de commande

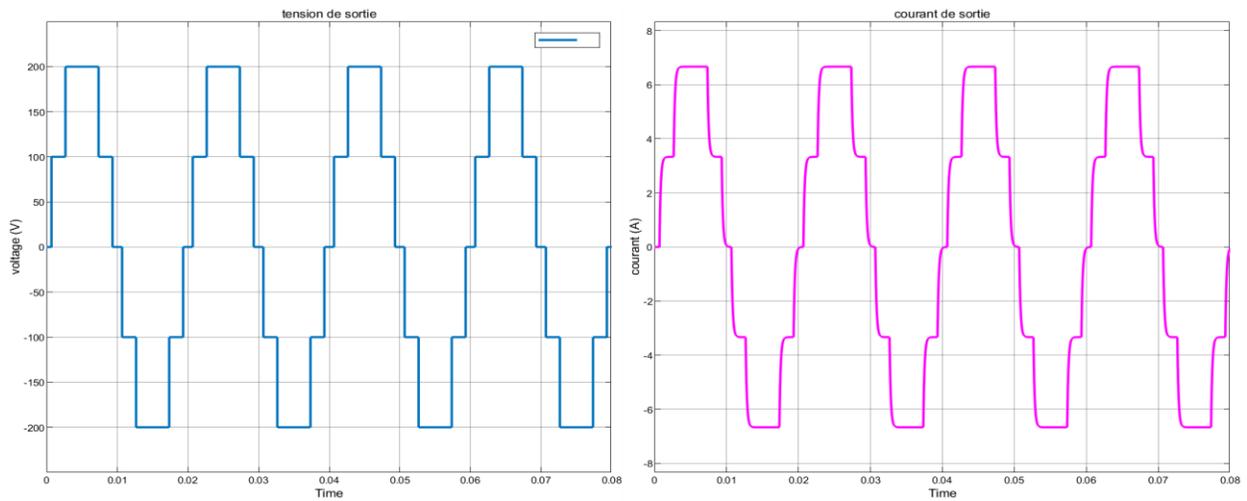


Figure IV. 9 : Signaux de sortie

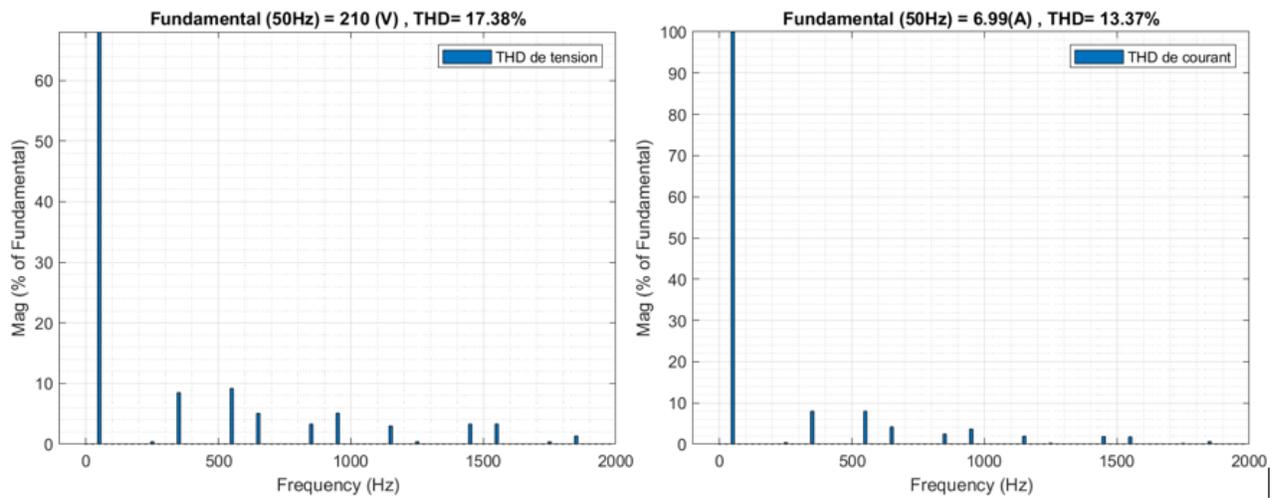


Figure IV. 10: Spectre de tension et de courant

• **Discussion des résultats :**

- Le taux d'harmoniques de tension (THD) dans l'onduleur à sept niveaux est de 11,82%, tandis que le THD de courant est de 5,98%. Nous notons que les harmoniques d'ordre 5 et 7 sont négligeables par rapport au fondamental d'amplitude 100 %.
- En ce qui concerne l'onduleur à cinq niveaux, le THD de tension est de 17,38% et le THD de courant est de 13,37%.
- Il est évident que le nombre de niveaux a un impact sur la qualité du signal de sortie : le THD diminue avec l'augmentation du nombre de niveaux de l'onduleur.

IV.2.2 Le deuxième scénario :

Dans ce scénario, nous comparons les résultats de l'onduleur à sept niveaux obtenus dans le premier scénario avec un onduleur de topologie NPC à sept niveaux, utilisant la même technique de commande SHE-PWM et les mêmes angles de commutation obtenus dans le premier scénario.

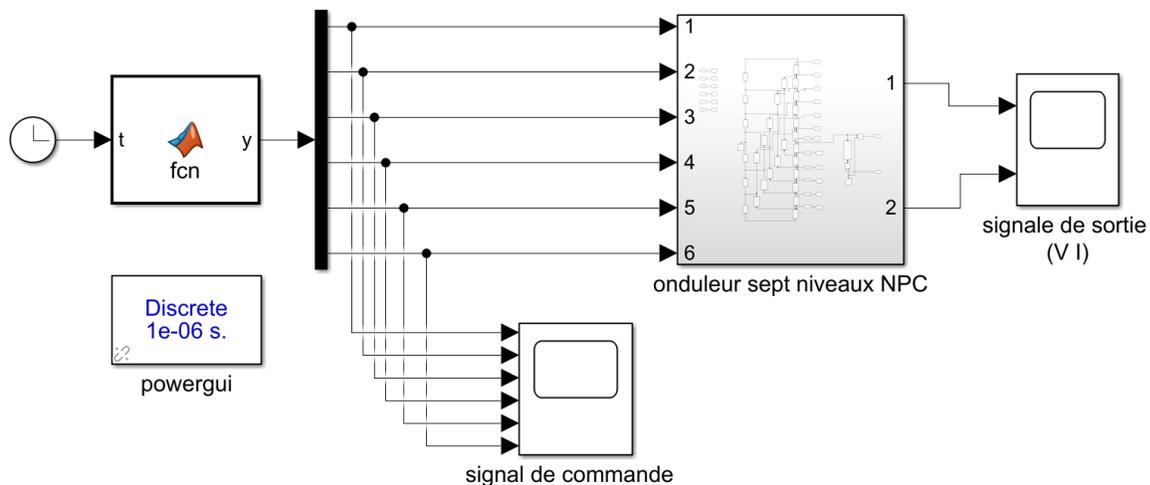


Figure IV. 11 : Simulation de l'onduleur a sept niveaux NPC.

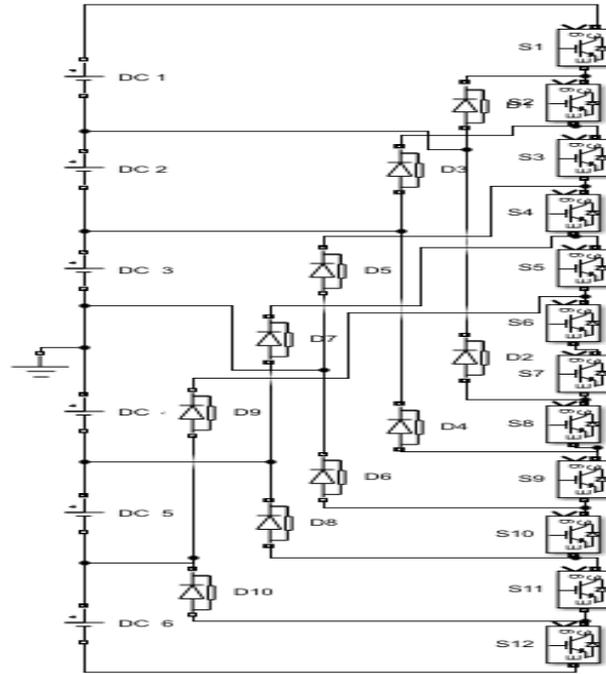


Figure IV. 12: Onduleur a sept niveaux avec topologie NPC

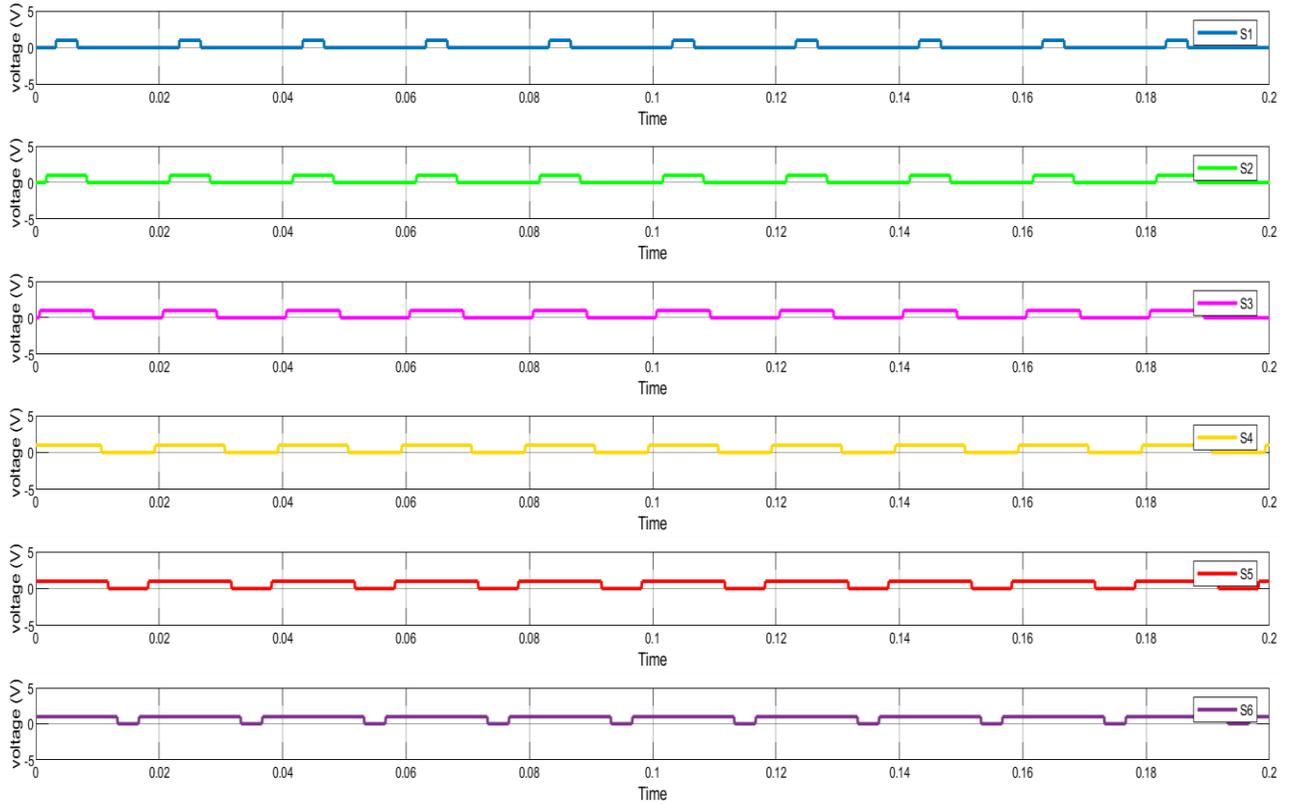


Figure IV. 13 : Signaux de commande.

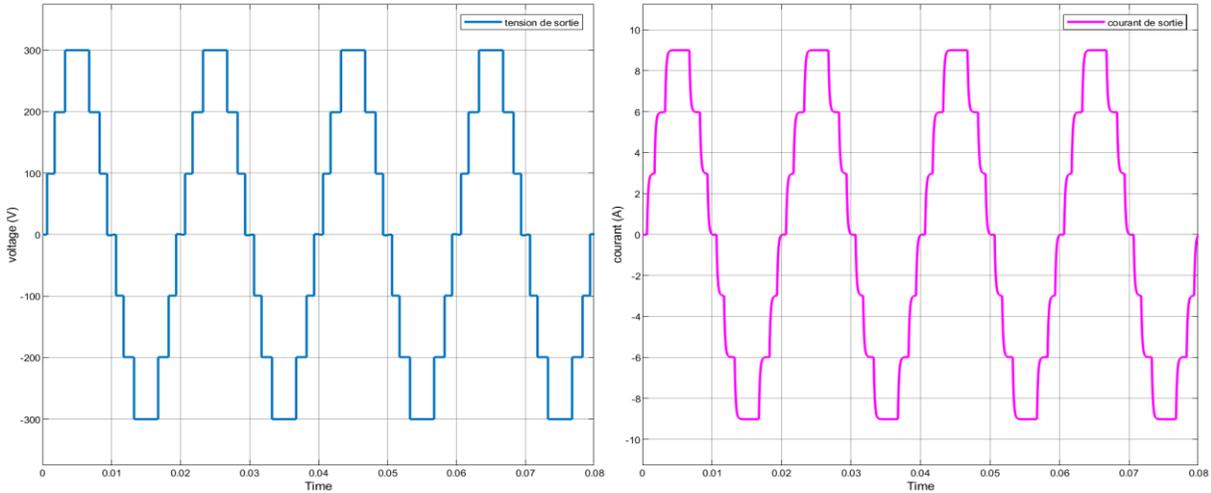


Figure IV. 14: Signaux de sortie

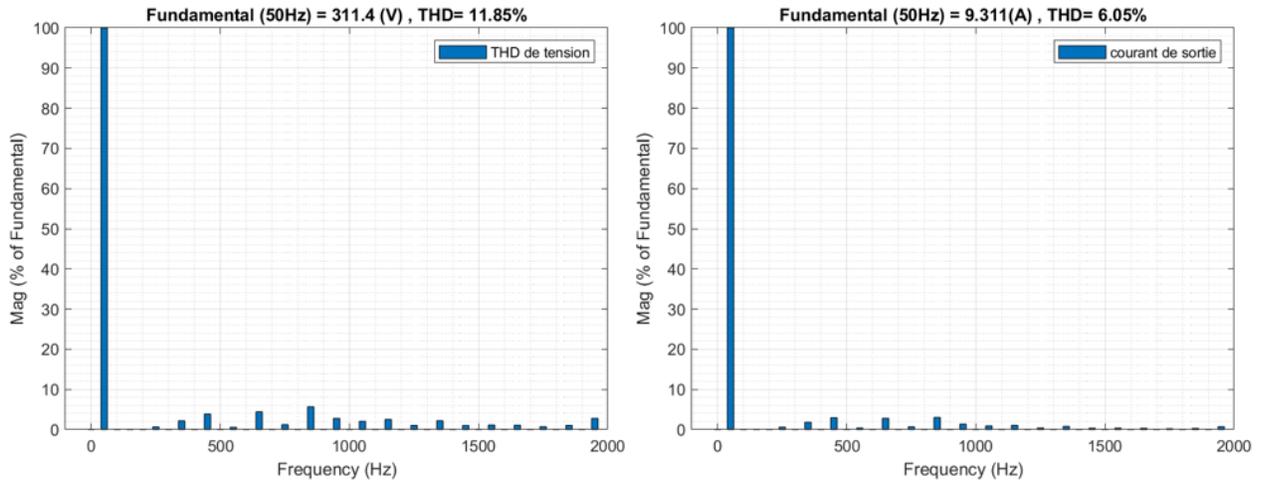


Figure IV. 15: Spectre de tension et de courant

• **Discussion des résultats :**

Tableau IV.1 : Comparaison des composants des topologie NPC et onduleur à six interrupteurs

	Transistor	Diode de bouclage	Condensateur	Transistor on max
NPC	12	5	6	6
Onduleur (six interrupteur)	6	0	0	3

Selon le scénario présenté, le taux d’harmoniques de tension (THD) de l’onduleur à six interrupteurs est de 11,82 %, tandis que le THD de courant est de 5,98 %. En comparaison, avec l’onduleur NPC, les valeurs de THD de courant et de tension sont presque égales, mais cela nécessite un grand nombre de composants. Par conséquent, il est possible d’obtenir le même THD avec un coût minimal grâce au nombre réduit de composants.

IV.2.3 Le troisième scénario :

Dans ce scénario on compare les résultats obtenus avec l’onduleur sept niveaux à six interrupteurs en utilisant deux techniques différentes SPWM (APOD) et SHE-PWM.

On a appliqué la technique de commande APOD avec une fréquence de porteuse égale à 550 Hz.

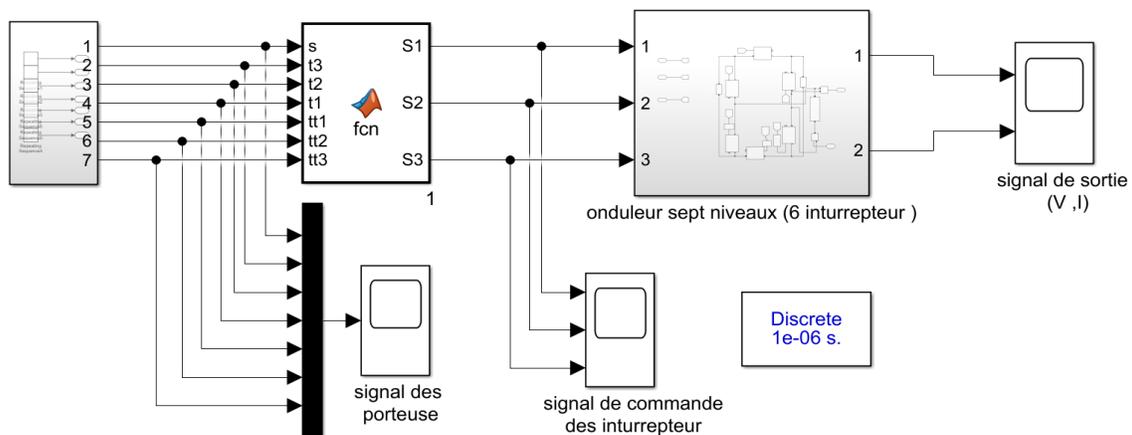


Figure IV. 16: Schéma de simulation de la commande SPWM.

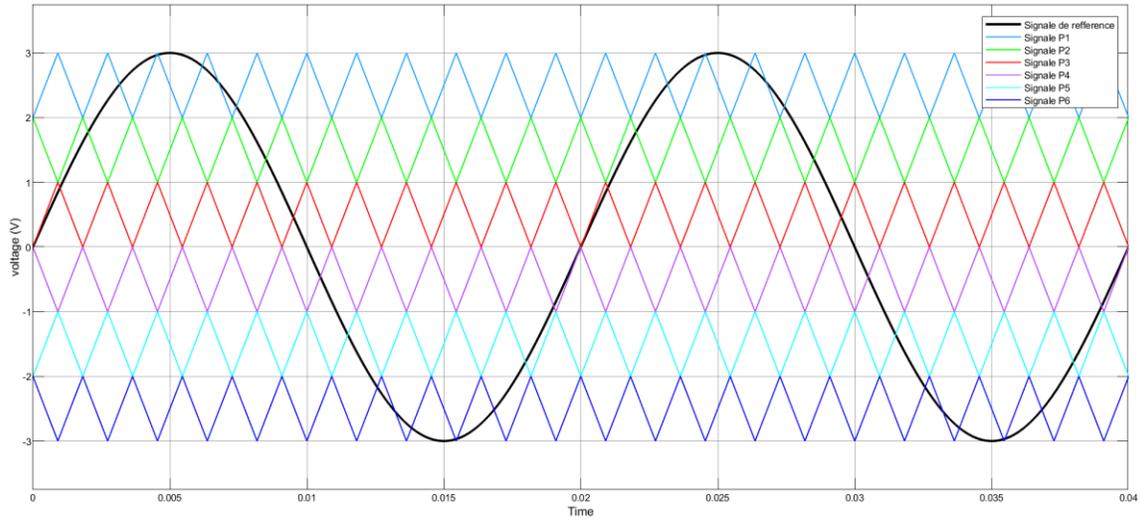


Figure IV. 17: Simulation de la commande APOD.

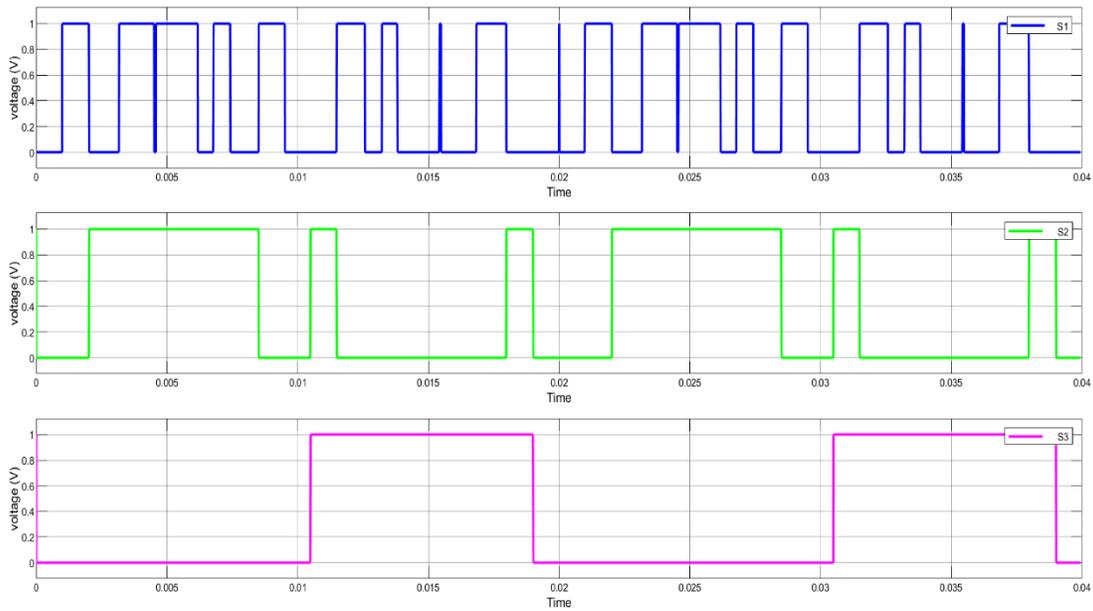


Figure IV. 18: Signaux de commande

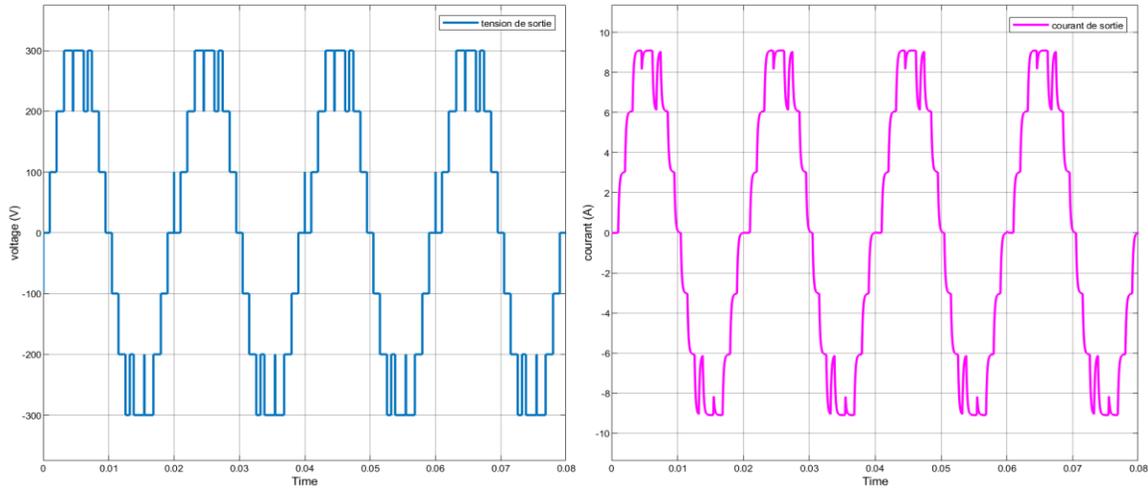


Figure IV. 19: Signaux de sortie.

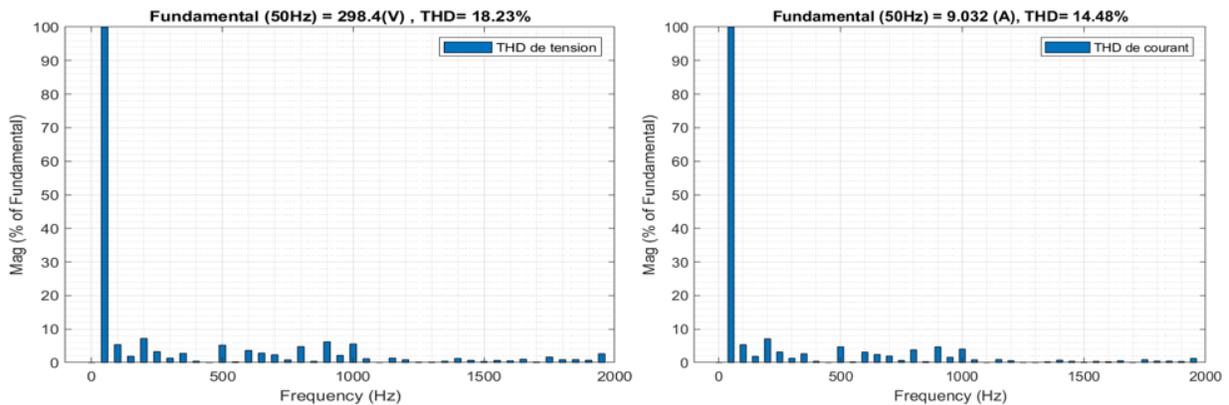


Figure IV. 20: Spectre de tension et de courant

Discussion des résultats :

En utilisant la technique SPWM, le taux d’harmoniques de tension (THD) est de 18,23%, tandis que le THD de courant est de 14,48%. Cependant, nous observons que le THD est nettement plus élevé par rapport aux résultats obtenus avec la technique SHE-PWM dans le premier scénario. En effet, la technique SHE-PWM se révèle supérieure à la technique SPWM en termes de qualité du signal de sortie.

IV.2.4 Le quatrième scénario :

Dans ce scénario on compare entre deux méthodes d’optimisation pour trouver les angles de commutation de la commande SHE-PWM, l’optimisation par Newton-Raphson et l’optimisation d’essaim de particule (PSO).

➤ Résultats obtenus par Newton-Raphson :

Le résultat de notre code sur le logiciel Matlab nous donne les angles de commutations en fonction de l'indice de modulation r .

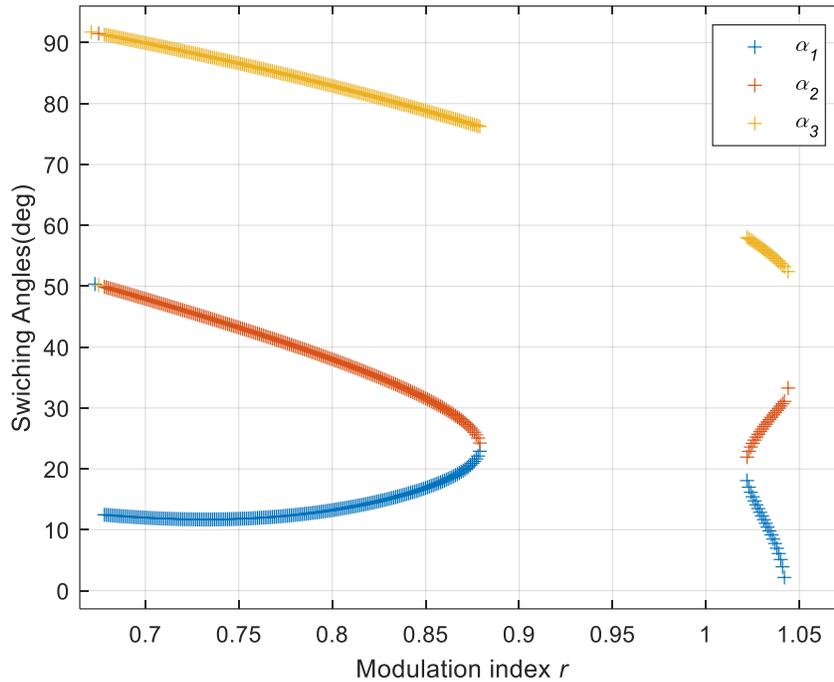


Figure IV. 21 : Angles de commutation en fonction de l'indice de modulation

Les angles sont : $\alpha_1=9.6041^\circ$, $\alpha_2=28.2237^\circ$, $\alpha_3=54.3713^\circ$ pour $r = 1.036$

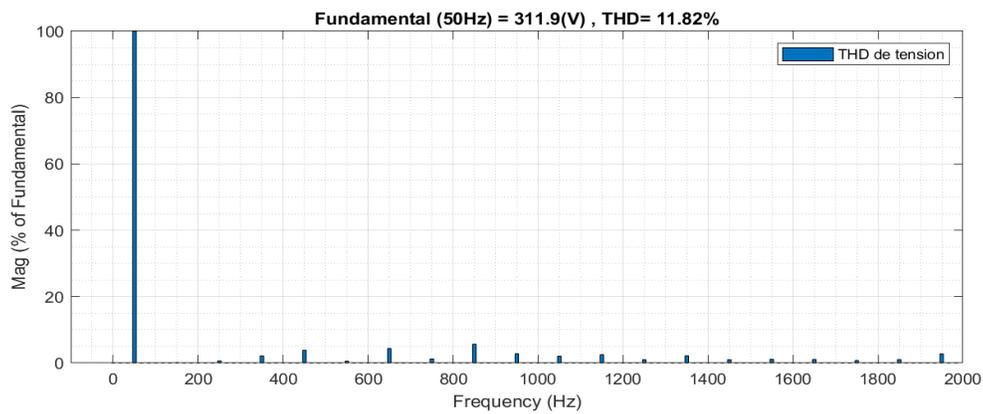


Figure IV. 22 : Spectre de tension

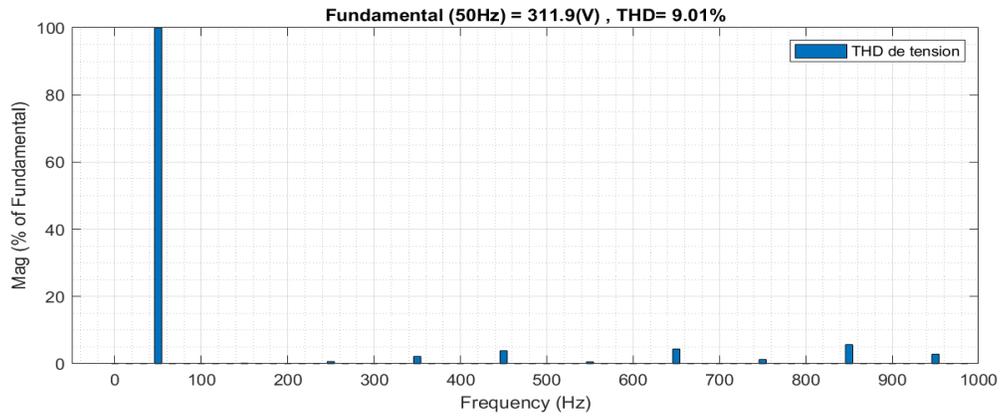


Figure IV. 23: Spectre de tension (à fréquence limite 1000 Hz)

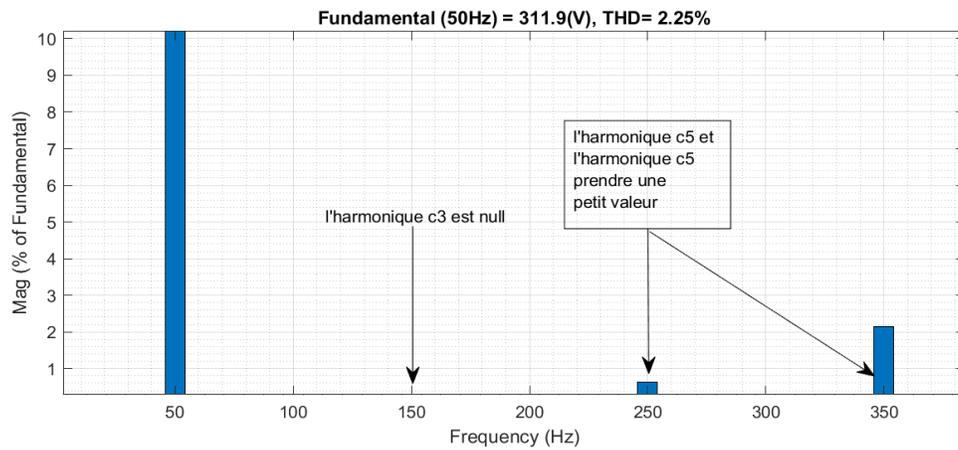


Figure IV. 24 : Spectre de tension (à fréquence limite 400 Hz)

$\alpha_1 = 10.1961^\circ$, $\alpha_2 = 27.3669^\circ$, $\alpha_3 = 54.8805^\circ$, pour $r = 1.04$

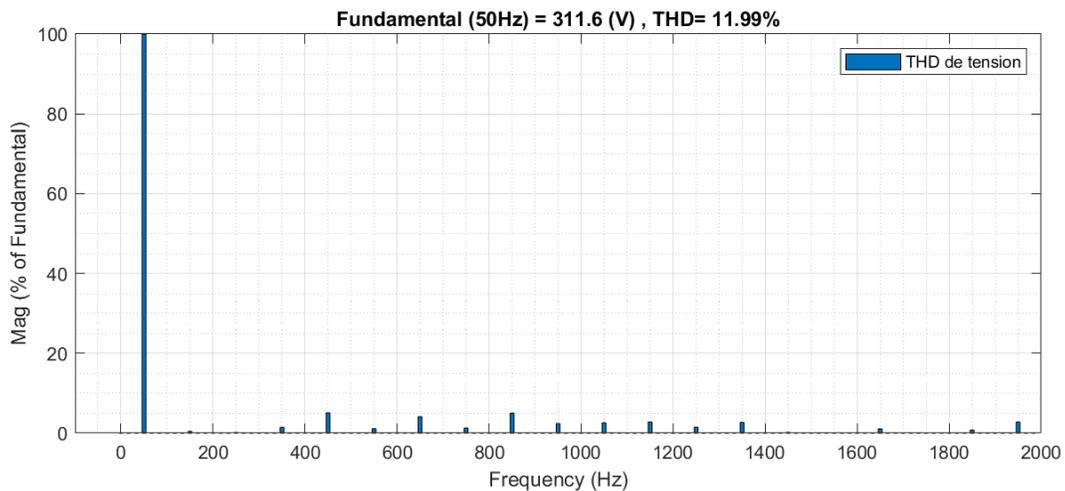


Figure IV. 25 : Spectre de tension

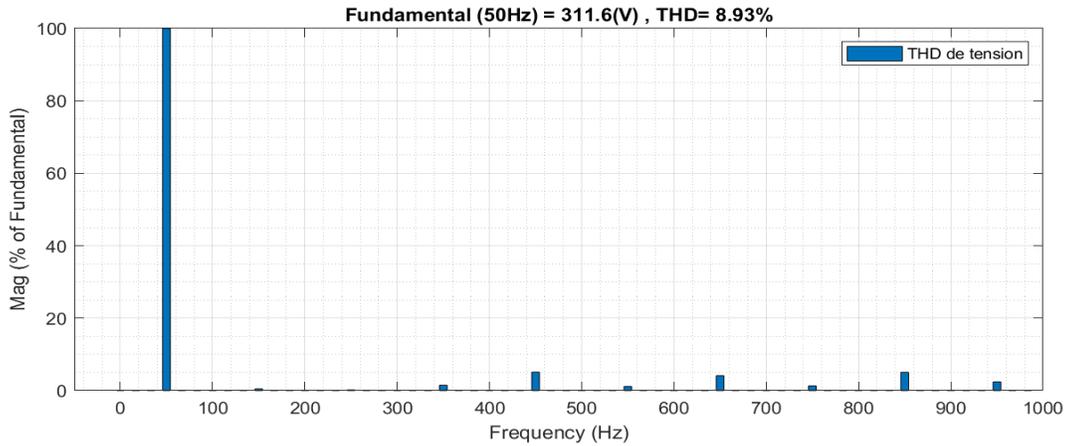


Figure IV. 26 : Spectre de tension (à fréquence limite 1000 Hz)

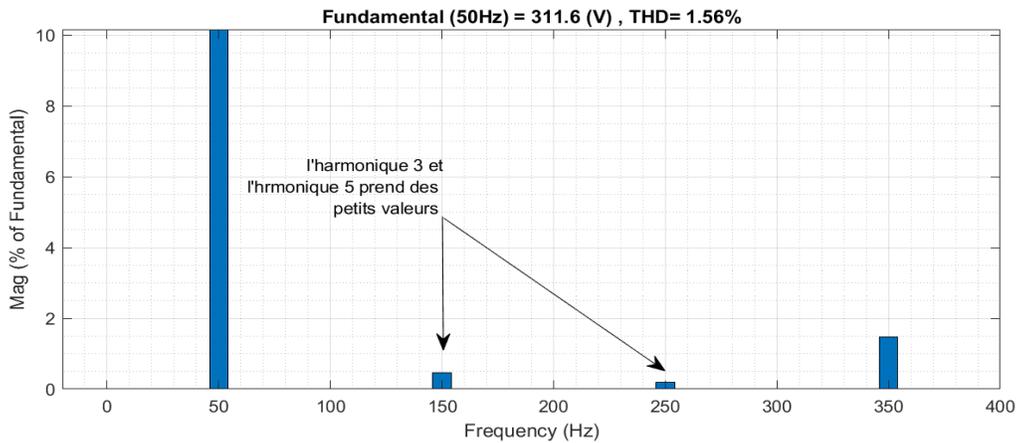


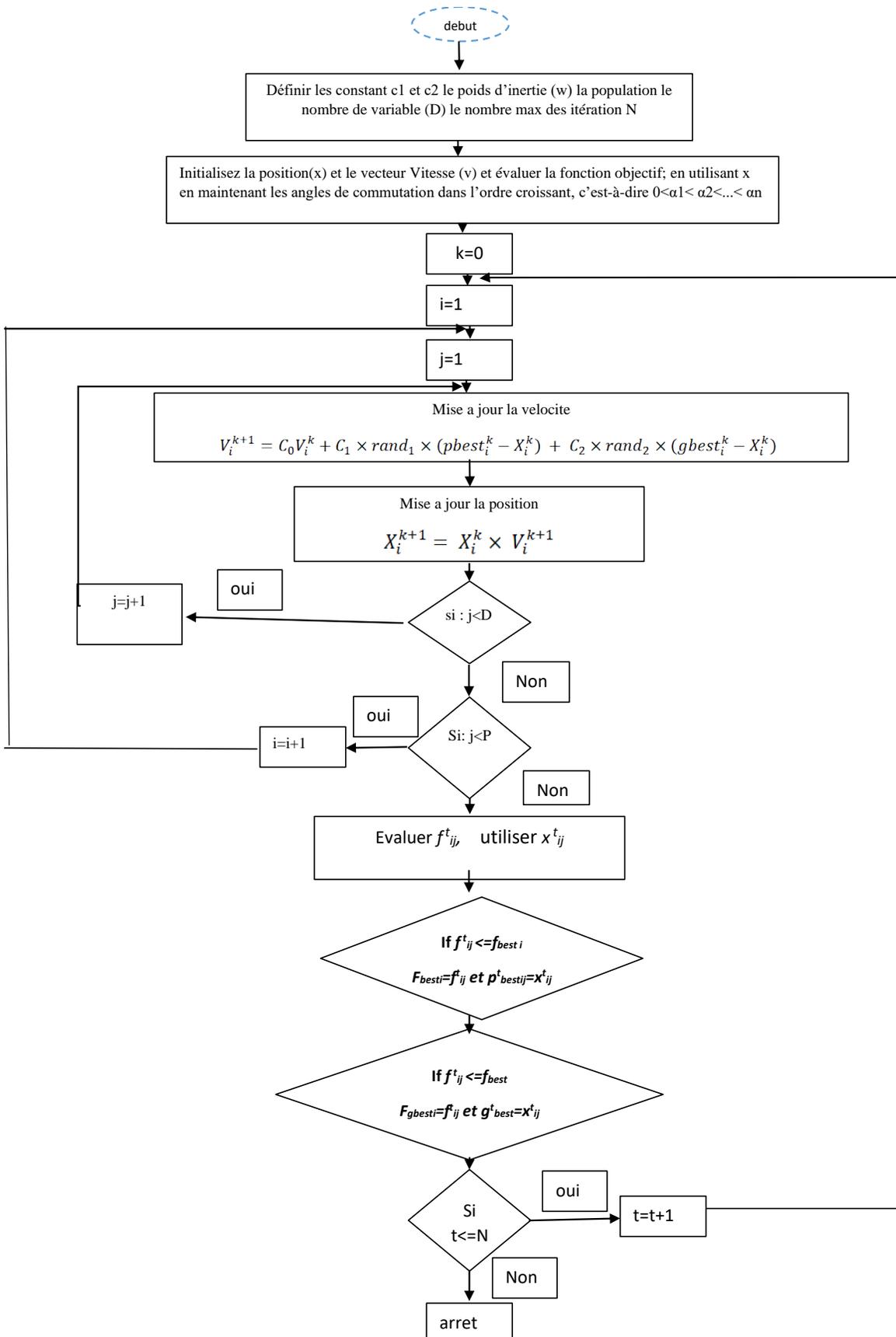
Figure IV. 27: Spectre de tension (à fréquence limite 400 Hz)

➤ Résultats obtenus par l'optimisation d'essaim de particule (PSO) :

On prend comme fonction objective la minimisation de l'équation de THD, on trouve que les meilleurs angles obtenus par l'optimisation d'essaim de particule (PSO) sont :

$$\alpha_1=11.6712^\circ, \alpha_2=26.9347^\circ, \alpha_3=56.0582^\circ \quad \text{Pour } r = 1.031$$

voici l'organigramme de calcul des angles par la méthode de PSO :



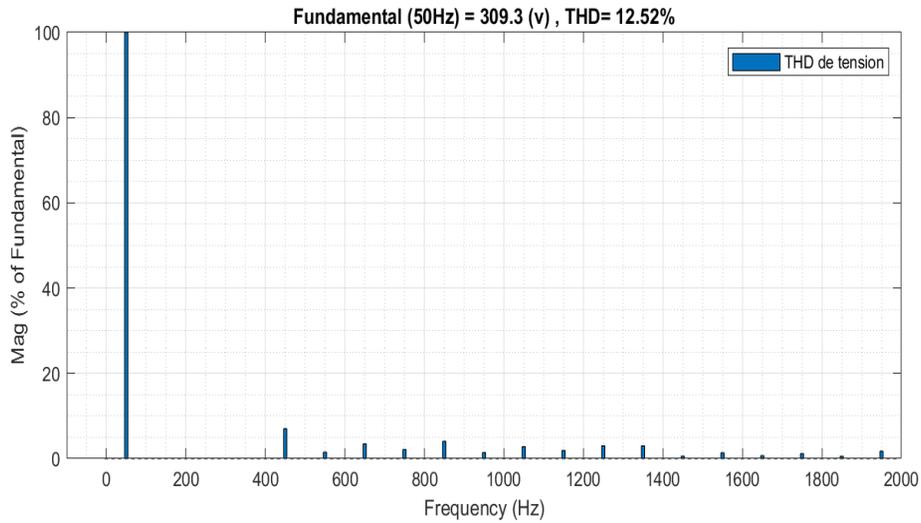


Figure IV. 28: Spectre de tension

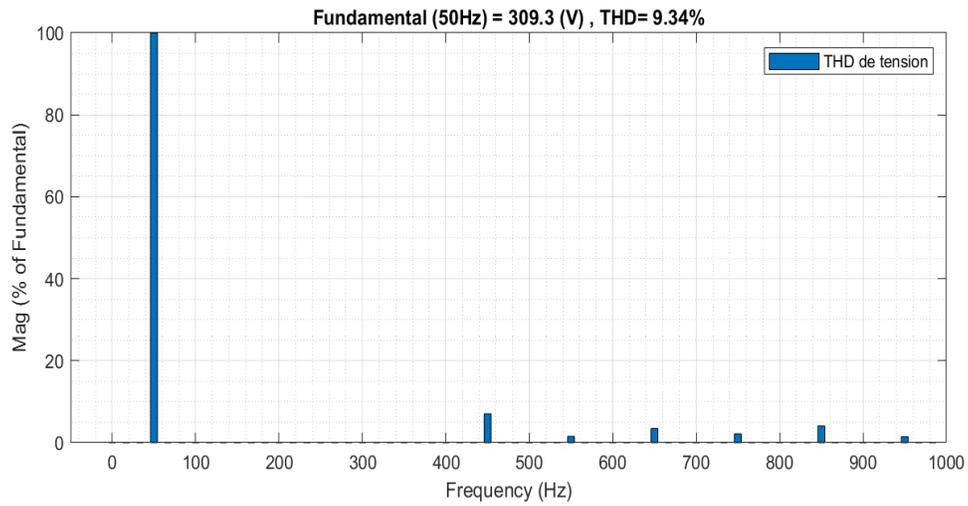


Figure IV. 29: Spectre de tension (à fréquence limite 1000 Hz)

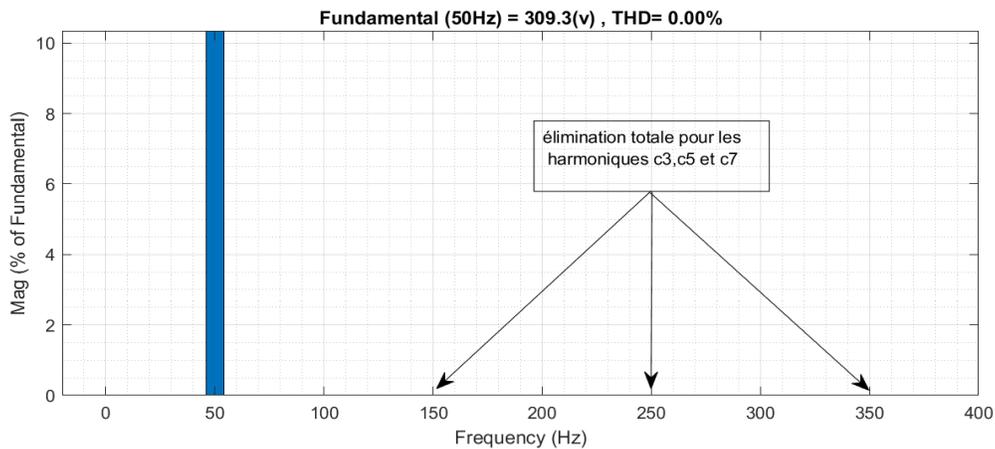


Figure IV. 30: Spectre de tension (à fréquence limite 400 Hz)

pour $r=1.04$ les nouvelle valeur des angles sont : $\alpha_1= 8.2653^\circ$, $\alpha_2= 28.9226^\circ$, $\alpha_3=54.7366^\circ$

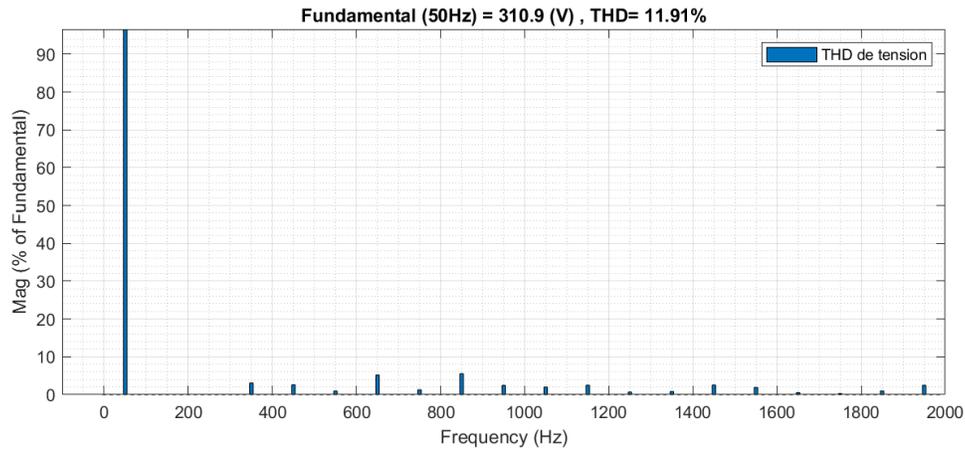


Figure IV. 31: Spectre de tension

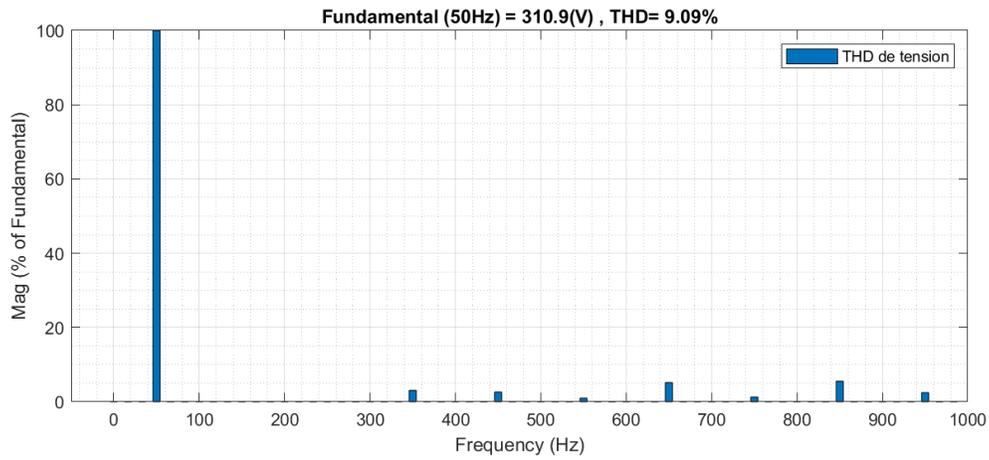


Figure IV. 32: Spectre de tension (à fréquence limite 1000 Hz)

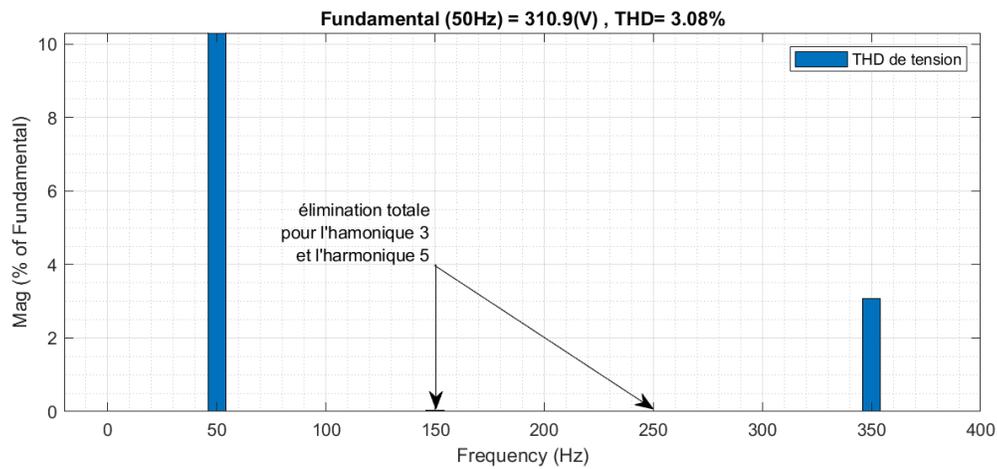


Figure IV. 33: Spectre de tension (à fréquence limite 400 Hz)

• **Discussion des résultats :**

En résumé tous les résultats de ce scenario dans ce tableau :

Tableau IV.2 : comparaison entre les valeurs de THD

Méthodes	Newton-Raphson		PSO	
r	1.036	1.04	1.031	1.04
THD %	11.82	11.99	12.52	11.91
THD% (1000 Hz)	9.01	8.93	9.34	9.09
THD% (400 Hz)	2.25	1.56	0.00	3.08
c3 %	0.17	0.46	0.005	0.003
c5 %	0.63	0.20	0.00	0,001

Avec :

c3 : Amplitude de 3^{ème} harmonique , c5 : Amplitude de 5^{ème} harmonique.

En comparant les taux de distorsion harmonique (THD) obtenus par la méthode de Newton-Raphson (11,82%) et la méthode de PSO (11,91%), nous constatons que les deux valeurs sont presque égales, avec une différence négligeable. Cependant, il est important de noter que l’optimisation par la méthode de PSO permet d’éliminer efficacement les premiers harmoniques ciblés, tandis que les valeurs de ces harmoniques restent faibles avec la méthode de Newton-Raphson. On constate que, la méthode de Newton-Raphson offre un bon THD, mais l’avantage de l’optimisation par essaim de particules réside dans sa capacité à éliminer les harmoniques ciblés avec une faible amplitude.

IV.2.5 le cinquième scenario :

Dans ce scenario en va simuler un onduleur à six interrupteurs avec la technique SHE-PWM plus un filtre passe-bas (LC).

Choix de filtre :

Pour avoir une atténuation dans les harmoniques du rang supérieur ou égale à 7 (car l’harmonique 3 et 5 sont déjà éliminés) on a choisi un filtre passe bas de telle sorte que sa fréquence de coupure est inférieure à celle de la fréquence d’harmonique 7 comme suit : $c= 200\mu F, L =7mH, f_c =250Hz$

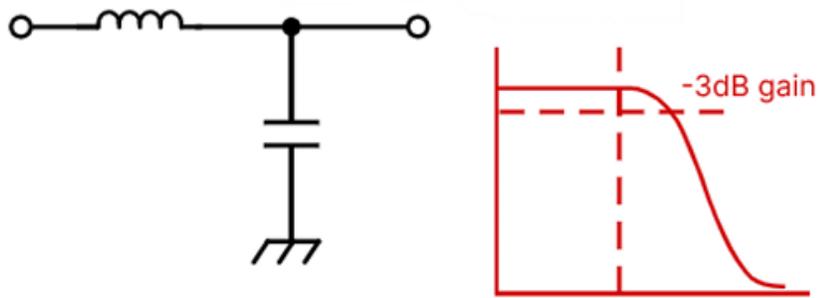


Figure IV. 34: Filtre passe-bas LC et son diagramme de Bode

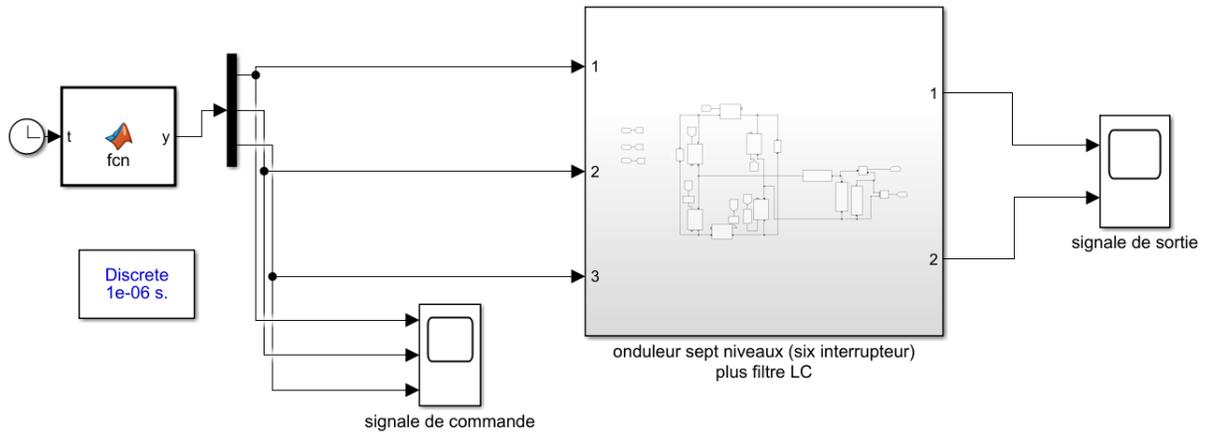


Figure IV. 35: Simulation d'un onduleur sept niveaux avec un filtre

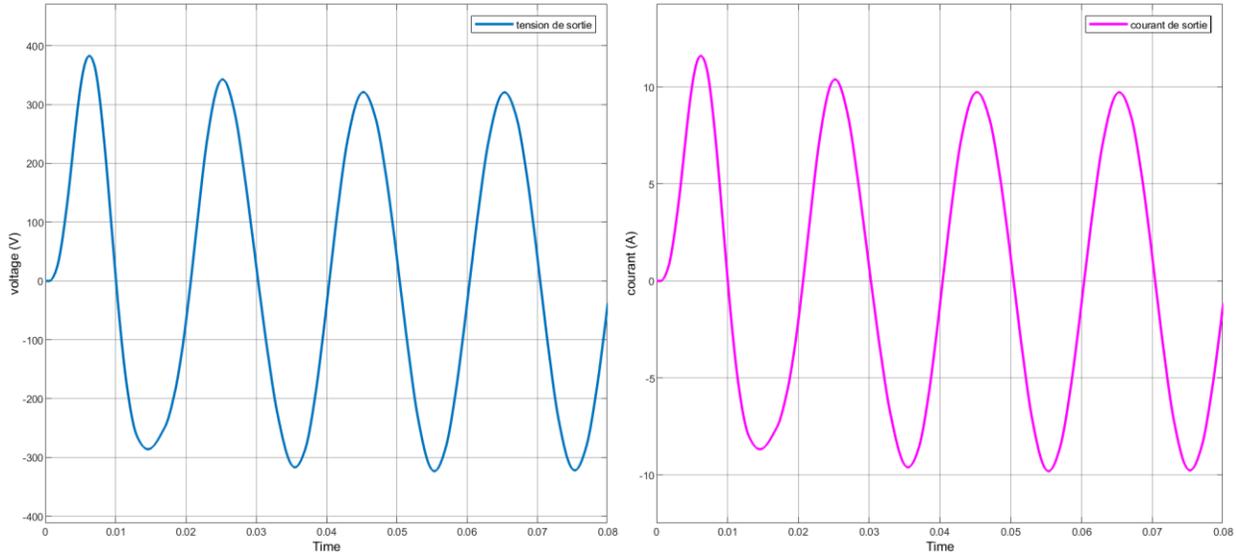


Figure IV. 36: Signaux de sortie

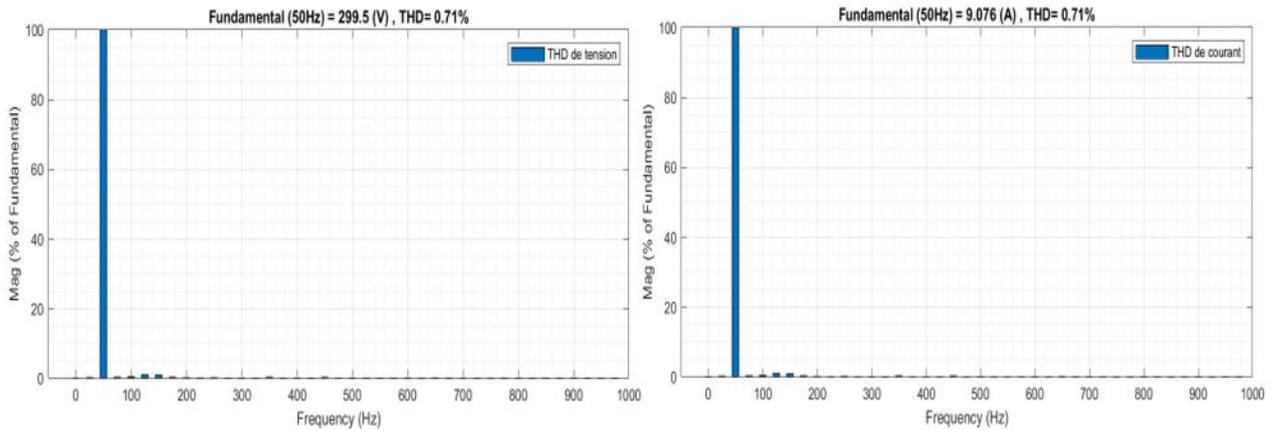


Figure IV. 37: Spectre des tension et courant

➤ **Discussion des résultats :**

Dans ce contexte, le choix de notre filtre LC minimise le taux de distorsion harmonique (THD) de la tension et du courant à 0,71%. Nous remarquons que les signaux de sortie sont sinusoïdaux, mais présentent un pic dans le régime transitoire en raison des effets inductifs et capacitifs. Pour atténuer ces perturbations pendant la transition, l'une des solutions est d'utiliser des circuits R-C (snubbers) peuvent être connectés en parallèle avec les éléments de puissance pour amortir les pics de tension. La résistance dissipe l'énergie tandis que la capacité limite le taux de changement de tension. En régime permanent, les signaux retrouvent leur forme sinusoïdale.

Conclusion :

En conclusion, après avoir étudié les différentes stratégies de commande (SPWM et SHE-PWM) pour générer une tension sinusoïdale précise dans un onduleur à 6 interrupteurs, nous avons constaté que la méthode d'optimisation par essaim de particules (PSO) offre un taux de distorsion harmonique (THD) supérieur à celui de la méthode de Newton-Raphson (NR). De plus, le THD obtenu avec PSO est conforme aux normes de qualité IEEE, car il permet d'éliminer efficacement les premiers harmoniques. Cependant, il est important de noter que le filtre joue également un rôle essentiel en éliminant les autres harmoniques indésirables. Ainsi, l'utilisation judicieuse de ces deux approches permet d'assurer à la fois une haute qualité de tension de sortie et une efficacité optimale de l'onduleur.

CONCLUSION

GÉNÉRALE

Conclusion générale

L'amélioration des performances d'un système alimenté par un onduleur est essentielle pour garantir un fonctionnement optimal. Voici les points clés à considérer :

- Le choix du nombre de niveaux dans l'onduleur joue un rôle crucial dans l'amélioration de la qualité du signal de sortie. Plus le nombre de niveaux est élevé, plus la forme d'onde se rapproche d'une sinusoïde idéale, ce qui réduit les harmoniques et améliore la qualité de l'énergie fournie au système.
- Les nouvelles topologies d'onduleurs multiniveaux simplifient l'étude, la maintenance et le montage des circuits. Elles réduisent également le nombre de composants nécessaires, ce qui se traduit par des coûts moindres.
- Le choix de la stratégie de commande est un facteur déterminant. Dans notre étude, nous avons constaté que la méthode de modulation sinusoïdale hybride (SHE) offre un bon résultat et un signal de sortie de meilleure qualité avec un taux de distorsion harmonique (THD) minimal.

La technique SHE permet de réduire les harmoniques et d'améliorer la qualité du signal de sortie. Il est donc essentiel de choisir judicieusement la méthode d'optimisation des angles pour améliorer le THD.

Pour obtenir un signal de sortie lisse et minimiser le THD, le choix du filtre est primordial. Différents types de filtres (LC, LCL, etc.) peuvent être utilisés en fonction des spécifications du système.

- En perspective, dans d'autres travaux, nous envisageons de réaliser cet onduleur en utilisant d'autres commandes et topologies, ainsi que des cartes de développement variées. Nous explorerons également l'utilisation de sources d'énergie renouvelables telles que l'éolienne, le photovoltaïque et les sources hybrides. En conclusion, l'optimisation par essaim de particules (PSO) offre un THD supérieur à celui de la méthode de Newton-Raphson (NR) pour générer une tension sinusoïdale précise dans un onduleur à 6 interrupteurs. Cependant, le choix du filtre reste essentiel pour éliminer les autres harmoniques indésirables et assurer une haute qualité de tension de sortie.

BIBLIOGRAPHIES

Bibliographies

- [1] M. L LOUAZENE « Etude Technico-économique d'un Système de Pompage Photovoltaïque sur le Site de Ouargla » Thèse de magistère, Université de Batna 2008.
- [2] PETIBON Stéphane, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », Thèse de Doctorat, Université Toulouse, 2009.
- [3] Tarek TAS, Mohammed SELLAM, « Analyse d'une installation de pompage photovoltaïque appliquée à un site agricole saharien », Mémoire fin d'étude master, Université de Bouira.
- [4] MEKLIICHE Said, « Etude et Simulation des paramètres électriques d'une cellule solaire photovoltaïque à base de Silicium » Mémoire fin d'étude master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, Année universitaire 2016/2017.
- [5] Internet google image.
- [6] Marouf Adil « Création d'une entreprise d'installation des panneaux solaires». Mémoire de fin d'études master Université Abou Bekr Belkaïd – Tlemcen. 2013-2014.
- [7] CHAARAOUI NESRINE & SENOUSSAOUI FELLA, « Etude et dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque », Mémoire fin d'étude master, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2021.
- [8] K.Touafek, "Etude d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique", mémoire de magister, école nationale polytechnique, Alger, 2005.
- [9] C.Cabal, « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque », Thèse du doctorat, Université TOULOUSE III – PAUL SABATIER, 15 Décembre 2008.
- [10] K.Tabet, «Etude, Modélisation et optimisation des systèmes Photovoltaïques », Mémoire de Magister ,2011.
- [11] L. Protin, S. Astier, « Convertisseur photovoltaïques», Techniques de l'Ingénieur, Ref : D 3360, (1997).
- [12] A. Moumami, N. Hamani, N. Moumami & Z. Mokhtari, «Estimation du rayonnement solaire Par deux approches semi empiriques dans le site de Biskra »,8ème séminaire international sur la physique énergétique, centre universitaire de Bechar, Algérie, novembre 2006.
- [13] Mustapha Belarbi. Contribution à l'étude d'un générateur solaire pour site autonome.2015. Thèse de Doctorat Es-Sciences26 Dhou Al-Qiada 1436, 10.09.2015

Bibliographies

- [14].ABBASSEN. Lyes, « Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque ». Mémoire de magister, l'Université de Tizi Ouzou, 2011.
- [15] Y. Riffonneau, «Gestion des flux énergétique dans un système photovoltaïque avec stockage connecte au réseau », Thèse de Doctorat de l'Université Joseph Fourier, 2009.
- [16] MEDDOUR. Youcef, YAZI. Zoubir, « Etude de raccordement d'un système photovoltaïques au réseau électrique ». Mémoire Master, l'université de Ouargla, 2015.
- [17] M. Slama Fateh Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique. Mémoire de Magister, Université FERHAT Abbas Sétif, le 01 /04/2011.
- [18] DEGLAO et SAYAH LEMBAREK T, « Etude par simulation d'un onduleur », Master Electrotechnique Industrielle, Centre Universitaire de KASDI MERBAH OUARGLA, 2020.
- [19] BERREZZEK Farid « Etude des Différentes Techniques de Commande des Onduleurs à MLI Associés à une Machine Asynchrone » Mémoire de MAGISTER, Université Badji Mokhter. Annaba 2006.
- [20] M. Alali, « Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension - Automatisation des systèmes de puissance électriques », Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur – Strasbourg I, Discipline : Génie électrique, Septembre 2002.
- [21] MOHDEB A ET MEZIANI A, « Etude comparative entre les performances d'un onduleur de tension à deux niveaux et multiniveaux» MASTER en ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2021.
- [22] S. Guy, B. Robert, Labrique Francis, Les convertisseurs de l'électronique de puissance la conversion alternaif (volume 4). Edition tec&doc, 1995.
- [23] T. Wildi : Electrotechnique, 3eme édition, éditions de Boeck université (1999).
- [24] Abdelkader Boukaroura « Modélisation et Diagnostic d'un Onduleur Triphasé par l'Approche Bond Graph », mémoire de magister en électrotechnique. Université Ferhat Abbas de Sétif.2009.
- [25] Benattar Hanane et Abdellaoui Nadjia «Etude et Simulation d'un Onduleur Multi niveaux pour Système Photovoltaïque», mémoire de master en électrotechnique. UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES.2020.

Bibliographies

- [26] L. G. Franquelo, J. Rodriguez, J. I. Leon, S. Kouro, R. Portillo, M. A. Prats, "The age of multilevel converters arrives", IEEE industrial electronics magazine (2008), vol. 2, no 2.
- [27] Martin Aimé, « Evaluation et Optimisation de la Bande Passante des Convertisseurs Statiques (Application aux Nouvelles Structures Multicellulaires) », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2003.
- [28] Ookaf Ahmed." Etude comparative des onduleurs multi niveaux Cascade et NPC " Mémoire de Master. Université de M'sila, 2014.
- [29] A. Benaboud, «Convertisseur de fréquence indirect à rapport de tension fixe : Interface entre turbo-alternateurs à haut vitesse et réseau électrique», Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2007.
- [30] José Rodríguez, Steffen Bernet, Bin Wu, Jorge O Pontt, and Samir Kouro. Multilevel voltage-source-converter topologies for industrial medium-voltage drives. IEEE Transactions on industrial electronics, 54(6) :2930–2945, 2007.
- [31] Jose I. Leon Leopoldo G. Franquelo and Eugenio Dominguez. Recent advances in high-power industrial applications. In IEEE International Symposium on Industrial Electronics, pages 5–10. IEEE, 4-7 July 2010, Bari, Italy.
- [32] Kambiz Arab Tehrani, Conception, Synthèse et Application d'une Nouvelle Commande Robuste par PID Fractionnaire pour Les Onduleurs Multiniveaux, thèse de doctorat, Université de Lorraine,2010.
- [33] Troudi, R. « Étude, conception et structure de commande temps réel d'un onduleur multiniveau à partir d'une seule source DC ; applications énergies renouvelables et véhicules électriques », Doctoral dissertation, Université de Poitiers ; Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Tunis, 2021.
- [34] Alaaeldien Hassan, Xu yang, Wenjie Chen et Mohamed abou houran, "AState of the Art of the Multilevel Inverters with Reduced Count Components», School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University,2020, China.
- [35] Babaei, Ebrahim, Somayeh Alilu, and Sara Laali. "A new general topology for cascaded multilevel inverters with reduced number of components based on developed H-bridge." IEEE Transactions on industrial electronics 61.8 (2013): 3932-3939.

Bibliographies

- [36] « Commande d'un onduleur avec des approches neuromimétiques pour la compensation des Courants harmoniques dans les réseaux électriques », international conference on electrical engineering and its application (ICCEEA92008), Sidi bel-Abbas, Algeria 2008.
- [37] 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 à Trois-Rivières Comme Exigence Pour l'obtention du Diplôme de maîtrise sciences appliquées en électronique industrielle, Université du Québec. 1991
- [38] José Rodríguez, Luis Morán, Pablo Correa, and Cesar Silva. A vector control technique for medium-voltage multilevel inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 49(4) :882–888, 2002.
- [39] Majhi, B., 2012. Analysis of single-phase SPWM inverter (Doctoral dissertation).
- [40] HS Patel and RG Hoft. Generalized techniques of harmonic eliminations and voltage control in thyristor inverters part i and part ii : harmonic elimination. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 1979.
- [41] K. Palanisamy N. Prabaharan. A comprehensive review on reduced switch multilevel inverter topologies, modulation techniques and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76 :1248–1282, 2017.
- [42] Fei, Wanmin, Xinbo Ruan, and Bin Wu. "A generalized formulation of quarter wave symmetry SHE-PWM problems for multilevel inverters." *IEEE Transactions on Power Electronics* 24.7 (2009): 1758-1766.
- [43] Jing, Tao, et al. "Formulations, Solving Algorithms, Existing Problems and Future Challenges of Pre-Programmed PWM Techniques for High-Power AFE Converters: A Comprehensive Review." *Energies* 15.5 (2022): 1696.
- [44] OUHALIMA.H ALALGA.Z. « Étude et réalisation de nouvelles structures des onduleurs multiniveaux », Mémoire master, Université de Tipaza, 2022