

**UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES**

**COMMANDE D'UN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE CONNECTÉ AU  
RÉSEAU ÉLECTRIQUE À L'AIDE D'UN CONVERTISSEUR CC-CA  
MULTINIVEAUX**

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ  
COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA  
MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE**

**PAR  
HAJJI SEIFEDDINE**

**NOVEMBRE 2025**

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire, de cette thèse ou de cet essai a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire, de sa thèse ou de son essai.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire, cette thèse ou cet essai. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire, de cette thèse et de son essai requiert son autorisation.

**UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES**  
**MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE (AVEC MÉMOIRE)**

**Direction de recherche :**

---

Chériti Ahmed  
UQTR

Directeur de recherche

**Jury d'évaluation**

---

Chériti Ahmed  
UQTR

Directeur de recherche

---

Alben Cardenas  
UQTR

Évaluateur interne

---

Hazzab Abdeldjebbar  
CR2I

Évaluateur externe

## **REMERCIEMENTS**

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de mémoire, Ahmed Cheriti, professeur au Département de génie électrique et de génie informatique de l'Université du Québec à Trois-Rivières, pour son accompagnement rigoureux, sa grande disponibilité et la qualité de ses conseils, qui ont contribué de manière déterminante à l'aboutissement de ce travail.

J'adresse également mes sincères remerciements aux membres du jury, monsieur Hazzab Abeldjebbar et monsieur Alben Cardenas, pour avoir accepté d'évaluer ce mémoire et pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail.

Enfin, je tiens à exprimer toute ma reconnaissance aux membres de ma famille, en particulier à mes parents, pour leur soutien indéfectible et leurs encouragements constants tout au long de mon parcours académique.

Enfin, je tiens à exprimer toute ma reconnaissance aux membres de ma famille, en particulier à mes parents, pour leur soutien indéfectible et leurs encouragements constants tout au long de mon parcours académique.

## RÉSUMÉ

La croissance soutenue du secteur des énergies renouvelables, notamment dans le domaine photovoltaïque, a entraîné une demande accrue en technologies de conversion d'énergie efficaces, en particulier pour les applications raccordées au réseau. Dans ce contexte, les chercheurs en électronique de puissance se sont attachés à analyser et à optimiser les différentes topologies d'onduleurs afin d'améliorer la performance et la fiabilité des systèmes photovoltaïques.

On peut dire que l'onduleur est le composant le plus nécessaire dans un système photovoltaïque que ce soit qui alimente des charges en courant alternatif ou connecté à un réseau électrique. Le rôle de ce convertisseur est de convertir le courant continu de la sortie du générateur photovoltaïque en courant alternatif soit pour alimenter les charges ou connecté au réseau électrique.

Dans le domaine de l'électronique de puissance, les onduleurs multiniveaux se classent généralement en trois grandes topologies. La première est celle des structures à ponts en H cascades (CHB – Cascade H-Bridge), caractérisées par leur modularité et leur simplicité de commande.

La seconde correspond aux topologies à condensateurs flottants (FC – Flying Capacitors), qui se distinguent par leur capacité à équilibrer naturellement les tensions intermédiaires. Enfin, la troisième catégorie regroupe les structures à diodes de bouclage (NPC – Neutral Point Clamped), reconnues pour leur robustesse et leur large utilisation dans les applications à moyenne tension. Dans le cadre du présent travail, une étude comparative

de ces trois topologies d'onduleurs multiniveaux sera menée en vue de leur intégration dans un système photovoltaïque raccordé à un réseau de moyenne tension.

Un système photovoltaïque connecté au réseau électrique est constitué d'un module solaire, d'un convertisseur CC-CC (c'est un hacheur élévateur), d'un convertisseur CC-CA (c'est un onduleur à multiniveaux), un filtre et le réseau électrique.

Le module solaire, le convertisseur CC-CC (hacheur élévateur), et le convertisseur CC-CA sont modélisés et simulés sur MATLAB/Simulink.

À la fin on a fait une analyse comparative des résultats de simulation en s'appuyant sur les performances obtenues dans nos résultats de simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique commandé par des onduleurs à trois et cinq niveaux, dont le but de savoir la meilleure topologie utilisée

## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS .....	i
RÉSUMÉ .....	ii
TABLE DES MATIÈRES .....	iv
LISTE DES TABLEAUX.....	iv
LISTE DES FIGURES.....	x
LISTE D'ABRÉVIATIONS .....	xiv
CHAPITRE 1 – INTRODUCTION .....	1
1.1 – Problématique .....	1
1.2 – Revue de littérature .....	2
1.3 – Objectif du mémoire .....	5
1.4 – Méthode.....	6
1.5 – Organisation du mémoire.....	7
CHAPITRE 2 – LA PRODUCTION D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE PAR LES SYSTÈMES PV .....	9
2.1 – Introduction .....	9
2.2 – Avantage et inconvénients de l'énergie photovoltaïque .....	9
2.3 – Cellule photovoltaïque .....	10
2.4 – Production d'électricité .....	11
2.5 – Générateur photovoltaïque .....	12
2.6 – Paramétrages d'un module PV.....	12

2.6.1 – Impact de l'éclairage sur les caractéristiques du courant et de la puissance en fonction de la tension (I-V et P-V) .....	14
2.6.2 – Impact de la température sur les caractéristiques du courant et de la puissance en fonction de la tension (I-V et P-V) .....	16
2.7 – Conclusion.....	18
CHAPITRE 3 – SYSTÈMES PV CONNECTÉS AU RÉSEAU .....	19
3.1 – Introduction .....	19
3.2 – Classification des systèmes photovoltaïques .....	19
3.2.1 – Système photovoltaïque autonome .....	19
3.2.2 – Système photovoltaïque hybride .....	20
3.2.3 – Système photovoltaïque connecté au réseau électrique.....	22
3.3 – Architectures du système PV connecté au réseau électrique .....	23
3.3.1 – Topologie d'onduleur central (Centralized inverter).....	24
3.3.2 – Topologie d'onduleur à branches (String inverter) .....	24
3.3.3 – Topologie d'onduleur Multi-branches (Multi-String inverter).....	25
3.3.4 – Topologie d'onduleur modulaire (Module inverter).....	26
3.4 – Avantages et inconvénients des systèmes connectés au réseau .....	26
3.4.1 – Avantages .....	26
3.4.2 – Inconvénients.....	27
3.5 – Conclusion.....	27
CHAPITRE 4 – HACHEUR DE PUISSANCE POUR LES SYSTÈMES PV .....	29
4.1 – Introduction .....	29
4.2 – Principe des convertisseurs CC-CC .....	30
4.3 – Types de convertisseurs CC-CC.....	30

4.4 – Choix du hacheur élévateur boost .....	31
4.5 – Principe de fonctionnement du convertisseur élévateur.....	31
4.6 – Importance du MPPT (Maximum Power Point Tracker).....	34
4.7 – Choix de la méthode de perturbation et observation.....	36
4.8 – Méthode de perturbation et observation.....	37
4.9 – Conclusion.....	39
<b>CHAPITRE 5 – ÉTUDE DES DIFFÉRENTES TOPOLOGIES D’ONDULEURS MULTINIVEAUX TRIPHASÉS .....</b>	<b>41</b>
5.1 – Introduction .....	41
5.2 – Différents types des onduleurs multiniveaux.....	42
5.2.1 – Onduleurs multiniveaux à diodes de bouclage (NPC).....	43
5.2.1.1 – Principe de fonctionnement d’un onduleur NPC à trois niveaux.....	45
5.2.1.2 – Principe de fonctionnement d’un onduleur NPC à cinq niveaux.....	46
5.2.2 – Onduleurs multiniveaux à condensateurs flottants FC .....	48
5.2.2.1 – Principe de fonctionnement d’un onduleur à trois niveaux .....	50
5.2.2.2 – Principe de fonctionnement d’un onduleur FC à cinq niveaux.....	51
5.2.3 – Onduleurs multiniveaux en pont H cascades.....	53
5.2.3.1 – Principe de fonctionnement d’un onduleur CHB à trois niveaux .....	56
5.2.3.2 – Principe de fonctionnement d’un onduleur CHB à cinq niveaux .....	56
5.3 – La modulation sinus-triangle (MLI sinusoïdale).....	57
5.4 – Simulation des structures des onduleurs multiniveaux triphasés.....	61
5.4.1 – Simulation d’un onduleur triphasé NPC trois niveaux.....	62
5.4.2 – Simulation d’un onduleur triphasé FC trois niveaux.....	67
5.4.3 – Simulation d’un onduleur triphasé CHB3 .....	68

5.4.4 – Simulation d’un onduleur triphasé NPC5.....	69
5.4.5 – Simulation d’un onduleur triphasé FC5.....	74
5.4.6 – Simulation d’un onduleur triphasé CHB5 .....	76
5.5 – Comparaison des résultats obtenu.....	77
5.5.1 – Résultat de simulation des topologies des onduleurs trois niveaux.....	77
5.5.2 – Résultats de simulation des topologies des onduleurs cinq niveaux .....	79
5.6 – Contribution réalisée .....	81
5.7 – Conclusion.....	82
CHAPITRE 6 – MODÉLISATION ET SIMULATION D’UN SYSTÈME PV CONNECTÉ AU RÉSEAU ÉLECTRIQUE .....	83
6.1 – Simulation d’un module photovoltaïque.....	83
6.2 – Raccordement de l’onduleur du système PV au réseau électrique .....	87
6.2.1 – Boucle à verrouillage de phase (PLL : Phase Locked Loop) .....	89
6.2.2 – Contrôle des courants envoyés au réseau électrique.....	90
6.2.3 – Contrôle de la tension du bus continu .....	92
6.3 – Simulation du système photovoltaïque connecté au réseau électrique .....	92
6.4 – Résultat de simulation d’un système PV connecté au réseau .....	99
6.4.1 – Système PV avec onduleur triphasé NPC à trois niveaux .....	99
6.4.2 – Système PV avec onduleur triphasé FC à trois niveaux .....	103
6.4.3 – Système PV avec onduleur triphasé CHB à trois niveaux.....	104
6.4.4 – Système PV avec onduleur triphasé NPC cinq-niveaux.....	106
6.4.5 – Système PV avec onduleur triphasé FC à cinq niveaux .....	108
6.4.6 – Système PV avec onduleur triphasé CHB à cinq niveaux.....	109
6.5 – Interprétations des résultats obtenues et discussion .....	111

6.5.1 – Interprétation des résultats de simulation d’un système PV avec onduleur trois niveaux.....	112
6.5.2 – Comparaison entre les topologies d’onduleur trois niveaux .....	113
6.5.3 – Interprétation des résultats de simulation d’un système PV avec onduleur cinq niveaux.....	114
6.5.4 – Comparaison entre les topologies d’onduleur cinq niveaux.....	115
6.5.5 – Synthèse des performances globales .....	116
6.6 – Conclusion.....	117
CHAPITRE 7 – CONCLUSION GÉNÉRALE .....	119
Bibliographie.....	122

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 5.1 : Nombre des composants constituant l'onduleur multiniveaux NPC .....	44
Tableau 5.2 : Nombre des composants constituant l'onduleur multiniveaux FC.....	49
Tableau 5.3 : Nombre des composants constituant l'onduleur multiniveaux CHB.....	54
Tableau 5.4 : Comparaison entre les trois topologies d'onduleurs 3 niveaux .....	77
Tableau 5.5 : Comparaison entre les trois topologies d'onduleurs 5 niveaux .....	79
Tableau 6.1 : Caractéristiques du module APOS Energy AP 215M.....	83
Tableau 6.2 : Tableau récapitulatif des résultats de l'analyse spectrale des différentes grandeurs mesurées .....	111
Tableau 6.3 : Tableau des valeurs des puissances active et réactive injectées au réseau .....	111
Tableau 6.4 : Mesure du courant et la tension aux bornes de l'IGBT .....	112

## LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Caractéristique du courant en fonction de la tension (I-V) [17].....	14
Figure 2.2 : Caractéristique de la puissance en fonction de la tension (P-V) [17].....	15
Figure 2.3 : Caractéristique du courant en fonction de la tension (I-V) à $E=1200W/m^2$ [17] .....	16
Figure 2.4 : Caractéristique de la puissance en fonction de la tension (P-V) à $E=1200W/m^2$ [17] .....	17
Figure 3.1 : Exemple de structure d'un système PV autonome [19] .....	20
Figure 3.2 : Exemple de structure d'un système PV hybride [20].....	21
Figure 3.3 : Exemple de structure d'un système PV connecté au réseau électrique [21]	23
Figure 4.1 : Circuit électrique d'un hacheur Boost [34] .....	32
Figure 4.2 : Principe de la méthode perturbation et observation [44].....	38
Figure 5.1 : Circuit d'un seul bras d'un onduleur trois niveaux NPC [37] .....	44
Figure 5.2 : Circuit d'un seul bras d'un onduleur cinq niveaux NPC [37] .....	45
Figure 5.3 : Circuit d'un seul bras d'onduleur trois niveaux FC [37] .....	49
Figure 5.4 : Circuit d'un seul bras d'onduleur cinq niveaux FC [37] .....	50
Figure 5.5 : Circuit d'un seul bras d'onduleur trois niveaux CHB [37] .....	55
Figure 5.6 : Circuit d'un seul bras d'onduleur cinq niveaux CHB [37].....	55
Figure 5.7 : Schéma de principe de la technique MLI sinusoïdale d'un Bras d'onduleur cinq niveaux [48].....	58
Figure 5.8 : Circuit modélisé sur MAT LAB/Simulink d'un onduleur NPC3.....	63

Figure 5.9 : Signaux des tensions de sortie $V_{ao}$ et $V_{ab}$ de l'onduleur NPC3 .....	64
Figure 5.10 : Spectre harmonique de la tension $V_{ab}$ à la sortie de l'onduleur NPC3 .....	66
Figure 5.11 : Spectre harmonique de la tension $V_{ao}$ à la sortie de l'onduleur NPC3 .....	66
Figure 5.12 : Circuit modélisé sur MATLAB/Simulink d'un onduleur FC3.....	68
Figure 5.13 : Circuit modélisé sur MATLAB/Simulink d'un onduleur CHB3 .....	69
Figure 5.14 : Circuit modélisé sur MATLAB/Simulink d'un onduleur NPC5.....	70
Figure 5.15 : Signaux des tensions de sortie $V_{ao}$ et $V_{ab}$ de l'onduleur NPC5 .....	71
Figure 5.16 : Spectre harmonique de la tension $V_{ab}$ de l'onduleur NPC5.....	72
Figure 5.17 : Spectre harmonique de la tension $V_{ao}$ de l'onduleur NPC5.....	73
Figure 5.18 : Circuit modélisé sur MATLAB/Simulink d'un onduleur FC5.....	75
Figure 5.19 : Circuit modélisé sur MATLAB/Simulink d'un onduleur CHB5 .....	76
Figure 6.1 : Circuit du module PV sur MATLAB/Simulink .....	84
Figure 6.2 : Forme d'onde $P(V)$ du module PV.....	86
Figure 6.3 : Forme d'onde $I(V)$ du module PV.....	86
Figure 6.4 : Schéma synoptique de la commande de la connexion au réseau [54].....	88
Figure 6.5 : Schéma de principe de la PLL [55] .....	90
Figure 6.6 : Principe de dispositif de commande des courants dans le repère de Park [54] .....	91
Figure 6.7 : Circuit du système PV connecté au réseau électrique .....	93
Figure 6.8 : Circuit du hacheur Boost modélisé sur MATLAB/Simulink .....	94
Figure 6.9 : Circuit sur MATLAB/Simulink de la commande MPPT type P O.....	95

Figure 6.10 : Forme d'onde des signaux $V_{abc}$ et $V_{ab}$ de l'onduleur NPC 3-niveaux connecté au réseau.....	100
Figure 6.11 : Forme d'onde du courant de l'onduleur NPC 3-niveaux connecté au réseau .....	100
Figure 6.12 : Forme d'onde de la puissance active $P$ injectée au réseau par l'onduleur NPC3.....	101
Figure 6.13 : Forme d'onde de la puissance réactive $Q$ injectée au réseau par l'onduleur NPC3.....	101
Figure 6.14 : Spectre harmonique de la tension $V_{ab}$ de l'onduleur NPC3 connecté au réseau électrique.....	102
Figure 6.15 : Spectre harmonique de la tension $V_{ao}$ de l'onduleur NPC3 connecté au réseau électrique.....	103
Figure 6.16 : Spectre harmonique de la tension $V_{ab}$ de l'onduleur FC3 connecté au réseau électrique.....	104
Figure 6.17 : Spectre harmonique de la tension $V_{ao}$ de l'onduleur FC3 connecté au réseau électrique.....	104
Figure 6.18 : Spectre harmonique de la tension $V_{ab}$ de l'onduleur CHB3 connecté au réseau électrique.....	105
Figure 6.19 : Spectre harmonique de la tension $V_{ao}$ de l'onduleur CHB3 connecté au réseau électrique.....	105
Figure 6.20 : Forme d'onde des signaux $V_{abc}$ et $V_{ab}$ de l'onduleur NPC 5-niveaux connecté au réseau.....	106

Figure 6.21 : Forme d'onde du courant $I_a$ de l'onduleur NPC 5-niveaux connecté au réseau.....	107
Figure 6.22 : Spectre harmonique de la tension $V_{ab}$ de l'onduleur NPC5 connecté au réseau électrique.....	107
Figure 6.23 : Spectre harmonique de la tension $V_{ao}$ de l'onduleur NPC5 connecté au réseau électrique.....	108
Figure 6.24 : Spectre harmonique de la tension $V_{ab}$ de l'onduleur FC5 connecté au réseau électrique.....	109
Figure 6.25 : Spectre harmonique de la tension $V_{ao}$ de l'onduleur FC5 connecté au réseau électrique.....	109
Figure 6.26 : Spectre harmonique de la tension $V_{ab}$ de l'onduleur CHB5 connecté au réseau électrique.....	110
Figure 6.27 : Spectre harmonique de la tension $V_{ao}$ de l'onduleur CHB5 connecté au réseau électrique.....	110

## LISTE D'ABRÉVIATIONS

$A_m$	Amplitude de la modulante
$A_p$	Amplitude de la porteuse
DOAP	Disposition Opposition Alternance de Phase
CA	Courant alternatif
CC	Courant continu
CHB	Onduleur en pont H cascadi (Cascade H-Bridge)
CST	Conditions Standards de Test
FC	Onduleur à condensateur flottant (Flying Capacitors)
GPV	Générateur photovoltaïque
$I_{cmax}$	La contrainte de courant semi-conducteur
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
MPPT	Suiveur de point de puissance maximale
N	Négatif
NPC	Onduleur à diodes de bouclage (Neutral Point Clamped)
P	Positif
DP	Disposition de Phase
PI	Intégral Proportionnel
PLL	Boucle à verrouillage de phase (Phase Locked Loop)
PPM	Point de Puissance Maximale
POD	Disposition Opposition de Phase

PV	Photovoltaïque
PWM	Modulation de largeur d'impulsion (Pulse Width Modulation)
P O	Méthode de Perturbation et Observation
P-N	Positif-Négatif
TDH	Taux de Distorsion Harmonique
Ts	Période de commutation
Vcemax	La contrainte de tension semi-conducteur, la contrainte de courant Icg

## CHAPITRE 1 – INTRODUCTION

### 1.1 – Problématique

L'intégration croissante de l'énergie photovoltaïque dans les réseaux électriques modernes impose des exigences élevées en matière de qualité de tension, de fiabilité et de compatibilité réseau. Les onduleurs conventionnels à deux niveaux, bien qu'efficaces pour des puissances modestes, génèrent des harmoniques importants, entraînant un taux de distorsion harmonique élevé, des pertes de commutation accrues et des contraintes électriques notables sur les semi-conducteurs. Ces phénomènes réduisent la durée de vie des composants, altèrent la stabilité du réseau et diminuent le rendement global du système [1].

Les convertisseurs multiniveaux, notamment les topologies à diodes de bouclage NPC (Neutral-Point-Clamped), à condensateurs flottants FC (Flying-Capacitor) et à ponts en H cascades CHB (Cascaded H-Bridge), ont été proposés pour pallier ces limites grâce à leur capacité à synthétiser des tensions de sortie quasi sinusoïdales, réduisant ainsi la contrainte de tension par interrupteur et améliorant le rendement énergétique [2]. Toutefois, chaque topologie présente des caractéristiques distinctes : le NPC offre une bonne répartition des tensions, mais peut souffrir de déséquilibres du point neutre ; le FC procure une flexibilité de commande au prix d'un déséquilibre potentiel de ses condensateurs flottants ; tandis que le CHB se distingue par sa modularité, mais nécessite plusieurs sources continues isolées [3].

Ces différences rendent le choix de la topologie optimale non trivial pour une application photovoltaïque connectée au réseau. De plus, la performance effective du système PV connecté au réseau électrique dépend non seulement de la topologie de l'onduleur, mais également de la stratégie de commande utilisée, des paramètres du filtre LC et de l'interaction avec le réseau électrique. Dans ce contexte, il est essentiel de mener une analyse quantitative et comparative reposant sur des critères objectifs tels que le THD, la stabilité du point neutre, les contraintes appliquées aux semi-conducteurs et le rendement global du système [4].

Ainsi, la problématique de ce mémoire s'articule autour de la conception, de la modélisation et de la simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau basé sur des onduleurs multiniveaux, afin de comparer les topologies NPC, FC et CHB sous des conditions identiques et d'évaluer leur impact sur la qualité de l'énergie injectée et la fiabilité des composants électroniques de puissance.

## **1.2 – Revue de littérature**

Au cours des deux dernières décennies, la recherche sur les systèmes photovoltaïques connectés au réseau a connu une évolution considérable, stimulée par la nécessité de produire une énergie durable et de haute qualité. La performance d'un système photovoltaïque (PV) repose non seulement sur la qualité du générateur solaire, mais aussi sur la conception, la commande et l'efficacité énergétique des convertisseurs de puissance assurant la conversion et l'injection d'énergie vers le réseau électrique. Plusieurs travaux récents soulignent l'importance de l'optimisation conjointe du générateur PV, du

convertisseur continu-continu et de l'onduleur, afin d'améliorer le rendement global et de réduire les pertes électriques [1], [5].

Dans la littérature actuelle, les convertisseurs de type Boost associés à des algorithmes de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) constituent la solution la plus répandue pour l'adaptation de la tension entre le champ photovoltaïque et l'onduleur. Parmi ces algorithmes, la méthode Perturbation et Observe (P O) demeure la plus utilisée pour sa simplicité de mise en œuvre, tandis que d'autres approches plus avancées, comme la conductance Incrémentale (INC) ou l'optimisation par essaim de particules (PSO), offrent une meilleure rapidité de convergence et une efficacité accrue en cas de variations d'irradiation [6], [7]. Par ailleurs, l'amélioration du rendement des convertisseurs Boost par la réduction des pertes de commutation et la conception optimisée des composants magnétiques est devenue un axe majeur de recherche pour accroître la stabilité et la fiabilité des systèmes PV [4].

L'intégration des convertisseurs multiniveaux dans les systèmes photovoltaïques connectés au réseau représente aujourd'hui une étape clé vers une meilleure qualité de l'énergie injectée. Les convertisseurs multiniveaux (MLI) permettent de générer des tensions de sortie quasi sinusoïdales avec un faible taux de distorsion harmonique (THD), tout en réduisant les contraintes électriques sur les semi-conducteurs et en augmentant le rendement énergétique. Parmi les topologies les plus étudiées, on retrouve l'onduleur à diodes de bouclages, à condensateurs flottants et à ponts en H cascades . Le NPC se distingue par sa robustesse et sa bonne répartition de tension entre les interrupteurs, bien qu'il soit sensible au déséquilibre du point neutre. Le FC offre une flexibilité de

commande appréciable, mais présente des risques de déséquilibre de la tension des condensateurs flottants. Quant à la topologie CHB, elle se démarque par sa modularité et sa facilité d'adaptation aux puissances élevées, mais son exigence de multiples sources continues isolées limite parfois son intégration directe dans les systèmes centralisés [8], [3].

Les travaux récents confirment que l'augmentation du nombre de niveaux permet de réduire le THD et d'améliorer la qualité de la tension de sortie, mais au prix d'une complexité de commande plus élevée et d'un nombre supérieur d'interrupteurs. De nouvelles approches de commande, telles que la modulation vectorielle *spatiale* (Space Vector PWM, SVPWM) et la modulation sélective d'harmoniques (Selective Harmonic Elimination PWM, SHE-PWM), ont été proposées pour optimiser la performance harmonique et énergétique des onduleurs multiniveaux [9], [10]. Benevieri et al. (2024) ont montré que les onduleurs CHB offrent un bon compromis entre rendement, modularité et qualité de tension [8], tandis que Mosepele et al. (2024) ont démontré que les topologies hybrides à nombre réduit d'interrupteurs peuvent atteindre un rendement supérieur à 97 % tout en simplifiant la commande [3]. Uwagboe et Saha (2025) ont, pour leur part, étudié les convertisseurs multiniveaux intégrés à des systèmes PV-batterie, soulignant la nécessité d'une commande coordonnée pour assurer la stabilité de la tension et la compatibilité réseau [4].

Malgré ces avancées, certaines limites persistent dans la littérature : le déséquilibre du point neutre dans les structures NPC, la variation de tension des condensateurs flottants dans les FC et la complexité de commande des CHB demeurent des défis ouverts. Ces

contraintes justifient la poursuite de travaux de recherche visant à améliorer la robustesse, la fiabilité et la qualité de l'énergie dans les systèmes PV connectés au réseau. C'est dans ce contexte que s'inscrit le présent mémoire, qui propose une modélisation et une analyse comparative détaillée des topologies NPC, FC et CHB afin d'identifier la configuration la plus performante selon des critères quantitatifs tels que le THD, la stabilité du point neutre et les contraintes électriques appliquées aux semi-conducteurs.

### **1.3 – Objectif du mémoire**

L'objectif principal de ce travail est de modéliser, simuler et analyser comparativement les performances de trois topologies d'onduleurs multiniveaux intégrées dans un système photovoltaïque connecté au réseau électrique. L'étude vise à évaluer l'influence de ces topologies sur la qualité de la tension de sortie, le taux de distorsion harmonique, les contraintes électriques appliquées aux interrupteurs de puissance ainsi que la stabilité du point neutre, dans le but d'identifier la structure la plus performante pour une conversion d'énergie efficace et conforme aux exigences des réseaux modernes.

Pour atteindre cet objectif général, plusieurs étapes ont été menées de manière méthodique. Dans un premier temps, un modèle complet d'un système photovoltaïque connecté au réseau a été développé sous MATLAB/Simulink, intégrant l'ensemble des composants nécessaires : générateur photovoltaïque, convertisseur CC-CC de type Boost muni d'un algorithme de commande MPPT (Perturbation et Observation), onduleur multiniveaux, filtre LC, charge RL et boucle PLL assurant la synchronisation avec le réseau.

Ensuite, les trois topologies d'onduleurs multiniveaux (NPC, FC et CHB) à trois et cinq niveaux ont été modélisées et simulées afin d'analyser les formes d'onde de tension, d'évaluer le taux de distorsion harmonique et de comparer leurs performances harmoniques et électriques. Cette analyse s'appuie sur des indicateurs quantitatifs tels que le taux de distorsion harmonique, la contrainte de tension  $V_{ce}$ , la contrainte de courant  $I_{cg}$  et la stabilité du point neutre. Enfin, le travail vise à identifier la topologie optimale en termes de qualité de tension, rendement énergétique et robustesse, tout en proposant des perspectives d'amélioration pour les stratégies de commande avancées telles que la PWM vectorielle spatiale (SVPWM) et la PWM sélective harmonique (SHE-PWM).

#### **1.4 – Méthodologie**

Pour initier ce projet, nous avons réalisé une recherche bibliographique approfondie sur les sources d'énergies renouvelables et les systèmes photovoltaïques, ce qui nous a permis d'identifier les principales tendances de recherche dans ce domaine. Une revue de littérature détaillée a également été effectuée sur les différentes topologies d'onduleurs multiniveaux et leurs principes de fonctionnement, afin de déterminer les stratégies de pilotage les plus adaptées à un système photovoltaïque.

Dans un second temps, nous modéliserons sous MATLAB/Simulink un système photovoltaïque connecté au réseau électrique, que nous simulerons en intégrant plusieurs topologies d'onduleurs multiniveaux.

Enfin, à l'issue des simulations, nous procéderons à une analyse des harmoniques des tensions en sortie d'onduleur et évaluerons la puissance active ainsi que la puissance réactive injectées dans le réseau électrique.

### **1.5 – Organisation du mémoire**

Ce mémoire est structuré en six chapitres et se termine par une conclusion générale. Le premier chapitre constitue une introduction générale au travail. Le deuxième chapitre est consacré à la production d'énergie électrique par les systèmes photovoltaïques, en présentant leurs avantages et leurs inconvénients. Nous y proposons également un rappel sur les cellules photovoltaïques et leur principe de fonctionnement, ainsi qu'une description du générateur PV et de ses caractéristiques I-V et P-V. Ce chapitre se conclut par une synthèse des principaux points abordés.

Dans le troisième chapitre, nous nous intéressons aux systèmes photovoltaïques connectés au réseau. Nous y présentons leurs différentes classifications, ainsi que les principales architectures d'un système PV raccordé au réseau électrique. Le chapitre se termine par un exposé des avantages et des inconvénients de ces systèmes, suivi d'une conclusion synthétique.

Dans le quatrième chapitre, nous abordons l'étage d'adaptation inséré entre le générateur photovoltaïque et l'onduleur, qui permet au GPV de fonctionner à sa puissance maximale. Nous y décrivons les différents types de convertisseurs CC-CC, appelés hacheurs, et

analysons en particulier le fonctionnement du convertisseur élévateur (Boost). Le chapitre se termine par une présentation de l'importance du MPPT (Maximum Power Point Tracker), suivie par la méthode *Perturb and Observe* (P&O).

Le cinquième chapitre présente le principe des principales topologies d'onduleurs multiniveaux, ainsi que la modélisation et la simulation sous MATLAB/Simulink des convertisseurs à trois niveaux et à cinq niveaux, accompagnées de leurs stratégies de commande. Une comparaison des résultats de simulation est ensuite effectuée. Le chapitre se conclut par la présentation des techniques de raccordement d'un système photovoltaïque au réseau électrique.

Le sixième chapitre est consacré à la simulation, sous MATLAB/Simulink, de l'onduleur multiniveaux intégré dans un système photovoltaïque connecté au réseau (trois niveaux et cinq niveaux). Il inclut la présentation et l'analyse spectrale des résultats obtenus, ainsi qu'une comparaison détaillée de ces résultats.

Enfin, le mémoire se termine par une conclusion générale qui synthétise l'ensemble de l'étude théorique et des simulations réalisées dans l'environnement MATLAB/Simulink.

## **CHAPITRE 2 – LA PRODUCTION D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE PAR LES SYSTÈMES PV**

### **2.1 – Introduction**

Afin de mieux comprendre le fonctionnement global d'un système photovoltaïque, il est essentiel de commencer par examiner la source primaire de cette énergie : le Soleil et les principes fondamentaux de la conversion de son rayonnement en électricité. Ce chapitre présente les fondements théoriques et technologiques de la production d'énergie électrique à partir de l'énergie solaire. Il expose d'abord les principes physiques du rayonnement solaire, les différentes formes de conversion de l'énergie solaire, ainsi que les avantages et limites de la technologie photovoltaïque. Ensuite, il décrit le fonctionnement des cellules photovoltaïques, les modèles électriques qui leur sont associés et l'influence de facteurs externes tels que la température et l'éclairement sur leurs performances.

L'objectif de ce chapitre est donc d'offrir une compréhension approfondie du comportement des cellules et modules photovoltaïques afin de mieux appréhender les phénomènes intervenant dans la conversion de l'énergie solaire en électricité.

### **2.2 – Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque**

L'énergie photovoltaïque est une source d'électricité propre et renouvelable, avec un impact environnemental limité [11]. Les panneaux solaires ont une durée de vie moyenne de 25 à 30 ans et offrent une bonne fiabilité [12].

Les systèmes PV peuvent être installés près du lieu de consommation, ce qui réduit les pertes d'énergie. Concernant le coût initial, il est encore élevé, mais en le comparant avec le coût en 2010, on remarque qu'il est en forte baisse de -80% [12], mais l'ajout des batteries de stockage augmente le coût d'installation.

Malgré ces limites, les progrès récents permettent d'améliorer l'efficacité et réduire le coût des installations [13].

### **2.3 – Cellules photovoltaïques**

On peut définir les cellules photovoltaïques comme étant des composants électroniques à base de semiconducteurs fabriqués par plusieurs types de matériaux comme le silicium (Si), de sélénium (Se), de germanium (Ge), sulfure de cadmium (CdS), ou d'arséniure de gallium (GaAs).

À cause de son abondance dans la nature, le silicium est connu comme étant le matériau le plus utilisé dans la fabrication des cellules photovoltaïques. Son origine est sous forme de pierre de silice. Ce dernier est connu comme étant un composé chimique (appelé dioxyde de silicium) de la formule chimique  $\text{SiO}_2$  [14]. Il existe différents types de cellules photovoltaïques, on cite :

- ✓ Cellule en silicium amorphe.
- ✓ Cellule en matériaux organiques.
- ✓ Cellule Tandem.
- ✓ Cellule en silicium monocristallin.
- ✓ Cellule en silicium polycristallin.

Ces cellules ont pour rôle de convertir les rayonnements lumineux en énergie électrique à courant continu basse tension.

#### 2.4 – Production d'électricité

La cellule solaire est le composant qui a pour rôle de convertir l'énergie lumineuse en électricité. Au cours de cette conversion, il y a une puissance électrique résultante qui dépend du flux et de la répartition spectrale de l'énergie.

Aux alentours de la jonction d'une cellule photovoltaïque basée sur une jonction P-N, il y a une création d'une excitation lumineuse, c'est le mouvement de déplacement des paires électron-trou à cause de la présence du champ électrique de la jonction [15].

Le principe est basé sur le dépassement des électrons de la jonction vers la région P et les trous vers la région N qui vont laisser derrière eux des atomes ionisés fixes. Cette zone (appelé zone de charge d'espace) de porteurs libres crée un champ électrique. En dehors de cette zone, le champ électrique est nul.

Une barrière de potentiel ( $V_D$ ) (dite tension de diffusion) se forme au cours du phénomène de déplétion à la frontière des deux zones dans le cas d'une homo-jonction à l'équilibre thermodynamique, dont l'expression de ce potentiel est présentée par l'équation suivante :

$$V_D = \frac{KT}{q} \ln \left( \frac{N_D \times N_A}{n_i^2} \right) \quad (2.1)$$

$V_D$ : C'est la tension de diffusion sur une jonction (exprimé en Volt).

$K=1,380662 \text{ e-}23 \text{ JK}^{-1}$ : C'est la constante de Boltzmann.

$T$ : C'est la température absolue du cristal (exprimé en °K).

$q = 1,602 \text{ e-}19 \text{ C}$ : C'est la charge élémentaire.

$N_D$ : C'est la concentration des donneurs (exprimé en  $\text{cm}^{-3}$ ).

$N_A$  : C'est la concentration des trous (exprimé en  $\text{cm}^{-3}$ ).

$n_i$ : C'est la concentration intrinsèque (exprimé en  $\text{cm}^{-3}$ ).

$KT/q = V_T = 26 \text{ mV}$  dans la condition de la température ambiante.

## 2.5 – Générateur photovoltaïque

Si on mesure la puissance dissipée par une seule cellule, on trouve que cette puissance est très faible. À cause de cette faible valeur de puissance, on doit mettre en série et en parallèle un tel nombre de cellules, dont le but d'avoir des modules de puissance compatible avec le matériel utilisé. Ces modules vont être connectés en série pour former une chaîne. Le générateur photovoltaïque est obtenu en connectant ces chaînes en parallèle. On calcule le nombre de modules dans chaque chaîne selon le besoin de la valeur de la tension du générateur.

## 2.6 – Paramétrages d'un module PV

Généralement les modules ont une forme rectangulaire mince et rigide (d'épaisseur faible de quelques centimètres), dont les paramètres suivants [16]:

- ✓ La caractéristique courant en fonction de la tension  $I=f(V)$  : Courbe représentant le courant  $I$  fourni par le module en fonction de la tension à ses bornes.
- ✓ Tension de circuit ouvert,  $V_{co}$  : Tension aux bornes du module en circuit ouvert, pour une condition en plein soleil.

✓ La puissance crête,  $P_c$  : la puissance électrique maximale délivrée par le module à une température de 25 °C et un éclairement de 1000 W/m<sup>2</sup>.

Courant de court-circuit,  $I_{cc}$  : courant généré par la cellule dans les conditions de court-circuit où la tension est nulle. ( $I_{cc} = I_{ph}$ ).

✓ La puissance maximale  $P_{max}$  : C'est la puissance électrique maximale délivrée par le module à une intensité maximale et à une tension maximale. Cette puissance est présentée par l'expression de l'équation suivante :

$$P_{max} = I_{max} \times V_{max} \quad (2.2)$$

✓ Rendement  $\eta$ : C'est le rapport de la puissance électrique maximale  $P_{max}$  par la puissance de radiation incidente  $P_{inc}$ .

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} \quad (2.3)$$

$P_{inc}$  est le produit entre l'éclairement et la surface totale des cellules photovoltaïques.

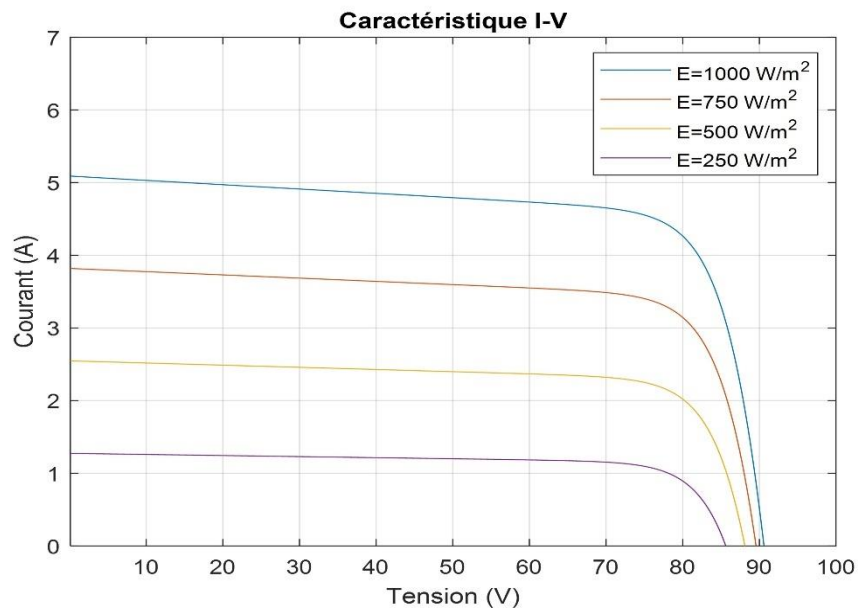
✓ Facteur de forme FF: Rapport de la puissance maximale  $P_{max}$  délivrée à la charge sur le produit courant court-circuit  $I_{cc}$  et la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ .

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \times V_{co}} \quad (2.4)$$

**2.6.1 – Impact de l'éclairement sur les caractéristiques du courant et de la puissance en fonction de la tension (I-V et P-V)**

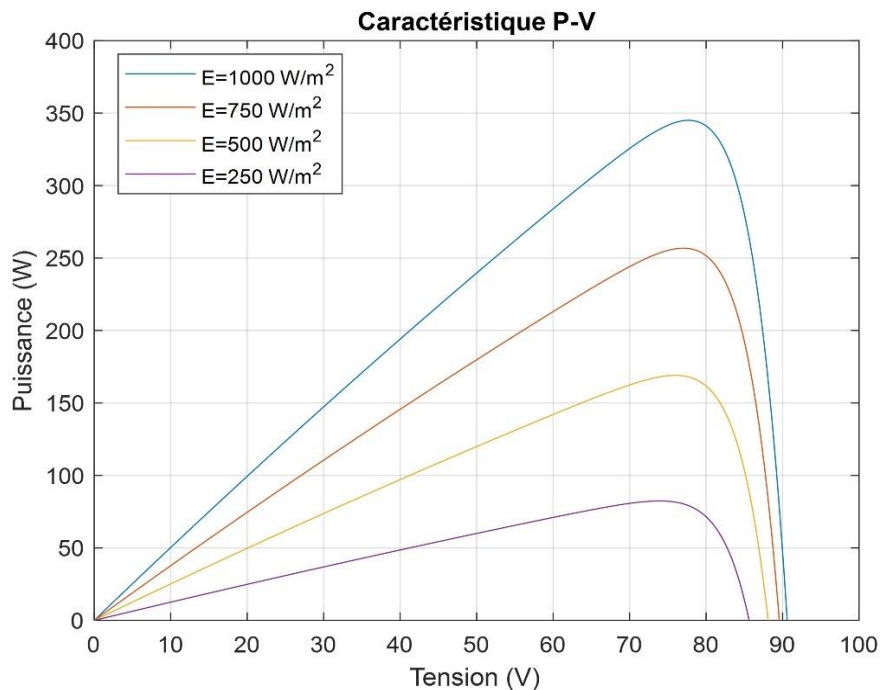
Pour voir l'impact de l'éclairement sur les caractéristiques du courant et de la puissance en fonction de la tension (I-V et P-V), on doit fixer la température à une valeur de  $T=25^{\circ}\text{C}$  et on prend des différentes valeurs pour l'éclairement [250, 500, 750, 1000]  $\text{W}/\text{m}^2$ .

La caractéristique du courant en fonction de la tension (I-V) est représentée par la figure 2.2 [17].



**Figure 2.1 : Caractéristique du courant en fonction de la tension (I-V) [17]**

La caractéristique de la puissance en fonction de la tension (P-V) est représentée par la figure 2.3 [17].



**Figure 2.2 : Caractéristique de la puissance en fonction de la tension (P-V) [17]**

D'après ces caractéristiques, on constate bien que le photo-courant créé dans le module PV (le courant de court-circuit) varie proportionnellement au flux solaire incident. Ce qui veut dire que l'éclairement a une forte influence sur le courant débité par le module PV. Cette influence provoque une croissance de la valeur de la puissance disponible dans les modules PV. Pour chaque valeur d'éclairement, le module photovoltaïque délivre une puissance électrique maximale.

L'expression du courant  $I_{cc}$  en fonctionnement de l'éclairement ( $E=G$ ) est exprimée par la formule suivante :

$$I_{cc} = I_{cc}^* \left( \frac{G}{G^*} \right) + K_i (T - T^*) \quad (2.5)$$

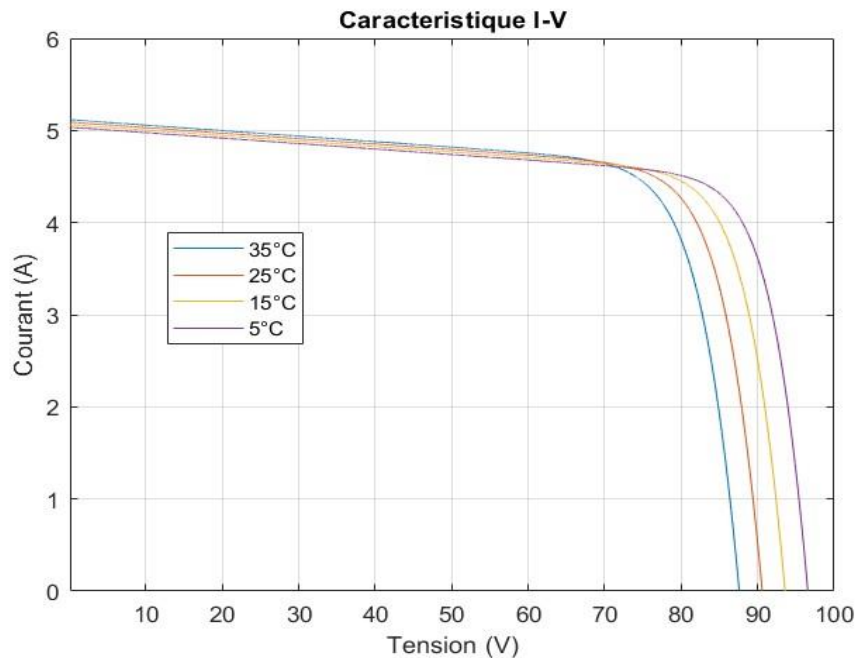
$I_{cc}^*$  : le courant de court-circuit dans les conditions de  $G^*=1000\text{W/m}^2$  et  $T^*=25^\circ\text{C}$ .

$K_i$  (A/°C) est un coefficient donné par le fabricant (coefficient de température  $I_{cc}$ ).

### 2.6.2 – Impact de la température sur les caractéristiques du courant et de la puissance en fonction de la tension (I-V et P-V)

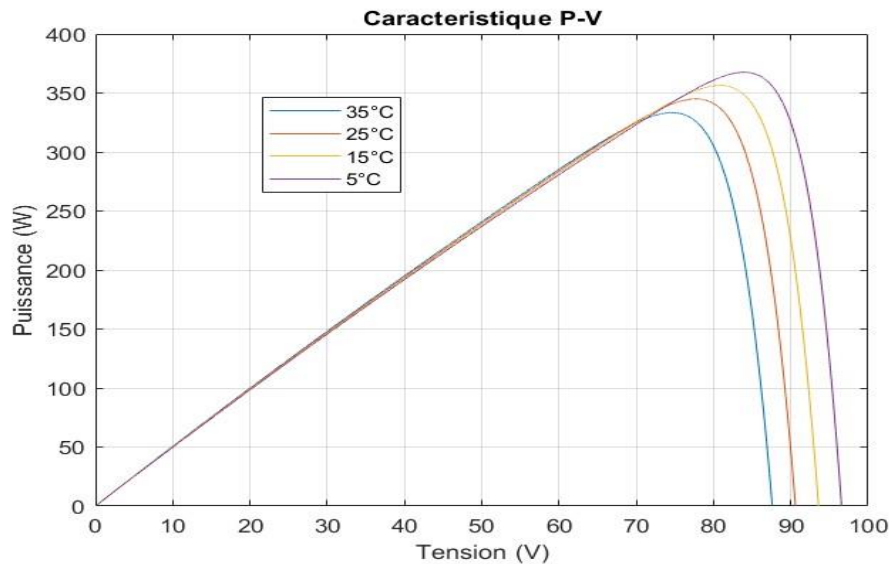
Pour voir l'impact de la température sur les caractéristiques du courant et de la puissance en fonction de la tension (I-V et P-V), on doit fixer l'éclairement à une valeur de  $E=G=1200\text{W/m}^2$  et on prend des différentes valeurs pour la température [35, 25, 15 et 5]°C.

La caractéristique du courant en fonction de la tension (I-V) à  $E=1200\text{W/m}^2$  est représentée par la figure 2.4 [17].



**Figure 2.3 : Caractéristique du courant en fonction de la tension (I-V) à  $E=1200\text{W/m}^2$  [17]**

La caractéristique de la puissance en fonction de la tension (P-V) à  $E=1200\text{W/m}^2$  est représentée par la figure 2.5 [17].



**Figure 2.4 : Caractéristique de la puissance en fonction de la tension (P-V) à  $E=1200W/m^2$  [17]**

La température a un grand impact dans le comportement d'un module photovoltaïque. Dans la figure qui représente la caractéristique du courant en fonction de la tension  $I(V)$  à  $E=1200W/m^2$ , on remarque que si la valeur de l'éclairement est constante et la valeur de la température varie, il y a une faible variation de courant  $I_{cc}$ . Cependant, on constate que si la température augmente, la valeur de la tension en circuit ouvert diminue. De même dans la figure de la caractéristique de la puissance en fonction de la tension  $P(V)$ , si la température augmente, la valeur maximale de la puissance diminue. D'où l'impact de la température sur le comportement du module photovoltaïque.

L'expression de la tension en circuit ouvert en fonction de la température d'un module photovoltaïque est exprimée comme suit :

$$V_{co} = V_{co}^* + K_v(T - T^*) - (I_{cc} - I_{cc}^*)R_s \quad (2.6)$$

$V_{co}^*$ : c'est la tension du circuit ouvert dans les conditions standards de Test.

$K_v$  ( $V/^\circ C$ ) : ce coefficient est généralement donné par le fabricant (coefficient de température de tension de circuit ouvert).

## **2.7 – Conclusion**

Au terme de ce chapitre, nous avons présenté les concepts fondamentaux relatifs à la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique à travers les systèmes photovoltaïques. Une attention particulière a été accordée au fonctionnement des cellules photovoltaïques, à leurs caractéristiques électriques (courbes I-V et P-V) ainsi qu'à leurs principaux types et matériaux constitutifs. L'analyse des caractéristiques a permis de démontrer que la puissance maximale produite par un module photovoltaïque dépend principalement de l'éclairement solaire et de la température de fonctionnement. Ces deux paramètres influencent directement la tension et le courant délivrés par le module. Ces connaissances constituent une base essentielle pour la modélisation et l'optimisation des systèmes photovoltaïques étudiés dans les chapitres suivants.

## CHAPITRE 3 – SYSTÈMES PV CONNECTÉS AU RÉSEAU

### 3.1 – Introduction

Le recours aux systèmes PV raccordés au réseau électrique permet de convertir l'énergie solaire en électricité injectée directement dans le réseau, contribuant ainsi à la transition énergétique et à la réduction des émissions de gaz à effet de serre [18].

Ce chapitre présente les principaux types de systèmes PV, en distinguant les systèmes autonome, hybrides et raccordés au réseau électrique. Une attention particulière est accordée à la description des architectures des systèmes PV connectés au réseau, notamment les topologies d'onduleur centralisé, string, multi-string et modulaire.

L'objectif de chapitre est d'offrir une compréhension claire des différentes configurations possibles, de leurs avantages, inconvénients et caractéristiques de fonctionnement.

### 3.2 – Classification des systèmes photovoltaïques

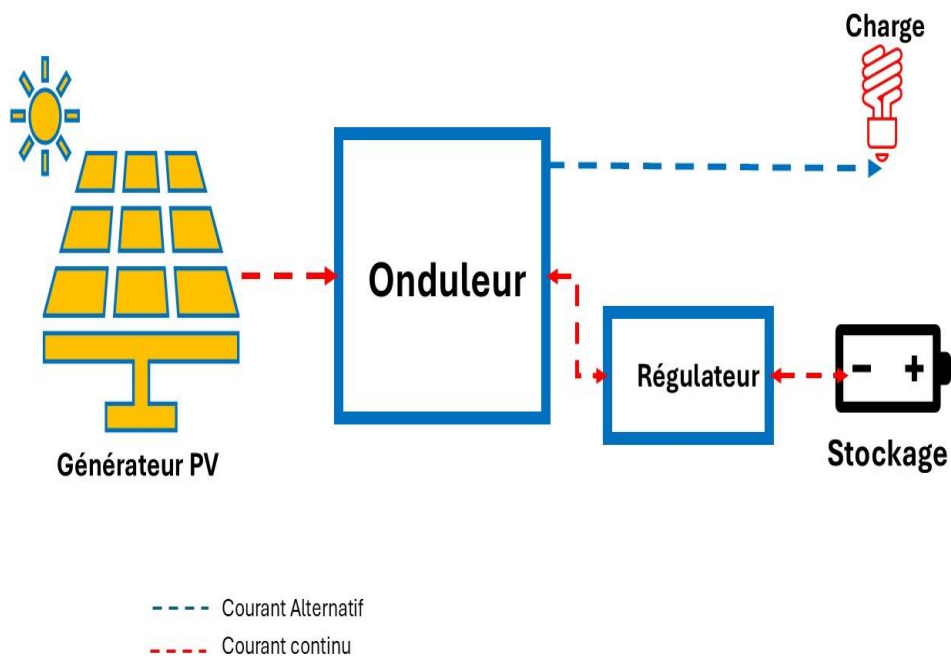
Selon leur configuration et leur mode d'exploitation, les systèmes photovoltaïques se répartissent en trois principales catégories : les systèmes autonomes, les systèmes hybrides et ceux raccordés au réseau électrique.

#### 3.2.1 – *Système photovoltaïque autonome*

Un système photovoltaïque dit autonome, lorsqu'il est installé directement aux consommateurs situés dans des zones isolées du réseau électrique, donc le système n'est pas connecté au réseau électrique. Dans ce type d'installation, il est nécessaire d'ajouter des batteries de stockage au système PV pour assurer une continuité d'énergie et pendant

plusieurs jours malgré l'absence de la production. Ce système de stockage augmente le coût d'installation de ce type de système PV. L'état des batteries de stockage joue un grand rôle dans les performances de fonctionnement du système photovoltaïque [19].

La figure 3.1 représente un exemple d'un schéma synoptique d'un système photovoltaïque autonome [19]:



**Figure 3.1 : Exemple de structure d'un système PV autonome [19]**

### 3.2.2 – Système photovoltaïque hybride

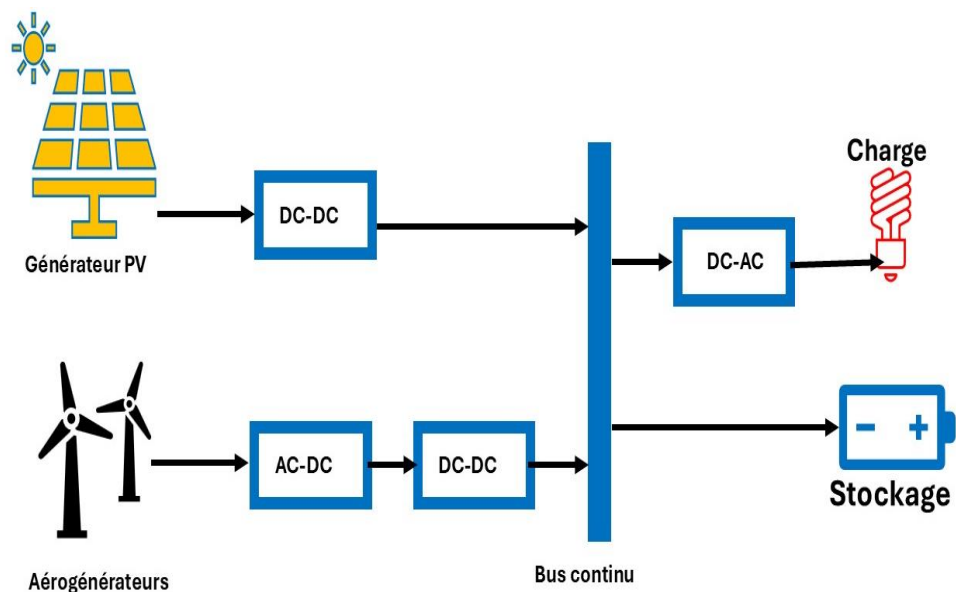
Pour diverses applications d'intérêt très sensible comme dans le domaine de télécommunication, les postes dans les zones de frontières, les zones hors réseaux électriques conventionnelles, l'existence permanente de la source primaire d'énergie est devenue vitale et nécessaire dans une très large mesure, l'existence des installations fiables et de fonctionnement permanent. Il y a des solutions technologiques classiques

apportées par le stockage électrochimique conventionnel qui ont été utilisées, mais ces solutions sont coûteuses, limitées techniquement en point de vue puissance et capacité. Il y avait aussi les solutions d'utilisation des groupes électrogènes dont il est nécessaire de fournir le carburant et de faire la maintenance parallèlement au mauvais rendement, la présence de bruit et la pollution.

Ces inconvénients ont poussé vers le développement des nouvelles solutions technologiques comme les systèmes hybrides [19].

Un système photovoltaïque hybride est défini comme étant un système qui associe un générateur PV à une autre source d'énergie, comme un moteur diesel, une turbine éolienne ou un stockage en utilisant des batteries, afin de garantir une production stable et autonome d'électricité.

La figure 3.2 présente un exemple d'un schéma synoptique d'un système photovoltaïque hybride [20].



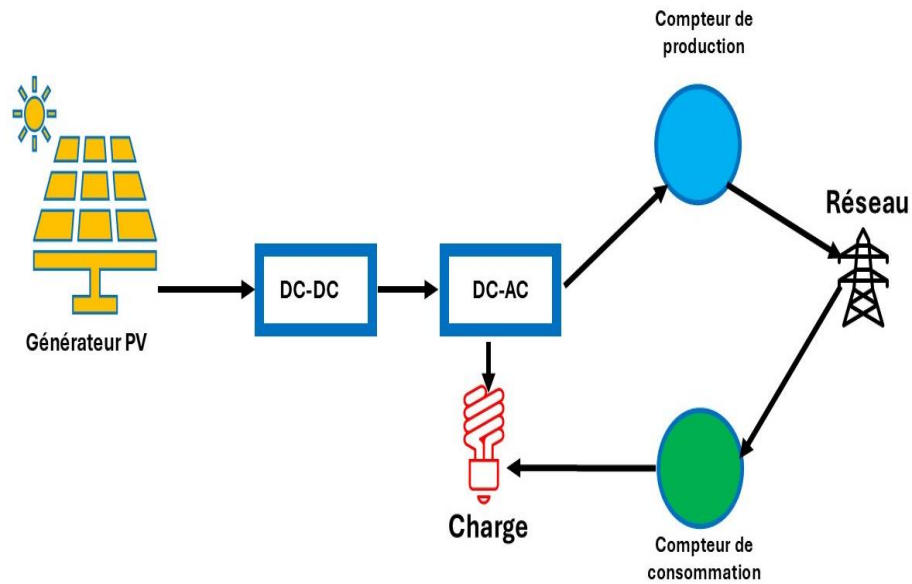
*Figure 3.2 : Exemple de structure d'un système PV hybride [20]*

La figure ci-dessus présente l'architecture générale d'un système photovoltaïque hybride combinant deux sources d'énergie renouvelable : l'énergie solaire et l'énergie éolienne. Le générateur photovoltaïque (PV) convertit l'énergie solaire en énergie électrique continue, laquelle est régulée par un convertisseur CC–CC qui assure le suivi du point de puissance maximale (MPPT) avant d'être injectée dans le bus continu. De leur côté, les aérogénérateurs produisent une énergie alternative qui est d'abord redressée par un convertisseur CA–CC, puis stabilisée par un convertisseur CC–CC avant d'être également envoyée vers le bus continu. Ce dernier sert de point d'interconnexion entre les différentes sources d'énergie, le système de stockage et la charge électrique. L'énergie stockée dans les batteries est utilisée pour compenser les fluctuations de production solaire et éolienne, garantissant ainsi une alimentation stable et continue. Enfin, la conversion CC–CA permet de fournir à la charge une tension alternative adaptée aux besoins des dispositifs électriques. Ce type de configuration offre une meilleure fiabilité énergétique et une exploitation optimale des ressources renouvelables disponibles.

### ***3.2.3 – Système photovoltaïque connecté au réseau électrique***

Les systèmes photovoltaïques dits raccordés au réseau sont des systèmes couplés directement au réseau électrique par l'intermédiaire d'un convertisseur (CC–CC) et un convertisseur (CC–CA). L'énergie solaire convertie est normalement injectée au réseau même [21].

La figure 3.3 représente un exemple d'un schéma synoptique d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique [21].



*Figure 3.3 : Exemple de structure d'un système PV connecté au réseau électrique [21]*

### 3.3 – Architectures du système PV connecté au réseau électrique

Selon la connexion du générateur PV avec le réseau électrique, on distingue des différentes topologies de connexion des systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique. En général, il existe quatre types d'architecture de connexion des systèmes photovoltaïques avec le réseau électrique sans l'existence des batteries de stockage.

Ces architectures sont citées comme suit [22] [23]:

- ✓ Topologie d'onduleur central (Centralized inverter).
- ✓ Topologie d'onduleur string (String inverter).
- ✓ Topologie d'onduleur multi-string (Multi-string inverter).
- ✓ Topologie d'onduleur modulaire (Module inverter).

### ***3.3.1 – Topologie d’onduleur central (Centralized inverter)***

Cette architecture consiste à utiliser un seul convertisseur CC–CA intermédiaire entre le générateur photovoltaïque et le réseau électrique, ce qui rend cette topologie-là plus répandue dans les applications des systèmes PV.

Les modules photovoltaïques sont connectés en série pour générer une tension suffisamment élevée dont le but est d’éviter une amplification supplémentaire. Ces chaînes en série sont ensuite montées en parallèle pour produire des niveaux de puissance élevés.

L’avantage d’utiliser cette architecture est qu’elle nécessite un seul onduleur ce qui réduit le coût tout en assurant des faibles pertes pour la conversion de puissance (rendement élevé).

Malgré ces avantages, cette topologie présente plusieurs défauts, on peut citer les inconvénients suivants :

- ✓ En cas de panne au niveau de l’onduleur, tout le système s’arrête.
- ✓ Risque de panne au niveau de câblage du système.
- ✓ Pas d’évolutivité.

### ***3.3.2 – Topologie d’onduleur à branches (String inverter)***

Cette architecture consiste à mettre un convertisseur CC–CA à la fin de chaque chaîne de modules photovoltaïques. Ces chaînes sont connectées en parallèle avec le réseau électrique.

L'amélioration de la fiabilité de ce système par rapport au système précédent est due à la nécessité d'une MPPT pour chaque chaîne. Dans le cas où un onduleur string est en arrêt à cause d'une panne, on n'aura pas un dysfonctionnement complet du système, les autres onduleurs peuvent continuer à alimenter le réseau électrique. De plus pour augmenter la puissance nominale de l'installation, il faut juste ajouter des onduleurs string et les connecter aux bornes de l'alimentation du réseau électrique.

Malgré ces avantages, tout système subit des inconvénients, si on compare le coût de cette topologie au coût de la topologie de l'onduleur central, on trouve que cette topologie est plus coûteuse et cela est à cause du nombre élevé d'onduleurs utilisés. De plus, la faible efficacité des onduleurs lorsqu'il y a une faible production d'énergie PV.

### ***3.3.3 – Topologie d'onduleur Multi-branches (Multi-String inverter)***

Cette architecture consiste à mettre un convertisseur CC-CC modulable à la fin de chaque chaîne de modules photovoltaïques, chaque hacheur est commandé par sa propre commande MPPT permettant à chaque string de fonctionner à son PPM. Ces convertisseurs CC-CC sont connectés en parallèle avec un convertisseur CC-CA.

Par conséquent, cette topologie de l'onduleur multi-string est une combinaison de l'onduleur string et l'onduleur central par la commande d'un MPPT à chaque string en utilisant moins de convertisseurs CC-CA.

Cette topologie offre une puissance nominale similaire à celle de l'onduleur string, mais à un coût plus faible. Elle utilise le même nombre de convertisseurs CC-CA pour l'ensemble du système, ce qui réduit le coût global. Cependant, cette configuration

présente une fiabilité inférieure à celle de la topologie string et les pertes des convertisseurs s'ajoutent à celle du système global.

### ***3.3.4 – Topologie d'onduleur modulaire (Module inverter)***

Cette architecture consiste à mettre un onduleur modulable à proximité immédiate avec chaque module photovoltaïque. Dans le cas d'une installation importante, tous ces onduleurs sont montés en parallèle entre eux et avec le réseau électrique.

Chaque module solaire est commandé par sa propre commande MPPT ce qui permet d'éliminer les pertes causées par incohérences entre les modules solaires et d'augmenter le rendement de cette topologie par rapport au rendement de la topologie d'onduleur String.

En ce qui concerne l'ombrage et à la différence d'exposition des strings, avec la topologie d'onduleur modulaire ces problèmes sont réduits [22].

Cette topologie est à coût relativement élevé et elle n'est valable qu'avec les applications à basse puissance de moins de 500 W.

## **3.4 – Avantages et inconvénients des systèmes connectés au réseau**

### ***3.4.1 – Avantages***

- ✓ Coût d'investissement réduit grâce à l'absence de batteries.
- ✓ Tout excédent d'énergie sera injecté au réseau afin de générer des avantages économiques.
- ✓ Simplicité du système.

- ✓ Faible coût de maintenance.
- ✓ On peut satisfaire au besoin total ou partiel du réseau électrique.

### **3.4.2 – Inconvénients**

Malgré les avantages cités précédemment, les systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique présentent toujours des inconvénients. On peut citer les inconvénients suivants :

- ✓ Il faut que les caractéristiques du système photovoltaïque soient conformes aux normes de raccordement au réseau et à la politique de la compagnie de distribution d'énergie électrique.
- ✓ Le coût du kWh produit par des systèmes photovoltaïques résidentiels dépasse généralement 0,15 \$/kWh, alors que le prix du kWh fourni par le réseau électrique reste souvent inférieur à 0,10 \$/kWh, confirmant ainsi que le kWh photovoltaïque demeure actuellement plus coûteux que celui du réseau [24].

### **3.5 – Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté et analysé les principales catégories de systèmes photovoltaïques, à savoir les systèmes autonomes, hybrides et ceux connectés au réseau électrique.

Nous avons ensuite décrit en détail les différentes architectures des systèmes raccordés au réseau, notamment les topologies d'onduleurs centralisés, string, multi-string et modulaires.

Chaque configuration a été étudiée selon ses principes de fonctionnement, ses avantages, ses inconvénients et son impact sur la performance globale du système.

Cette étude a permis de comparer les différentes topologies et de mettre en évidence les critères de choix technico-économiques les plus pertinents pour une intégration optimale des systèmes photovoltaïques dans le réseau électrique.

## CHAPITRE 4 – HACHEUR DE PUISSANCE POUR LES SYSTÈMES PV

### 4.1 – Introduction

Pour adapter la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries de stockage d'un système photovoltaïque à des récepteurs qui fonctionnent avec une tension continue différente, on doit placer un convertisseur CC–CC à l'intermédiaire entre le générateur PV et l'onduleur CC–CA.

Des critères tels que la qualité, la fiabilité, le dimensionnement, le poids et le coût réduit doivent être respectés par les dispositifs électroniques des nouvelles technologies. Les régulateurs de puissance linéaires, fonctionnant sur la base d'un diviseur de courant ou de tension, sont capables de produire une tension finale de grande qualité. Néanmoins, ce genre de régulateurs demeure inefficace en raison du fait que leur champ d'application principal est limité pour la basse puissance [25] [26].

Dans ce chapitre, nous allons d'abord présenter le principe général des convertisseurs CC–CC ainsi que les principales topologies existantes, avant de justifier le choix du hacheur élévateur retenu dans ce travail.

Nous allons ensuite analyser en détail le fonctionnement du convertisseur élévateur afin d'en dégager les équations caractéristiques et les relations reliant la tension d'entrée à la tension de sortie. Par la suite, nous mettrons en évidence l'importance du suivi du point de puissance maximale (MPPT) et nous expliquerons le choix de la méthode de perturbation et observation, qui sera appliquée pour assurer l'extraction optimale de la puissance délivrée par le générateur PV.

#### 4.2 – Principe des convertisseurs CC-CC

Les convertisseurs CC–CC sont des régulateurs de commutation qui utilisent des interrupteurs électroniques à base des semi-conducteurs comme le thyristor, l'IGBT ou transistor de puissance et autres [27]. Ces convertisseurs assurent une excellente conversion énergétique et peuvent fonctionner aux hautes fréquences.

L'augmentation des fréquences de fonctionnement améliore les caractéristiques dynamiques des convertisseurs CC–CC.

Ainsi, les hautes fréquences de fonctionnement présentent une réaction dynamique plus rapide face aux fluctuations rapides du courant de sortie vers la charge ou de la tension d'entrée [28].

Le convertisseur CC–CC établit un lien entre la source de tension continue et la charge. Il est qualifié comme étant un transformateur pour des grandeurs continues d'électricité [29]. Grâce à ses performances, le convertisseur CC–CC est capable de contrôler la tension de sortie CC [28].

#### 4.3 – Types de convertisseurs CC–CC

On trouve sur le marché différents types de hacheurs CC–CC ; comme:

- ✓ Convertisseur abaisseur (Buck).
- ✓ Convertisseur Ćuk.
- ✓ Convertisseur élévateur - abaisseur (Buck-Boost).
- ✓ Convertisseur élévateur (Boost).

Dans ce chapitre, nous examinerons le convertisseur élévateur.

#### **4.4 – Choix du hacheur élévateur boost**

Le hacheur élévateur (Boost converter) est retenu dans ce travail pour ses performances élevées et sa simplicité d'intégration dans les systèmes photovoltaïques connectés au réseau. La tension fournie par les panneaux photovoltaïques varie selon l'irradiation et la température, et reste souvent inférieure à la valeur requise pour l'alimentation de l'onduleur : le hacheur élévateur permet d'adapter et d'élever cette tension continue afin d'obtenir un bus CC stable et compatible [30].

De plus, cette topologie offre un rendement élevé et une structure simple, ce qui facilite sa mise en œuvre et son coût réduit. Elle s'associe également efficacement à un algorithme de suivi du point de puissance maximale (MPPT), car la modulation de son rapport cyclique permet de régler la tension du générateur PV pour en extraire la puissance maximale [31].

Enfin, les travaux récents montrent que des variantes de l'élévateur, comme les topologies à haut gain ou intercalées, permettent d'améliorer encore les performances (gain de tension, rendement, ondulation réduite) [32].

Ainsi, le hacheur élévateur constitue une solution optimale pour assurer une conversion stable, efficace et adaptée aux conditions variables des systèmes photovoltaïques connectés au réseau.

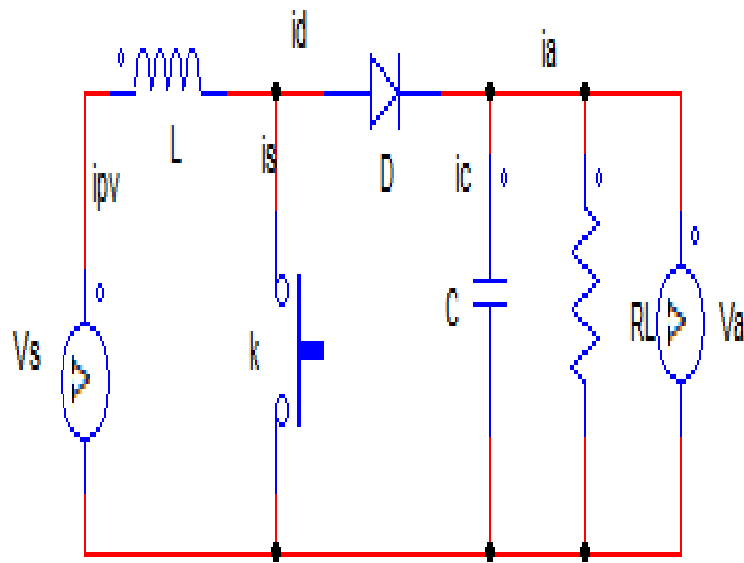
#### **4.5 – Principe de fonctionnement du convertisseur élévateur**

Le principe du convertisseur Boost est de convertir une tension continue à son entrée venant de la source  $V_s$  (VPV) en une tension continue plus élevée  $V_a$  [33].

La topologie du convertisseur élévateur est utilisée pour des applications à haute et moyenne tension.

Ce type de convertisseur se compose d'un interrupteur K (IGBT ou MOSFET), une inductance L, une diode qui protège D contre le retour du courant et le condensateur C qui a pour rôle le lissage de la tension de sortie  $V_a$  [34] [35].

La figure 4.1 présente le circuit électrique d'un hacheur Boost :



**Figure 4.1 : Circuit électrique d'un hacheur Boost [34]**

La conversion se fait en deux séquences [36] :

✓  $t \in [0, DT_s]$  : L'interrupteur  $k$  est fermé et la diode est bloquée : l'inductance  $L$  emmagasine l'énergie venant de la source de tension d'entrée  $V_e$  ( $V_{pv}$ ) avec une augmentation progressive du courant venant de la source d'entrée.

L'expression de la tension aux bornes de l'inductance est donnée par l'équation suivante :

$$V_L = L \times \frac{di_L}{dt} = V_e > 0 \quad (4.1)$$

La solution de cette équation différentielle donne l'expression qui exprime l'évolution du courant qui traverse l'inductance, cette expression est donnée par l'équation suivante :

$$I_L = I_{\min} + \frac{V_e}{L} \quad (4.2)$$

$I_{\min}$  désigne la valeur minimale du courant qui traverse l'inductance L.

À  $t = DT_s$ , le courant dans l'inductance  $I_L = I_{\max}$ .

Donc :

$$I_{\max} = I_{\min} + \frac{V_e}{L} DT_s \quad (4.3)$$

✓  $t \in ]DT_s, T_s]$  : L'interrupteur k s'ouvre, la diode est passante et L libère la tension emmagasinée.

L'expression de la tension aux bornes de l'inductance est donnée par l'équation suivante

$$V_L = L \times \frac{di_L}{dt} = V_e - V_s < 0 \quad (4.4)$$

La solution de cette équation différentielle donne l'expression qui exprime l'évolution du courant qui traverse l'inductance, cette expression est donnée par l'équation suivante :

$$I_L = I_{\max} + \frac{V_e - V_s}{L} (t - DT_s) \quad (4.5)$$

À  $t = T_s$ , le courant  $I_L = I_{\min}$  donc :

$$I_L = I_{\min} = I_{\max} + \frac{V_e - V_s}{L} \times (1 - D) \times T_s \quad (4.6)$$

On pose que  $\Delta I_L = I_{\max} - I_{\min}$  : c'est l'ondulation du courant dans l'inductance

Par l'égalité des équations (3.27) et (3.30), on obtient l'expression de la tension de sortie  $V_s$ .

$$V_s = \frac{1}{1-D} \times V_e \quad (4.7)$$

On a  $0 < D < 1$  ce qui signifie que la tension de sortie  $V_s$  est obligatoirement supérieure à la tension d'entrée  $V_e$ .

Si on applique le principe de conservation de puissance entre la sortie et l'entrée du hacheur, on peut obtenir la valeur moyenne du courant  $I_L$  en fonction du courant moyen dans la charge et du  $D$  :

$$I_L = \frac{1}{1-D} \times I_s \quad (4.8)$$

L'expression de l'ondulation de courant dans l'inductance  $L$  est comme suit :

$$\Delta I_L = \frac{D \times V_e}{L} \times T_s = \frac{D \times V_e}{L f} \quad (4.9)$$

On désigne par  $f$  la fréquence de découpage.

L'expression de l'ondulation de tension de sortie est comme suit :

$$\Delta V_s = \frac{D \times V_e}{(1-D) \times R \times C \times f} = \frac{D \times I_s}{C \times f} \quad (4.10)$$

À partir de ces dernières équations, on peut déduire l'expression du condensateur de filtrage  $C$  et de l'inductance lissage  $L$  :

$$C = \frac{D \times I_s}{\Delta V_s \times f} \quad (4.11)$$

$$L = \frac{D \times V_e}{\Delta I_L \times f} \quad (4.12)$$

#### 4.6 – Importance du MPPT (Maximum Power Point Tracker)

Les modules photovoltaïques sont attaqués par un rayonnement solaire à caractère fortement variable en fonction de l'altitude, de la saison, du sens d'orientation des

panneaux solaires, de l'heure du jour et de l'angle d'inclinaison des panneaux. Au cours de la journée, on peut avoir l'apparition des ombres par fois prévisibles, comme dans le cas d'un obstacle situé à côté du champ solaire ou imprévisible comme des ombres de nuages. Par ailleurs, le rayonnement et la température sont les facteurs qui agissent sur la quantité d'énergie produite par les cellules photovoltaïques. Il est essentiel donc de repérer à chaque instant le point spécifique dans la caractéristique du courant en fonction de la tension du générateur photovoltaïque où le transfert de puissance vers le réseau est au maximum.

Le point de puissance correspond au point de tangence sur la caractéristique du courant en fonction de la tension du générateur photovoltaïque pour une valeur choisie du rayonnement solaire projeté sur la courbe de la caractéristique  $P=V \times I$  [37].

Afin de garantir le bon fonctionnement d'un générateur photovoltaïque à son point de puissance maximale (MPP), il est fréquent d'utiliser des contrôleurs MPPT (Maximum Power Point Tracking). L'objectif de ces contrôleurs est de minimiser l'écart entre la puissance de fonctionnement et la puissance maximale de référence qui varie en fonction des conditions météorologiques.

On peut facilement calculer la puissance de fonctionnement du générateur photovoltaïque qui est le produit entre le courant et la tension. En revanche, il est plus difficile de déterminer la puissance maximale de référence, car elle dépend des conditions de la température et du rayonnement. Étant donné que cette valeur de référence n'est pas constante et présente une fonction non linéaire, il est plus difficile de faire fonctionner le système à sa puissance maximale. Pour résoudre ces problèmes, diverses approches sont

fréquemment utilisées, comme les approches analogiques et les approches numériques [37] [38].

Afin d'optimiser l'efficacité du générateur photovoltaïque, c'est-à-dire maximiser la puissance fournie à la charge connectée au générateur PV, diverses techniques d'optimisation ont été appliquées, parmi ces techniques on a [39] [40] :

- ✓ Technique de Perturbation et Observation.
- ✓ Technique d'Incrément de la conductance (IncCond, Incremental Conductance)
- ✓ Technique basée sur la mesure de la tension en circuit ouvert
- ✓ Technique basée sur la mesure du courant en court-circuit

Pour les systèmes photovoltaïques, la technique d'optimisation la plus utilisée est la méthode de Perturbation et Observation. Notre travail est concentré sur cette technique appliquée à un système photovoltaïque.

#### **4.7 – Choix de la méthode de perturbation et observation**

Dans le cadre de ce travail, la méthode de suivi du point de puissance maximale (MPPT) par « Perturbation et Observation » a été privilégiée pour plusieurs raisons pragmatiques. D'abord, sa simplicité de mise en œuvre, puisqu'elle ne nécessite que la mesure de la tension et du courant du générateur photovoltaïque, ce qui la rend particulièrement adaptée à une commande embarquée dans un hacheur élévateur (Boost) à coût réduit [41]. Ensuite, face à d'autres techniques telles que l'Incremental Conductance ou les méthodes d'optimisation avancées, la P&O offre un bon compromis entre rapidité de convergence, complexité minimale et coût du matériel réduit, ce qui correspond au contexte industriel

et académique ciblé dans ce mémoire [42]. Enfin, des études très récentes montrent que, même si la P&O présente des oscillations en régime établi ou sous ombrage partiel, elle peut être améliorée par des variantes « adaptatives » ou « à pas variable », tout en conservant sa structure simple ce qui garantit à la fois sa fiabilité, efficacité et compatibilité avec un convertisseur CC-CC suivi d'un onduleur multiniveaux [43].

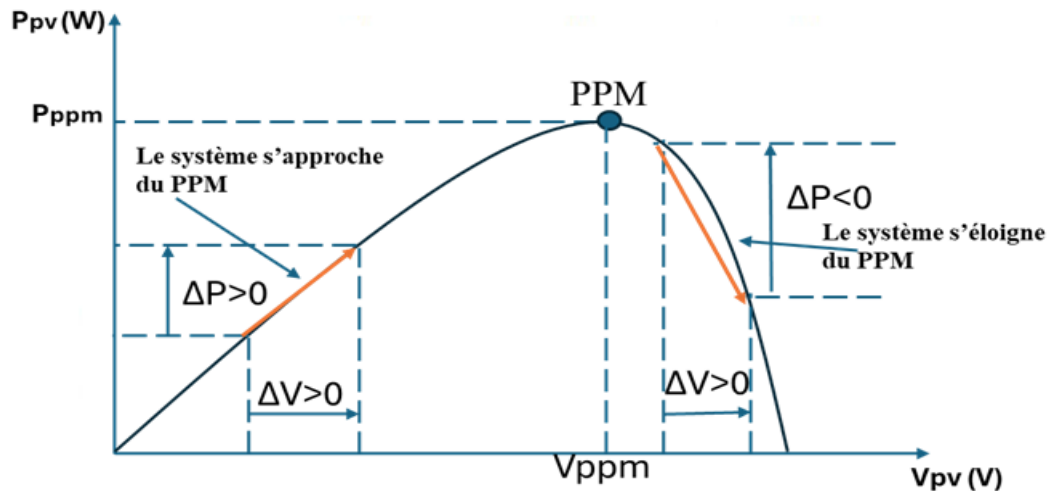
#### **4.8 – Méthode de perturbation et observation**

Le principe de la commande MPPT par la méthode de perturbation et observation pour la recherche du point de puissance maximale est de perturber la tension de sortie du générateur photovoltaïque  $V_{pv}$  d'une faible valeur et observer la variation de la puissance  $P_{pv}$  délivrée par le générateur photovoltaïque [37].

Dans la méthode MPPT par perturbation et observation, la perturbation est introduite en modifiant légèrement le rapport cyclique du convertisseur CC-CC relié au générateur photovoltaïque. Cette modification entraîne une variation de la tension aux bornes du générateur photovoltaïque  $V_{pv}$ . Après chaque perturbation du rapport cyclique, la puissance fournie par le générateur photovoltaïque  $P_{pv}$  est mesurée et comparée à sa valeur précédente [37].

Si la variation du rapport cyclique provoque une augmentation de la puissance, la perturbation est maintenue dans la même direction. En revanche, si la puissance diminue, le sens de variation du rapport cyclique est inversé. Ce processus est répété périodiquement afin de déplacer le point de fonctionnement vers le point de puissance maximale.

La figure 4.2 résume le principe de la méthode P&O [44].



**Figure 4.2 : Principe de la méthode perturbation et observation [44]**

D'après cette figure, on remarque que le principe de la méthode perturbation et observation est résumé dans deux cas :

✓ Si  $\Delta P > 0$  donc la perturbation de la tension est à la bonne direction pour atteindre le point de la puissance maximale. On doit continuer la perturbation de cette façon jusqu'à atteindre le MPPT.

Cela veut dire que le point de fonctionnement est situé à gauche du point de la puissance maximale MPP : l'algorithme vérifie le signe de  $\Delta V$  (écart entre la tension de référence  $V_k$  et la valeur de la tension mesurée après perturbation  $V_{k+1}$ ). Si le statut  $\Delta V > 0$  est satisfaisant, alors  $V_{k+1} = V_k + \Delta V$ . Sinon,  $V_{k+1} = V_k - \Delta V$ .

✓ Si  $\Delta P < 0$  donc la perturbation de la tension est dans la mauvaise direction et le point de fonctionnement du système s'éloigne du point de la puissance maximale PPT. Donc on doit faire une perturbation de signe opposé jusqu'à atteindre le MPPT.

Cela veut dire que le point de fonctionnement est situé à droite du point de puissance maximale MPP : l'algorithme vérifie le signe de  $\Delta V$  (écart entre la tension de référence  $V_k$  et la valeur de la tension mesurée après perturbation  $V_{k+1}$ ). Si le statut  $\Delta V < 0$  est satisfaisant, alors  $V_{k+1} = V_k + \Delta V$ . Si non,  $V_{k+1} = V_k - \Delta V$ .

La boucle de ce processus se répète jusqu'à ce qu'il atteigne le point de puissance maximale.

#### **4.9 – Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons étudié le rôle essentiel du hacheur de puissance dans la chaîne de conversion d'un système photovoltaïque connecté au réseau. Nous avons présenté les différents types de convertisseurs CC-CC, avant de justifier le choix du convertisseur élévateur (Boost), retenu pour sa simplicité, son efficacité énergétique et sa compatibilité avec les systèmes photovoltaïques nécessitant une élévation de tension.

Par ailleurs, l'importance du suivi du point de puissance maximale (MPPT) a été soulignée afin d'optimiser l'extraction d'énergie du générateur photovoltaïque sous des conditions climatiques variables. Parmi les différentes stratégies existantes, la méthode de Perturbation et Observation (P&O) a été adoptée pour sa simplicité d'implémentation, son faible coût et son bon compromis entre rapidité et stabilité.

Ainsi, le système étudié combine un hacheur Boost associé à la commande MPPT avec la méthode P&O, garantissant un fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque et une adaptation efficace à l'onduleur multiniveaux pour l'injection au réseau.

## **CHAPITRE 5 – ÉTUDE DES DIFFÉRENTES TOPOLOGIES D'ONDULEURS MULTINIVEAUX TRIPHASÉS**

### **5.1 – Introduction**

L'onduleur est défini comme étant un convertisseur statique qui a pour rôle l'interfaçage entre une source électrique continue et une charge fonctionnant en alternatif.

Vu que les onduleurs multiniveaux proposent divers avantages, ils ont été introduits dans les applications des réseaux à haute puissance et moyenne tension [45] [46].

Dans ce chapitre, nous présenterons et analyserons les principales topologies d'onduleurs multiniveaux triphasés.

Nous présenterons d'abord le principe de fonctionnement général des onduleurs multiniveaux, puis nous détaillerons les trois structures retenues dans ce travail : la topologie à diodes de bouclage (NPC), la topologie à condensateurs flottants (FC) et la topologie en ponts H cascades (CHB).

Nous modéliserons et simulerons chacune de ces structures sous MATLAB/Simulink, en utilisant une commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) sinusoïdale adaptée aux systèmes photovoltaïques raccordés au réseau. Ces simulations permettront d'évaluer les performances électriques de chaque topologie à l'aide d'indicateurs tels que le taux de distorsion harmonique (THD).

Enfin, nous comparerons et analyserons les résultats obtenus afin d'identifier la topologie la plus performante et la mieux adaptée à la conversion d'énergie dans les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau. Cette étude apportera une contribution directe à

l'évaluation et à l'optimisation des convertisseurs multiniveaux dans le cadre de la commande des systèmes PV.

## **5.2 – Différents types des onduleurs multiniveaux**

Dans cette section, nous présenterons les principales topologies d'onduleurs multiniveaux : les structures à diodes de bouclage (NPC), à condensateurs flottants (FC) et en ponts H cascades (CHB). Ces trois topologies ont été retenues pour notre étude en raison de leurs performances complémentaires et de leur pertinence pour les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau.

La topologie NPC sera choisie à simuler pour sa robustesse, sa capacité à supporter de fortes tensions et son équilibre du point neutre, ce qui en fait une solution adaptée aux applications de moyenne et haute tension. La topologie FC sera étudiée et simulée aussi pour sa flexibilité de commande et sa possibilité de générer plusieurs niveaux de tension sans recourir à des diodes de bouclage, bien qu'elle présente une complexité accrue dans la gestion des tensions des condensateurs. Enfin, la topologie CHB sera analysée et simulée pour son architecture modulaire, sa facilité d'extension et son excellent compromis entre qualité de tension, rendement et coût de réalisation.

Ces trois structures feront l'objet d'une modélisation et d'une simulation dans l'environnement MATLAB/Simulink, afin d'en comparer les performances en termes de distorsion harmonique et de complexité de commande.

### 5.2.1 – Onduleurs multiniveaux à diodes de bouclage (NPC)

Selon nos recherches, on constate que la topologie à diode de bouclage NPC (Neutral Point Clamped) est la plus utilisée dans les onduleurs de type multiniveaux.

L'onduleur de tension multiniveaux est favorisé par rapport à la topologie d'onduleur classique (à deux niveaux) grâce aux avantages qu'il présente :

- Les composants de puissance à semi-conducteur bloquent une tension inverse égale seulement à la moitié de la tension de la source continue [46] [47] .
- Même bus continu connecté à toutes les phases.
- Un haut rendement assuré par la fréquence fondamentale.
- La simplicité de la méthode de contrôle.

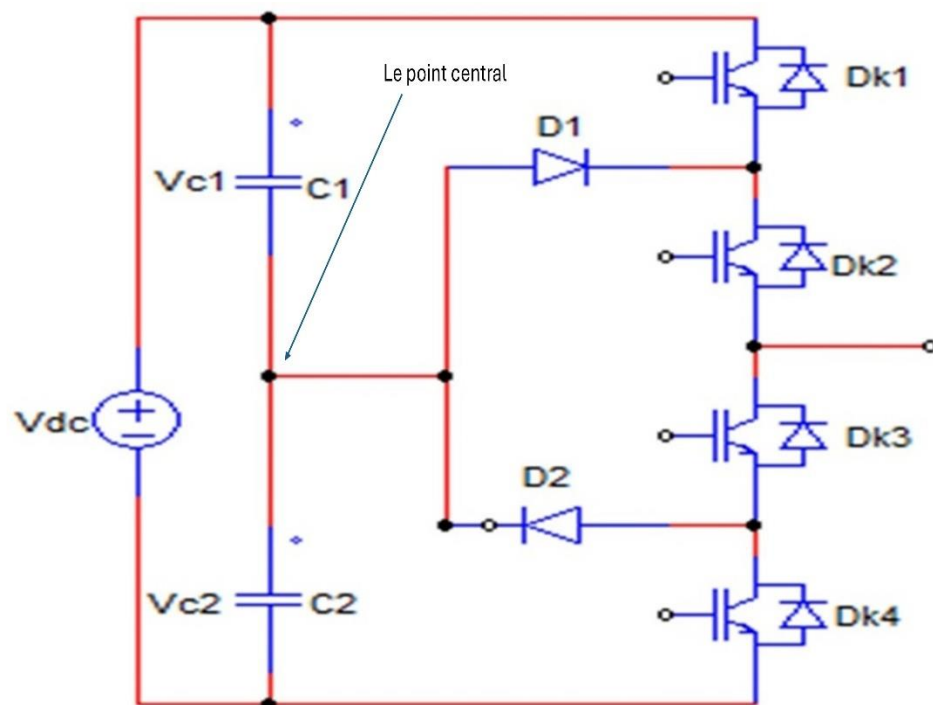
Chaque bras d'un onduleur de cette topologie de N niveaux est constitué par 2(N-2) diodes qui servent à établir la connexion avec le point de référence, 2(N-1) commutateurs de types transistors bipolaires à grille isolée IGBT et (N-1) condensateurs pour avoir les tensions de niveaux N, ces derniers condensateurs vont réaliser le bus continu qui va être connecté aux différentes phases [37]. Si on désigne par  $V_{dc}$  la tension qui est appliquée à l'entrée de l'onduleur, donc la tension aux bornes de chaque condensateur est égale à

$$\frac{V_{dc}}{(N-1)}$$

**Tableau 5.1 : Nombre des composants constituant l'onduleur multiniveaux NPC**

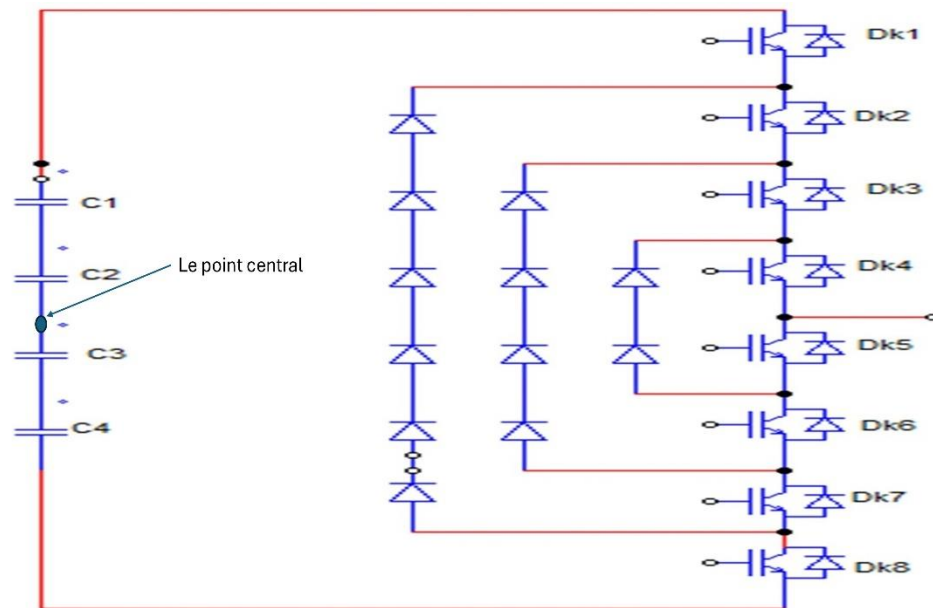
		Nombre de composants			
		Commutateur	Diode de bouclage	Condensateur de bus continus	Source de tension
Topologie	Onduleur NPC 3N	12	6	2	1
	Onduleur NPC 5N	24	18	4	1

La figure 5.1 illustre la structure d'un bras d'onduleur triphasé à trois niveaux type NPC réalisée sur le logiciel PSIM [37].



**Figure 5.1 : Circuit d'un seul bras d'un onduleur trois niveaux NPC [37]**

La figure 5.2 illustre la structure d'un bras d'onduleur triphasé à cinq niveaux type NPC réalisée sur le logiciel PSIM [37].



**Figure 5.2 : Circuit d'un seul bras d'un onduleur cinq niveaux NPC [37]**

### 5.2.1.1 – Principe de fonctionnement d'un onduleur NPC à trois niveaux

La tension aux bornes de chaque condensateur du bus continu est égale à  $\frac{V_{dc}}{2}$ .

Le principe de fonctionnement de cette topologie d'onduleur se résume en trois séquences qui sont les suivantes :

- Première séquence : Génération du niveau  $\frac{V_{dc}}{2}$

Pendant cette séquence, les commutateurs Dk1 et Dk2 sont fermés, Dk3 et Dk4 sont ouverts, alors la tension de la phase A à la sortie de l'onduleur  $V_{ao}$  est égale à  $\frac{V_{dc}}{2}$ .

- Deuxième séquence : Génération du niveau zéro

Pendant cette séquence, les commutateurs Dk3 et Dk2 sont fermés, Dk1 et Dk4 sont ouverts, alors la phase à la sortie de l'onduleur est connectée directement à la masse (point de référence) via la diode de maintien, donc  $V_{ao}$  est égale à zéro.

- Troisième séquence : Génération du niveau  $\frac{V_{dc}}{2}$

Pendant cette séquence, les commutateurs Dk3 et Dk4 sont fermés, Dk1 et Dk2 sont ouverts, alors suivant la loi des mailles, la tension de la phase A à la sortie de l'onduleur  $V_{ao}$  est égale à l'inverse de la tension aux bornes du condensateur  $C_2$ .

$$\text{Donc } V_{ao} = -\frac{V_{dc}}{2}.$$

### 5.2.1.2 – Principe de fonctionnement d'un onduleur NPC à cinq niveaux

Le principe de fonctionnement de cette topologie d'onduleur se résume en cinq séquences qui sont les suivantes :

La tension aux bornes de chaque condensateur du bus continu est égale à  $\frac{V_{dc}}{4}$ .

- Première séquence : Génération du niveau  $\frac{V_{dc}}{2}$

Durant cette séquence, les commutateurs Dk1, Dk2, Dk3 et Dk4 sont fermés, en revanche les commutateurs Dk5, Dk6, Dk7 et Dk8 sont ouverts, alors là si on fait la loi des mailles on trouve que la tension simple de la phase A à la sortie de l'onduleur  $V_{ao}$  est égale à la somme des tensions aux bornes des deux condensateurs  $C_1$  et  $C_2$ .

$$\text{Donc } V_{ao} = \frac{V_{dc}}{2}.$$

- Deuxième séquence : Génération du niveau  $\frac{V_{dc}}{4}$

Dans cette séquence, les commutateurs Dk2, Dk3, Dk4 et Dk5 sont fermés, en revanche les commutateurs Dk1, Dk6, Dk7 et Dk8 sont ouverts, alors là si on fait la loi des mailles on trouve que la tension simple de la phase A à la sortie de l'onduleur  $V_{ao}$  est égale à la tension aux bornes du condensateur C2 du bus continu, donc  $V_{ao} = \frac{V_{dc}}{4}$ .

- Troisième séquence : Génération du niveau zéro

Pendant cette séquence les commutateurs Dk3, Dk4, Dk5 et Dk6 sont fermés, en revanche les commutateurs Dk1, Dk2, Dk7 et Dk8 sont ouverts, alors la phase A à la sortie de l'onduleur est connectée directement à la masse (point de référence) via les diodes de maintien, donc  $V_{ao}$  est égale à zéro.

- Quatrième séquence : Génération du niveau  $-\frac{V_{dc}}{4}$

Pendant cette séquence, les commutateurs Dk4, Dk5, Dk6 et Dk7 sont fermés, en revanche les commutateurs Dk1, Dk2, Dk3 et Dk8 sont ouverts, alors là si on fait la loi des mailles on trouve que la tension de la phase A à la sortie de l'onduleur  $V_{ao}$  a une valeur négative égale à la tension aux bornes du condensateur C3 du bus continu, donc  $V_{ao} = -\frac{V_{dc}}{4}$ .

- Cinquième séquence : Génération du niveau  $-\frac{V_{dc}}{2}$

Durant cette séquence, les commutateurs Dk1, Dk2, Dk3 et Dk4 sont ouverts, en revanche les commutateurs Dk5, Dk6, Dk7 et Dk8 sont fermés, alors si on fait la loi des mailles on trouve que la tension simple de la phase A à la sortie de l'onduleur  $V_{ao}$  a une valeur

négative égale à la somme des tensions aux bornes des deux condensateurs  $C_3$  et  $C_4$  du bus continu, donc  $V_{ao} = -\frac{V_{dc}}{2}$ .

### 5.2.2 – Onduleurs multiniveaux à condensateurs flottants FC

Dans cette topologie, on ne trouve pas les diodes de bouclage, mais on trouve des condensateurs qui ont pour rôle de réduire le problème d'équilibre de la tension.

Cette topologie d'onduleur présente aussi des points forts, on peut citer les avantages suivants :

- Même tension de blocage pour tous les commutateurs.
- Pas de problème de déséquilibre des tensions aux bornes des condensateurs.

Néanmoins, il y a toujours quelques points faibles qui doivent être explorés, on cite :

- Complexité au contrôle du circuit entier ajouté par le contrôle du condensateur de la charge.
- Cette topologie présente un potentiel de résonance parasite entre les condensateurs découplés.
- Exigence d'un nombre de condensateurs plus élevé que celui de la topologie de l'onduleur NPC.

Chaque bras d'un onduleur de cette topologie de N niveaux est constitué par  $N(N-1)/2$  condensateurs,  $2(N-1)$  commutateurs de type transistors bipolaires à grille isolée IGBT. Si on désigne par  $V_{dc}$  la tension qui est appliquée à l'entrée de l'onduleur. Donc la tension aux bornes de chaque condensateur du bus continu est égale à  $V_{dc}/(N-1)$ .

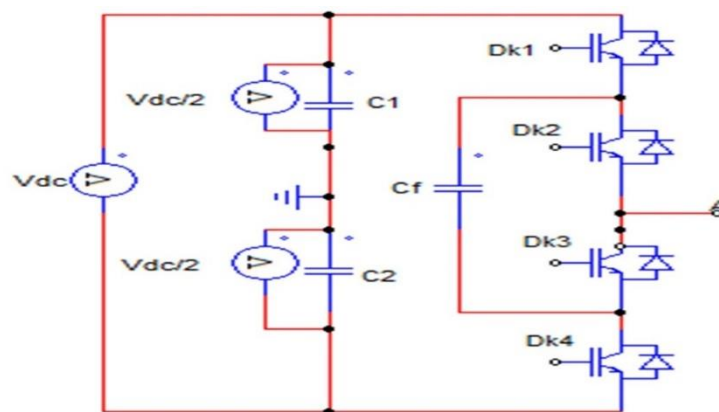
Le tableau suivant nous résume le nombre des différents composants qui constituent l'onduleur multiniveaux type FC.

**Tableau 5.2 : Nombre des composants constituant l'onduleur multiniveaux FC**

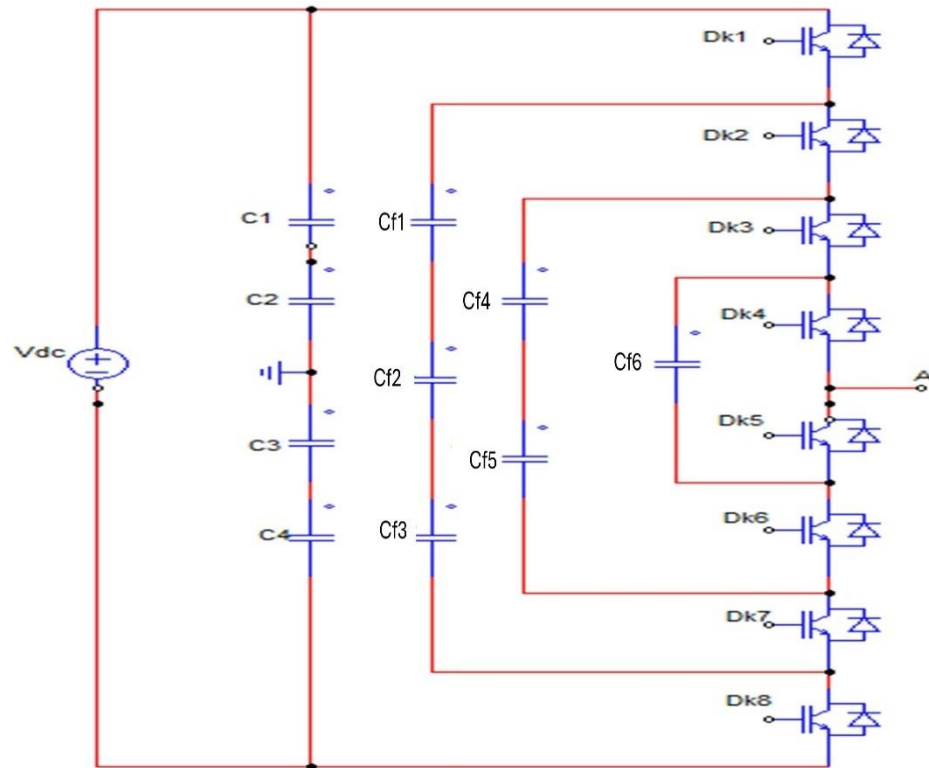
		Nombre de composants			
		Commutateur	Condensateurs flottants	Condensateur de bus continus	Source de tension
Topologie	Onduleur FC 3N	12	3	2	1
	Onduleur FC 5N	24	18	4	1

La figure 5.3 illustre la structure d'un bras d'onduleur triphasé à trois niveaux type FC, réalisée sur le logiciel PSIM [37].

La figure 5.4 illustre la structure d'un bras d'onduleur triphasé à cinq niveaux type FC, réalisée sur le logiciel PSIM [37].



**Figure 5.3 : Circuit d'un seul bras d'onduleur trois niveaux FC [37]**



**Figure 5.4 : Circuit d'un seul bras d'onduleur cinq niveaux FC [37]**

### 5.2.2.1 – Principe de fonctionnement d'un onduleur à trois niveaux

La tension aux bornes de chaque condensateur du bus continu est égale à  $\frac{V_{dc}}{2}$

La tension aux bornes du condensateur  $C_{f1}$  est égale à  $\frac{V_{dc}}{2}$  :  $V_{Cf1} = \frac{V_{dc}}{2}$ . Le principe de fonctionnement de cette topologie d'onduleur est presque le même que le principe de fonctionnement d'un onduleur NPC, il se résume en trois séquences qui sont les suivantes.

- Première séquence : Génération du niveau  $\frac{V_{dc}}{2}$

Dans cette séquence, les commutateurs Dk1 et Dk2 sont fermés, Dk3 et Dk4 sont ouverts, alors d'après la loi des mailles la tension de la phase A à la sortie de l'onduleur  $V_{ao}$  est égale à  $\frac{V_{dc}}{2}$ .

➤ Deuxième séquence : Génération du niveau zéro

Pendant cette séquence, les commutateurs Dk2 et Dk4 sont fermés, Dk1 et Dk3 sont ouverts, alors d'après la loi des mailles la tension de la phase A à la sortie de l'onduleur  $V_{ao}$  est égale à la tension aux bornes du condensateur flottant  $V_{cf}$ .

$$V_{ao} + V_{cf} = \frac{V_{dc}}{2} \text{ ce qui donne } V_{ao} = \frac{V_{dc}}{2} - V_{cf}$$

$$\text{Avec } V_{cf} = \frac{V_{dc}}{2} \text{ ce qui donne } V_{ao} = 0.$$

➤ Troisième séquence : Génération du niveau  $-\frac{V_{dc}}{2}$  :

Pendant cette séquence, les commutateurs Dk3 et Dk4 sont fermés, Dk1 et Dk2 sont ouverts, alors suivant la loi des mailles, la tension de la phase A à la sortie de l'onduleur  $V_{ao}$  est  $-\frac{V_{dc}}{2}$ .

#### 5.2.2.2 – Principe de fonctionnement d'un onduleur FC à cinq niveaux

La tension aux bornes de chaque condensateur du bus continu est égale à  $\frac{V_{dc}}{4}$ .

La tension aux bornes de chaque condensateur  $C_f$  est égale à  $\frac{V_{dc}}{4}$ .

Le principe de fonctionnement de cette topologie d'onduleur se résume en cinq séquences qui sont les suivantes :

- Première séquence : Génération du niveau  $\frac{V_{dc}}{2}$

Durant cette séquence, les commutateurs Dk1, Dk2, Dk3 et Dk4 sont fermés, en revanche, les commutateurs Dk5, Dk6, Dk7 et Dk8 sont ouverts, alors la si on fait la loi des mailles on trouve que la tension simple de la phase A à la sortie de l'onduleur  $V_{ao}$  est égale à la somme des tensions aux bornes des condensateurs du bus continu. Donc  $V_{ao} = \frac{V_{dc}}{2}$ .

- Deuxième séquence : Génération du niveau  $\frac{V_{dc}}{4}$

Dans cette séquence, les commutateurs Dk2, Dk3, Dk4 et Dk8 sont fermés, en revanche, les commutateurs Dk5, Dk6, Dk7 et Dk1 sont ouverts, alors la si on fait la loi des mailles on trouve que la tension simple de la phase A à la sortie de l'onduleur  $V_{ao} = \frac{V_{dc}}{2} - V_{cf1}$  avec  $V_{cf1} = 3 \times \frac{V_{dc}}{4}$ . Donc  $V_{ao} = \frac{V_{dc}}{4}$ .

- Troisième séquence : Génération du niveau zéro

Pendant cette séquence, les commutateurs Dk3, Dk4, Dk8 et Dk7 sont fermés, en revanche, les commutateurs Dk1, Dk2, Dk5 et Dk6 sont ouverts, alors la phase A à la sortie de l'onduleur a une valeur nulle  $V_{ao}=0$ .

- Quatrième séquence : Génération du niveau  $-\frac{V_{dc}}{4}$

Pendant cette séquence, les commutateurs Dk4, Dk8, Dk7 et Dk6 sont fermés, en revanche, les commutateurs Dk1, Dk2, Dk3 et Dk5 sont ouverts, alors là si on fait la loi des mailles on trouve que la tension simple de la phase A à la sortie de l'onduleur  $V_{ao}$  a une valeur négative.

$$\text{Donc } V_{ao} = -\frac{V_{dc}}{4}.$$

➤ Cinquième séquence : Génération du niveau  $-\frac{V_{dc}}{2}$

Durant cette dernière séquence, les commutateurs Dk1, Dk2, Dk3 et Dk4 sont ouverts, en revanche, les commutateurs Dk5, Dk6, Dk7 et Dk8 sont fermés, alors si on fait la loi de mail on trouve que la tension simple de la phase A à la sortie de l'onduleur  $V_{ao}$  a une valeur négative égale à la tension aux bornes du condensateur  $C_2$  du bus continu.

$$\text{Donc } V_{ao} = -\frac{V_{dc}}{2}.$$

### 5.2.3 – Onduleurs multiniveaux en pont H cascades

La topologie des onduleurs multiniveaux en ponts H cascades appelée CHB (Cascade H-Bridge) est une nouvelle structure, elle est basée sur la mise en série de plusieurs ponts à deux niveaux monophasés qui sont alimentés séparément par des sources de tension continues, les sources doivent être galvaniquement isolées les unes des autres dont le but est d'éviter le court-circuit lors de leur mise en série.

Comme toutes les autres structures, la topologie de l'onduleur CHB présente des points forts, on peut citer :

- Nombre de composants réduit par rapport aux autres topologies.
- Absence des diodes.
- La tension de sortie totale d'une phase est égale à la somme des tensions produites par chaque onduleur monophasé.

Chaque bras d'un onduleur de cette topologie de N niveaux est constitué par  $2(N-1)$  commutateurs qui sont unidirectionnels en tension et bidirectionnels en courant, de types

transistors bipolaires à grille isolée IGBT [37]. Si on désigne par  $V_{dc}$  la tension qui est appliquée à l'entrée d'un pont H, donc la tension aux bornes de chaque condensateur du bus continu y appliquée est égale à  $V_{dc}$ .

Le tableau suivant nous résume le nombre des différents composants qui constituent l'onduleur multiniveaux type CHB.

**Tableau 5.3 : Nombre des composants constituant l'onduleur multiniveaux CHB**

		Nombre de composants		
		Commutateur	Condensateur de bus continu	Source de tension
Topologie	Onduleur CHB 3N	12	3	3
	Onduleur CHB 5N	24	6	6

La figure 5.5 illustre la structure d'un bras d'onduleur à trois niveaux type CHB réalisé sur le logiciel PSIM [37].

La figure 5.6 illustre la structure d'un bras d'onduleur à cinq niveaux type CHB réalisée sur le logiciel PSIM [37].

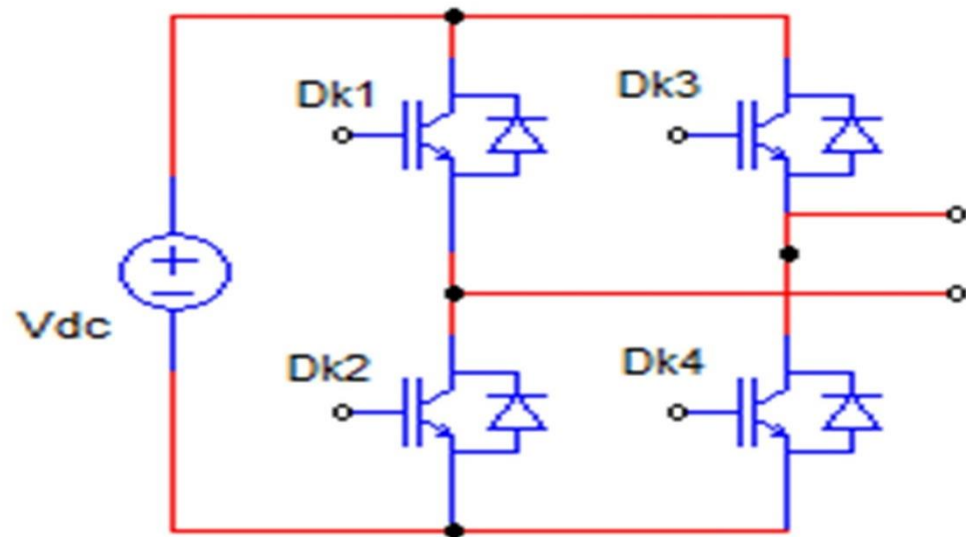


Figure 5.5 : Circuit d'un seul bras d'onduleur trois niveaux CHB [37]

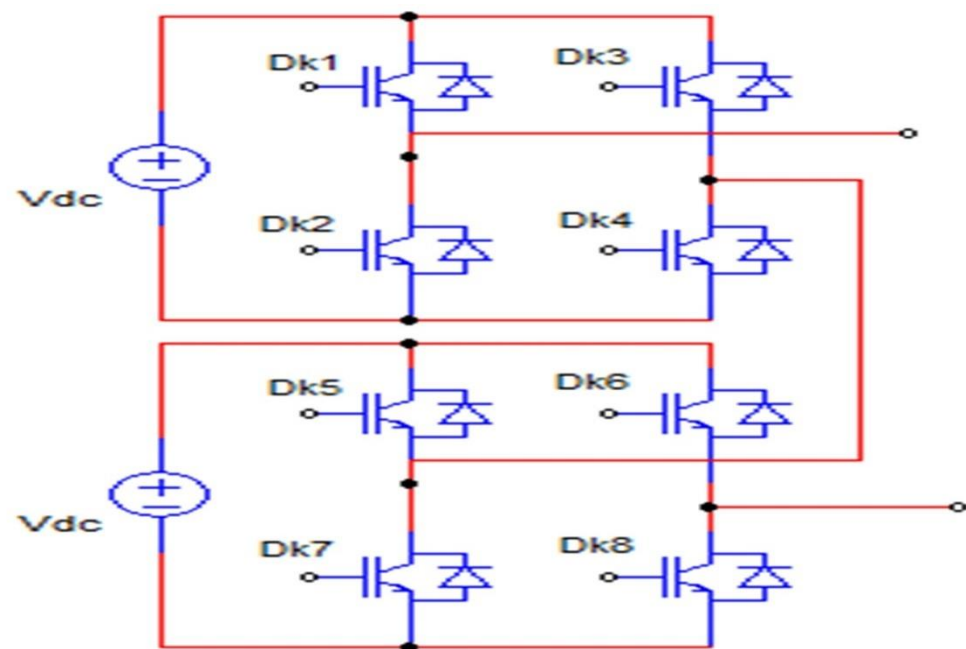


Figure 5.6 : Circuit d'un seul bras d'onduleur cinq niveaux CHB [37]

### 5.2.3.1 – Principe de fonctionnement d'un onduleur CHB à trois niveaux

Le principe de fonctionnement de cette topologie d'onduleur est presque le même que celui de la topologie NPC à trois niveaux, il se résume en trois séquences qui sont les suivantes :

- Première séquence : Pour la génération du niveau maximum ( $V_{ao}=V_{dc}$ )

Pendant cette séquence, les commutateurs Dk1 et Dk4 sont fermés, Dk2 et Dk3 sont ouverts, alors la tension de la phase A à la sortie de l'onduleur  $V_{ao}$  est égale à  $V_{dc}$ .

- Deuxième séquence : : Pour la génération du niveau zéro ( $V_{ao}=0$ )

Pendant cette séquence, les commutateurs Dk2 et Dk4 sont fermés, Dk1 et Dk3 sont ouverts, alors la phase à la sortie de l'onduleur est connectée directement à la masse (point de référence) via les commutateurs D<sub>k4</sub> et D<sub>k2</sub>, donc  $V_{ao}$  est égale à zéro.

- Troisième séquence : Pour générer le niveau bas ( $V_{ao}=-V_{dc}$ )

Pendant cette séquence, les commutateurs Dk2 et Dk3 sont fermés, Dk1 et Dk4 sont ouverts, alors suivant la loi des mailles, la tension de la phase A à la sortie de l'onduleur  $V_{ao}$  est égale à la tension  $V_{dc}$  en valeur négative, donc  $V_{ao} = -V_{dc}$ .

### 5.2.3.2 – Principe de fonctionnement d'un onduleur CHB à cinq niveaux

Le principe de fonctionnement de cette topologie d'onduleur se résume en cinq séquences qui sont les suivantes :

- Première séquence : Génération du niveau  $2 \times V_{dc}$

Durant cette séquence, les commutateurs Dk1, Dk4, Dk5 et Dk8 sont fermés, en revanche, les commutateurs Dk2, Dk3, Dk6 et Dk7 sont ouverts, alors la si on fait la loi des mailles

on trouve que la tension simple de la phase A à la sortie de l'onduleur  $V_{ao}$  a une valeur négative égale à la somme des deux tensions d'alimentation des ponts.

$$\text{Donc } V_{ao} = -2 \times V_{dc}.$$

### 5.3 – La modulation sinus-triangle (MLI sinusoïdale)

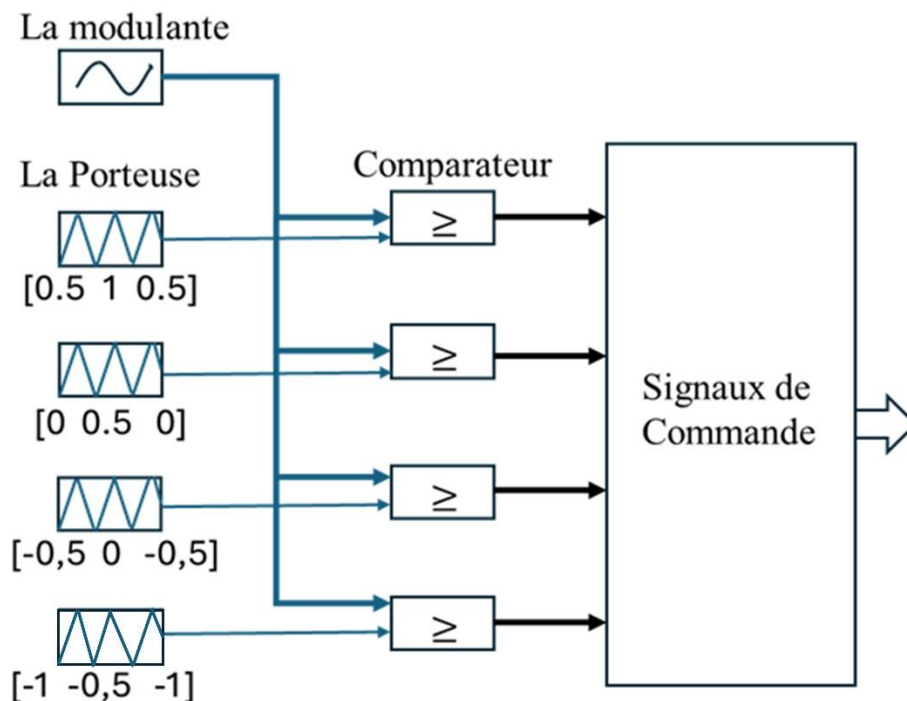
La technique de modulation de largeur d'impulsion MLI, appelée en anglais Pulse Width Modulation PWM, a comme principe l'adoption d'une fréquence de commutation plus haute à celle des grandeurs de sortie et la formation de chaque alternance de la tension de sortie d'une succession de créneaux de largeur désirée.

Le but de l'utilisation de cette technique est d'avoir à la sortie de l'onduleur une tension qui a une forme d'onde proche de la sinusoïde par le contrôle de l'évolution du rapport cyclique, et d'imposer à l'entrée de l'onduleur un courant de type continu avec des composantes alternatives d'amplitudes réduites et de fréquences élevées [48].

Il existe de nombreuses techniques de modulation de largeur d'impulsion MLI (PWM), les plus connus sont :

- La technique de modulation de largeur d'impulsion MLI à onde carrée ou commande à 180°.
- La technique de modulation de largeur d'impulsion MLI sinusoïdale (SPWM).
- La technique de modulation de largeur d'impulsion MLI par hystérésis (Bang-Bang).
- La technique de modulation de largeur d'impulsion MLI par injection du troisième harmonique.

La technique de modulation de largeur d'impulsion MLI sinusoïdale SPWM est la technique la plus utilisée parmi les autres techniques de commande d'onduleurs multiniveaux, elle est utilisée pour synthétiser des signaux sinusoïdaux à partir de signaux continus, son schéma de principe pour la commande d'un onduleur cinq niveaux est représentée par la figure 5.7 [48]:



**Figure 5.7 : Schéma de principe de la technique MLI sinusoïdale d'un Bras d'onduleur cinq niveaux [48]**

Pour générer les impulsions de commande de modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale d'un convertisseur à N niveaux de tensions, on utilise une seule forme d'onde modulante avec un nombre de (N-1) porteuses triangulaires. Ces porteuses disposent d'une même amplitude  $V_p$  et une même fréquence  $f_p$ . Par exemple, dans un onduleur à 5 niveaux,

4 signaux porteurs sont utilisés pour appliquer ce type de technique de modulation comme montre la figure 5.7.

Son principe consiste à comparer le signal de la modulante (le signal à synthétiser) aux porteuses généralement triangulaires. Le signal de sortie change donc d'état à chaque intersection de la modulante et de la porteuse. Chaque comparaison donne la valeur 1 si à l'intersection l'amplitude de la modulante est supérieure ou égale à celui de la porteuse, et 0 dans le cas contraire [48].

Parmi les avantages de la modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale MLI, on peut citer : [48].

- Très large plage de la fréquence de sortie commandée.
- La valeur efficace du signal de sortie peut être commandée de 0 à 1.
- Les harmoniques à des fréquences élevées (multiples de la porteuse) sont repoussés ce qui facilite grandement le filtrage.

Dans les paramètres de réglage de la modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale MLI, deux grandeurs sont définies, tel que :

- L'indice de modulation  $m_a$  qui est égal au rapport de l'amplitude de la modulante divisé par l'amplitude de la porteuse  $A_p$ .

$$m_a = \frac{A_m}{A_p} \quad (5.1)$$

- L'indice de fréquence  $m_f$  qui est égale au rapport de la fréquence de la porteuse  $f_p$  divisé par la fréquence du signal de la modulante  $f_m$ .

$$m_f = \frac{f_p}{f_m} \quad (5.2)$$

Parmi les types de la technique de la modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale MLI, on trouve [49]:

- Modulation MLI à disposition de phase : Cette technique est la plus utilisée pour la commande des onduleurs multiniveaux puisqu'elle est simple à implémenter et elle présente le plus faible taux d'harmoniques (TDH) pour les valeurs de l'indice de modulation proches de 1 par rapport aux autres techniques de modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale. Elle dispose des porteuses identiques en phase, de même amplitude et même fréquence [49].
- Modulation MLI à disposition opposition de phase : Cette technique est caractérisée par une fréquence porteuse et ses multiples qui ne disposent pas d'harmoniques vu que la dispersion des harmoniques se produit autour d'eux. Elle dispose des porteuses identiques de même amplitude et même fréquence, mais les porteuses de l'alternance négative sont inversées aux porteuses de l'alternance positive [49].
- Modulation MLI à disposition opposition alternance de phase (DOAPPWM):  
 Cette technique est caractérisée par des harmoniques significatives qui se produisent autour de la fréquence porteuse pour les formes d'onde de tension de phase et de ligne. Elle dispose des porteuses identiques de même amplitude et même fréquence, mais qui sont déphasées l'une à l'autre de 180° [49].

#### 5.4 – Simulation des structures des onduleurs multiniveaux triphasés

Dans cette partie, nous allons modéliser et simuler sur MATLAB/Simulink les trois topologies d'onduleur à trois niveaux et à cinq niveaux. Ces onduleurs sont alimentés par une source continue de valeur 300 V et ils vont alimenter une charge composée d'une résistance de valeur  $R=20\ \Omega$  et une inductance de valeur  $L=60\ \text{mH}$ .

La commande PDWM a été retenue parmi les techniques de modulation sinusoïdale (SPWM) pour commander les onduleurs dans notre travail, car elle est simple à implémenter dans MATLAB/Simulink, elle offre le plus faible taux de distorsion harmonique pour des indices de modulation proche de 1, garantir une distribution symétrique des tensions de commutation entre les différents niveaux et elle est la méthode la plus adaptée aux onduleurs multiniveaux pour les applications photovoltaïques connectées au réseau, grâce à sa stabilité et son bon équilibre du point neutre [50].

On choisira comme indice de modulation  $m_a=1$  qui correspond à la limite de la zone linéaire de la modulation MLI. Ce choix permet d'obtenir la tension de sortie maximale sans déformation, de minimiser naturellement le THD et d'éviter la surmodulation qui introduit des harmoniques supplémentaires. On peut dire alors que ce réglage est donc théoriquement optimal pour évaluer les performances des onduleurs sans altération artificielle du signal [51].

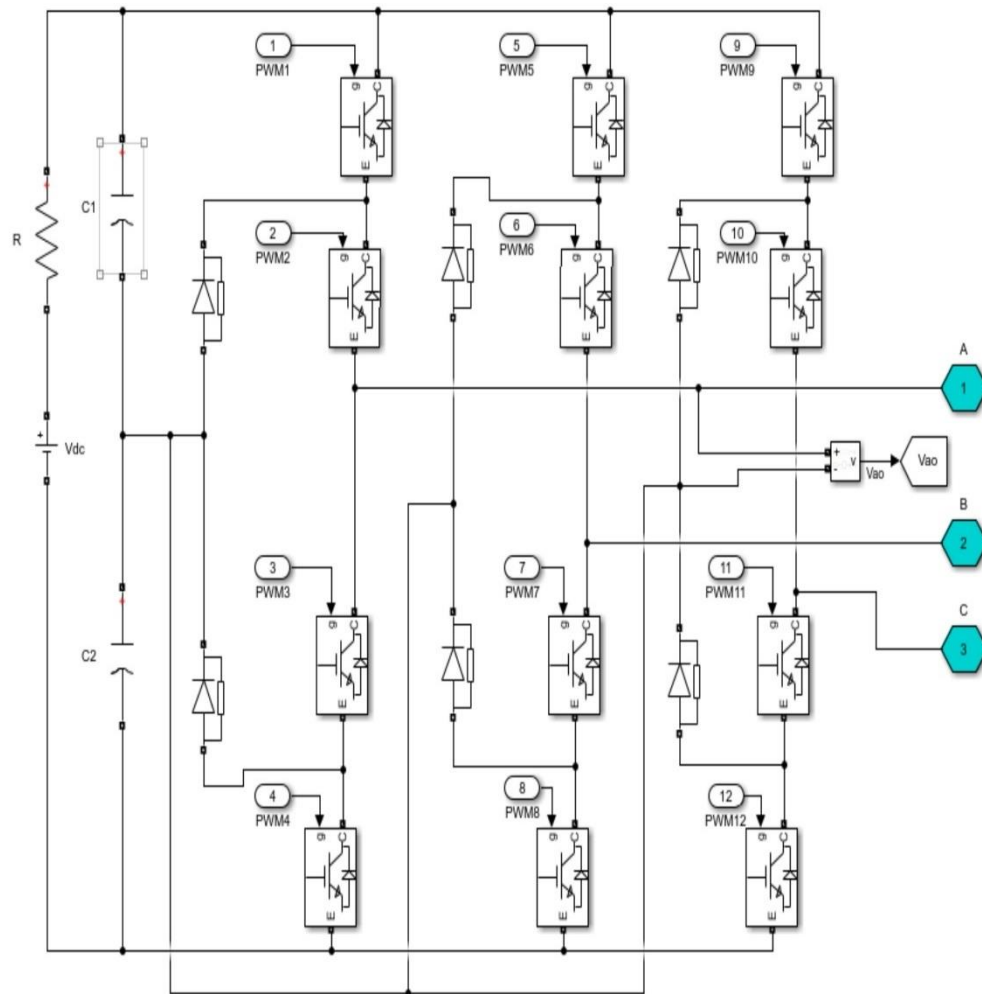
On choisira un indice de fréquence  $m_f=39$ , ce choix donne une fréquence de commutation élevée pour générer une tension de sortie plus proche possible d'un signal sinusoïde, réduire d'une manière significative les harmoniques de basse fréquence et un THD faible, tout en maintenant des pertes de commutation modérées [52].

Le choix d'un indice  $m_f=39$ , qui est un nombre impair et multiple de trois pour un système triphasé, permet d'obtenir une meilleure symétrie du spectre harmonique et de limiter l'apparition d'harmoniques de basse fréquence dans la tension de sortie. Cette valeur offre donc un bon compromis entre la qualité du signal, la réduction du THD et la limitation des pertes de commutation, ce qui la rend adaptée à l'étude des performances des onduleurs multiniveaux dans les applications photovoltaïques.

On choisira un signal modulant sinusoïdal d'amplitude 1V et de fréquence 60Hz qui représente la tension alternative idéale à reproduire et une porteuse d'amplitude 1V et de fréquence 39 fois la fréquence de la modulante, ce qui donne une fréquence de 2340 Hz [53].

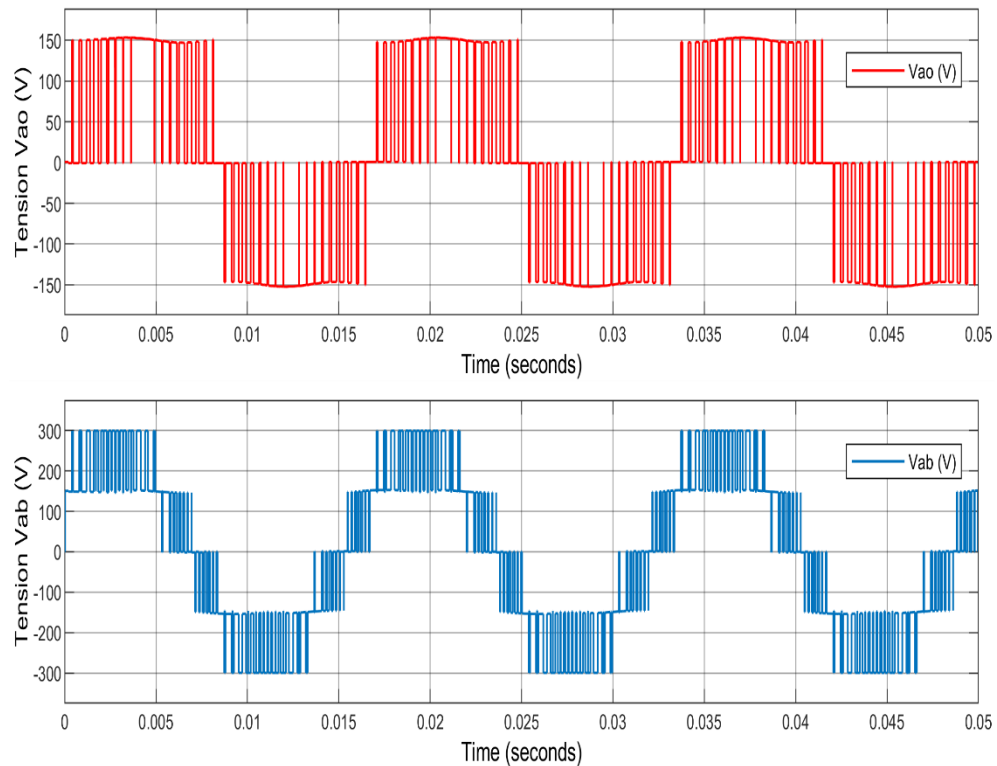
#### ***5.4.1 – Simulation d'un onduleur triphasé NPC trois niveaux***

Le circuit modélisé sur MATLAB/Simulink d'un onduleur NPC 3-niveaux est présenté par la figure 5.8 :



**Figure 5.8 : Circuit modélisé sur MAT LAB/Simulink d'un onduleur NPC3**

Après simulation de ce circuit, on a obtenu les caractéristiques de la figure 5.9 qui représentent les formes d'ondes des signaux de la tension simple entre phase et neutre  $V_{ao}$ , la tension composée entre deux phases  $V_{ab}$ .



**Figure 5.9 : Signaux des tensions de sortie  $V_{ao}$  et  $V_{ab}$  de l'onduleur NPC3**

On remarque que la tension  $V_{ao}$  évolue par paliers discrets à trois niveaux :  $\frac{V_{dc}}{2}$ , 0 et  $-\frac{V_{dc}}{2}$ .

Cette structure traduit clairement le fonctionnement du bras d'onduleur NPC, où les diodes de bouclage assurent la répartition équilibrée de la tension du bus continu sur les interrupteurs. Le signal présente une fréquence de commutation élevée, correspondant à la fréquence des porteuses utilisées dans la modulation.

La tension composée  $V_{ab}$  résulte de la différence entre deux tensions simples déphasées de  $120^\circ$ . On observe que sa forme d'onde est plus lissée et se rapproche d'une sinusoïde, ce qui confirme l'efficacité du principe de superposition entre les phases. L'amplitude de

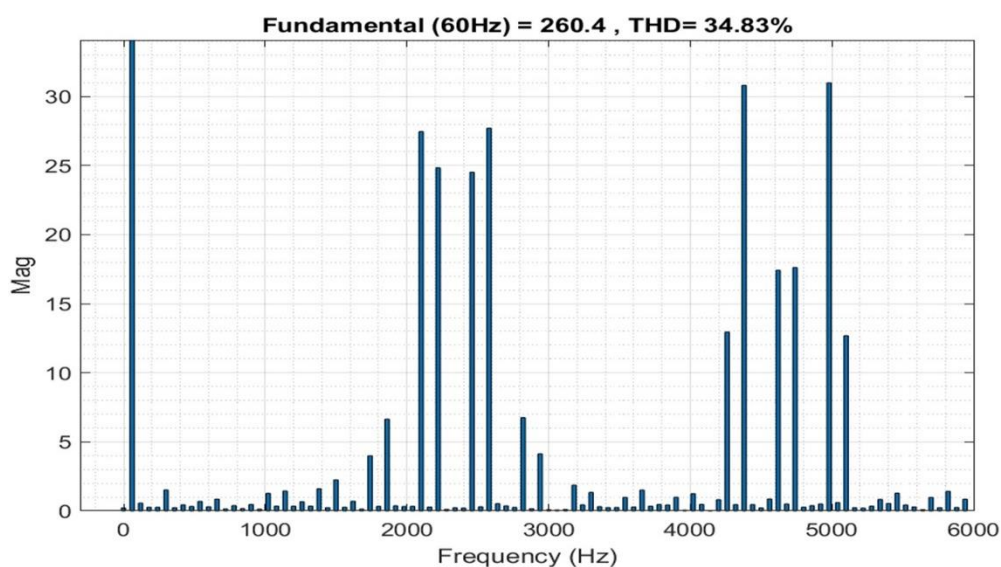
$V_{ab}$  atteint environ 300 V, soit le double de celle de  $V_{ao}$ , conformément à la théorie des systèmes triphasés.

La présence de plusieurs paliers dans la tension de ligne démontre la capacité de la topologie multiniveaux à réduire la distorsion harmonique totale (THD) par rapport à un onduleur deux niveaux classique. Cette réduction des harmoniques permet une tension de sortie plus proche d'une sinusoïde idéale, améliorant ainsi la qualité de l'énergie injectée au réseau et diminuant les besoins en filtrage.

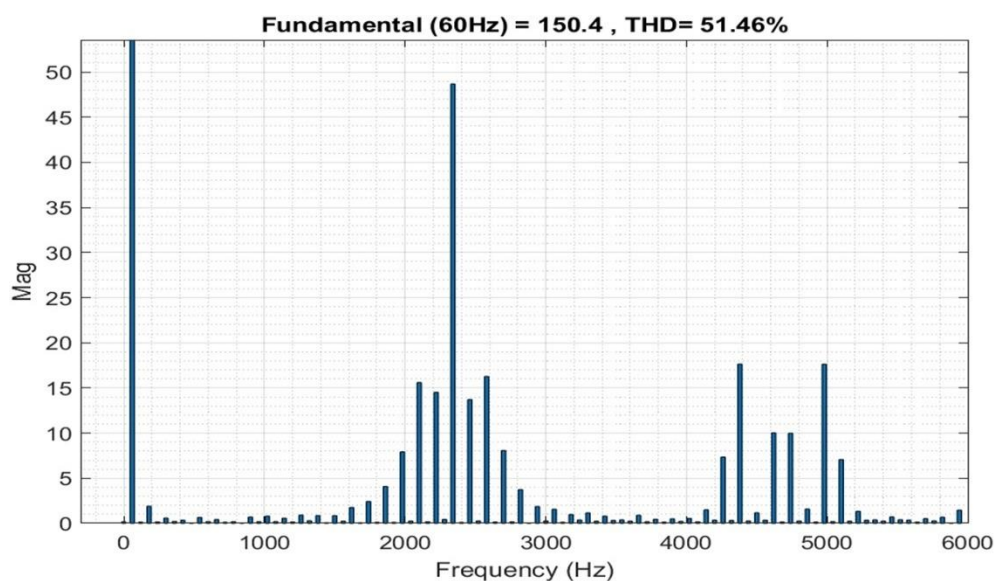
En conclusion, cette simulation valide le bon fonctionnement du convertisseur NPC à trois niveaux :

- La tension  $V_{ao}$  présente trois niveaux distincts symétriques ;
- La tension  $V_{ab}$  donne une forme d'onde quasi sinusoïdale avec une amplitude correcte ;
- La commutation se fait de manière équilibrée, ce qui garantit un THD faible et un bon rendement pour les applications PV connectées au réseau.

L'analyse spectrale de cette simulation conduit aux résultats présentés aux figures 5.10 et 5.11, lesquelles illustrent les spectres harmoniques de la tension composée entre deux phases  $V_{ao}$ .



**Figure 5.10 : Spectre harmonique de la tension  $V_{ab}$  à la sortie de l'onduleur NPC3**



**Figure 5.11 : Spectre harmonique de la tension  $V_{ao}$  à la sortie de l'onduleur NPC3**

Le spectre harmonique de la tension composée  $V_{ab}$  dans la figure 5.10 montre une composante fondamentale d'amplitude 260,4 V à la fréquence 60 Hz, avec un THD de 34,83 %. Les harmoniques dominantes sont situées entre 2 kHz et 5 kHz, correspondant

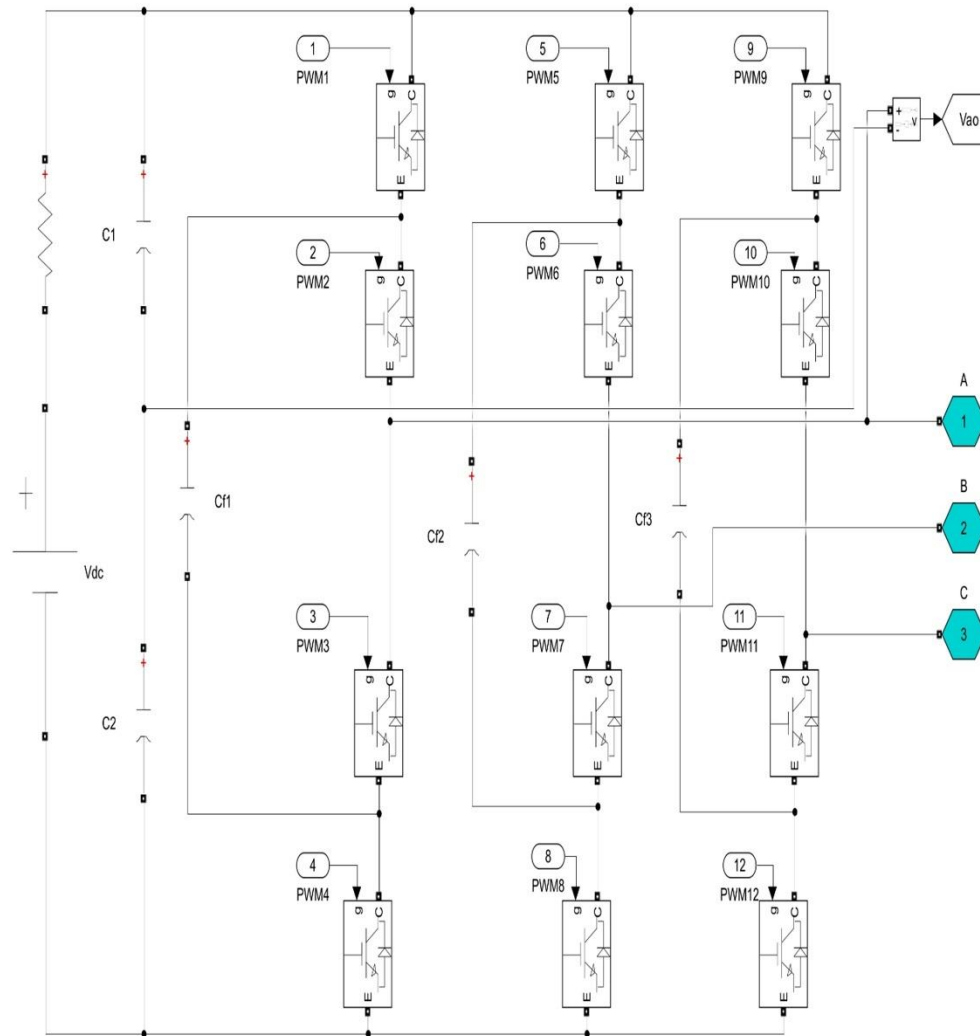
aux multiples de la fréquence de commutation. Les composantes de hautes fréquences peuvent être aisément atténuées par un filtrage passif, ce qui confirme la bonne qualité de la tension composée générée par la topologie multiniveaux.

En revanche, la tension simple  $V_{ao}$  dans la figure 5.11 présente une composante fondamentale d'amplitude 150,4 V et un THD plus élevé de 51,46 %, indiquant une distorsion plus importante liée à la commutation directe des interrupteurs du bras d'onduleur. Ces harmoniques, également concentrées entre 2 kHz et 5 kHz, sont caractéristiques de la modulation PWM.

La comparaison des deux spectres montre que la tension composée  $V_{ab}$  est nettement plus sinusoïdale que la tension simple  $V_{ao}$ , grâce à la superposition des phases décalées de  $120^\circ$ . Cette propriété inhérente aux structures triphasées multiniveaux permet d'obtenir une tension de sortie plus lisse, un THD réduit, et donc une meilleure qualité de l'énergie injectée au réseau.

#### ***5.4.2 – Simulation d'un onduleur triphasé FC trois niveaux***

Le circuit modélisé sur MATLAB/Simulink d'un onduleur triphasé FC 3-niveaux est présenté par la figure 5.12 :



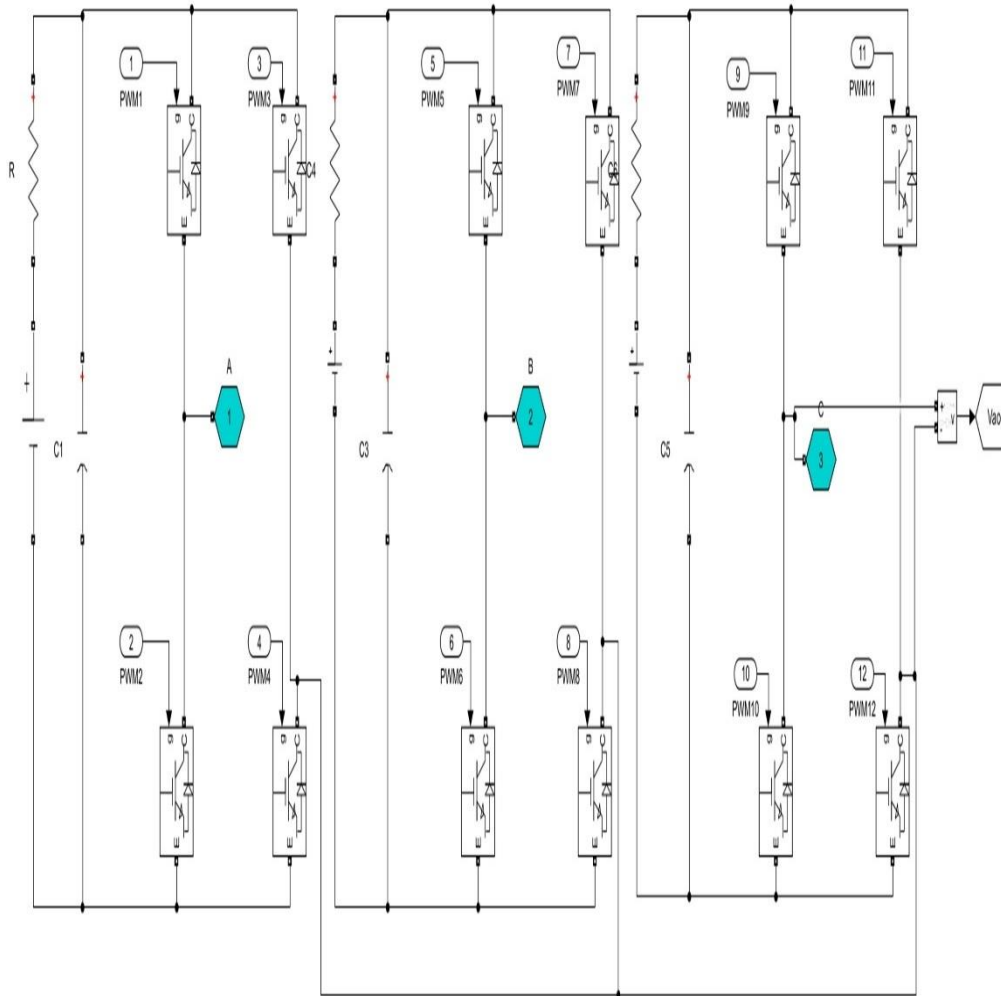
**Figure 5.12 : Circuit modélisé sur MATLAB/Simulink d'un onduleur FC3**

Après simulation de ce circuit, nous avons obtenu les mêmes formes d'ondes obtenus dans la simulation d'un onduleur NPC3. Les valeurs de THD,  $I_a$ ,  $V_{ao}$  et  $V_{ab}$  sont présentés dans le tableau 5.4.

#### **5.4.3 – Simulation d'un onduleur triphasé CHB3**

Le circuit modélisé sur MATLAB/Simulink d'un onduleur triphasé CHB 3-niveaux est présenté par la figure 5.13 :

Contrairement aux deux topologies précédentes, chaque bras de l'onduleur a sa propre source d'alimentation qui est égale à 150V.



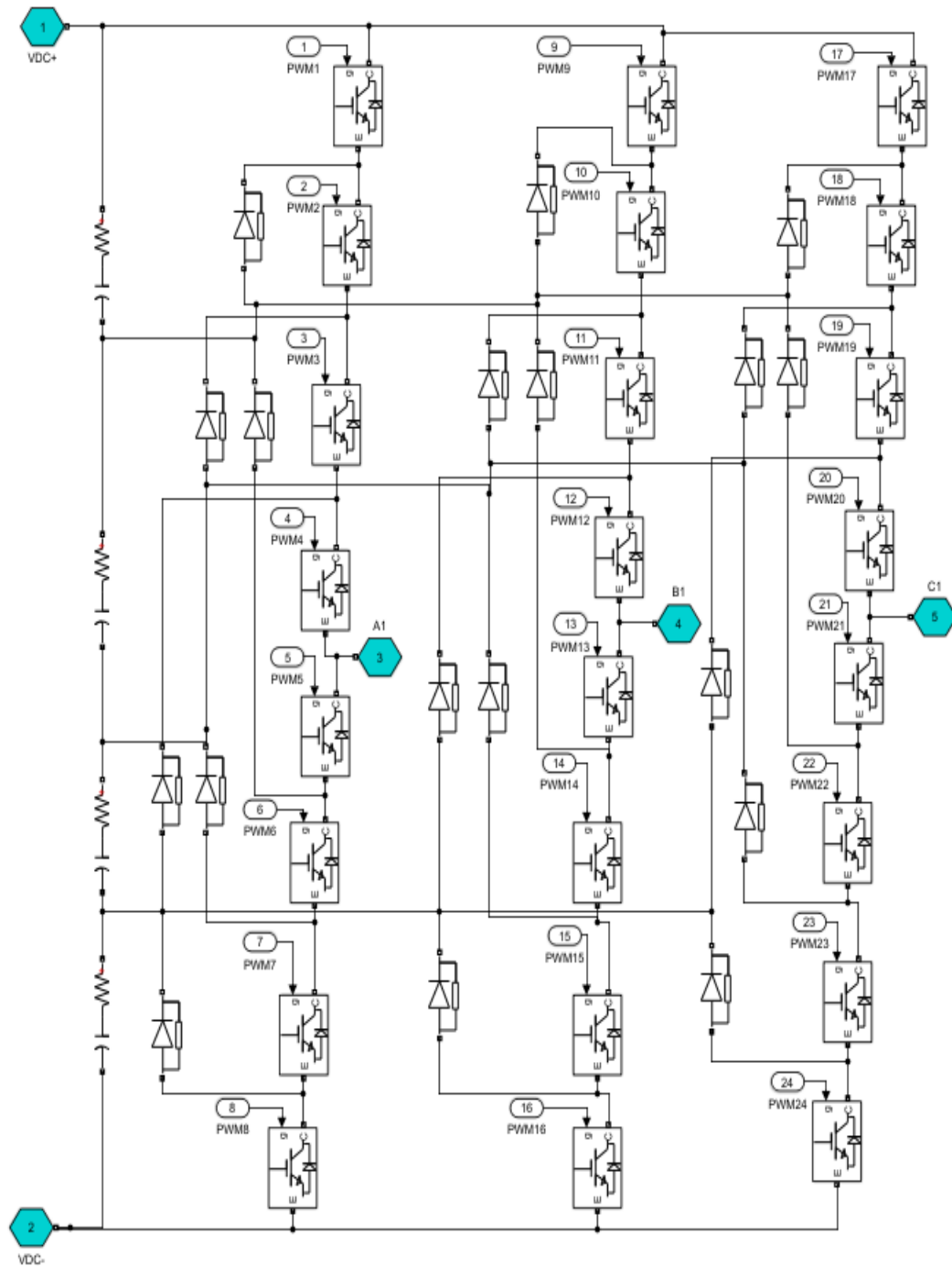
**Figure 5.13 : Circuit modélisé sur MATLAB/Simulink d'un onduleur CHB3**

Après simulation de ce circuit, nous avons obtenu les mêmes formes d'ondes obtenues dans la simulation d'un onduleur NPC3.

#### **5.4.4 – Simulation d'un onduleur triphasé NPC5**

Le circuit modélisé sur MATLAB/Simulink d'un onduleur triphasé NPC 5-niveaux est présenté par la figure 5.14 :

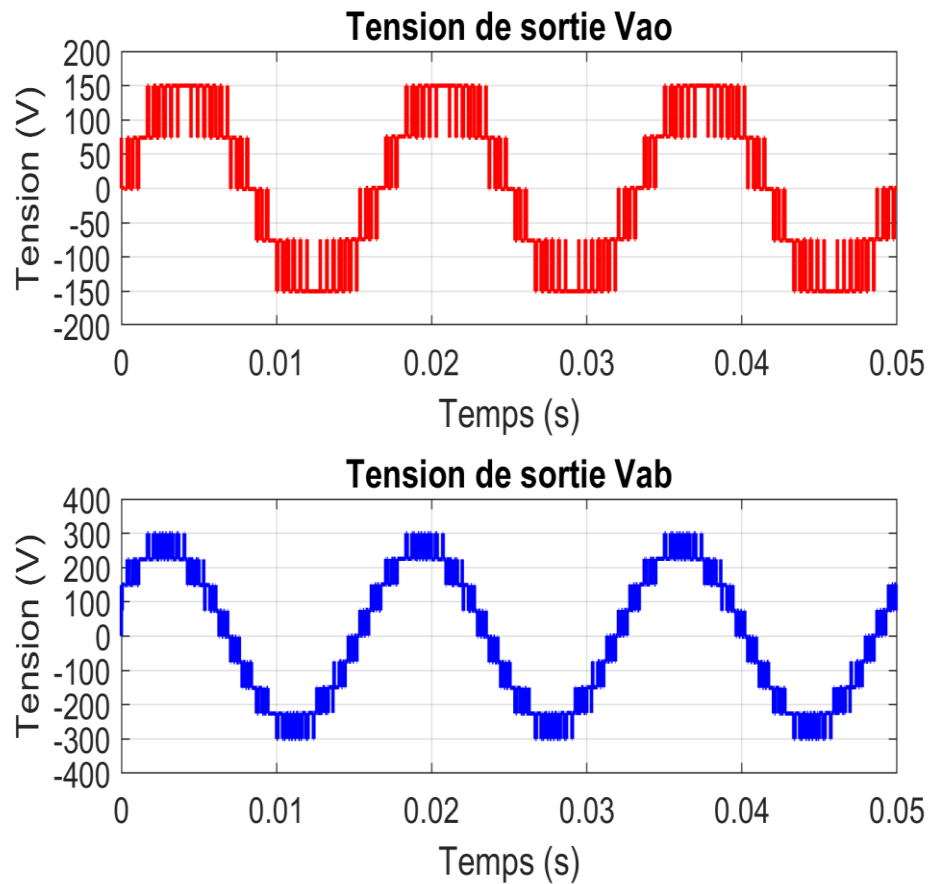
Contrairement aux deux topologies précédentes, chaque bras de l'onduleur a sa propre source d'alimentation qui est égale à 150V.



**Figure 5.14 : Circuit modélisé sur MATLAB/Simulink d'un onduleur NPC5**

Après simulation de ce circuit, nous avons obtenu les mêmes formes d'ondes obtenus dans la simulation d'un onduleur NPC3.

Après simulation du circuit, nous avons obtenu les caractéristiques sur la figure 5.14 qui représentent les formes d'ondes des signaux de la tension simple de la phase A  $V_{ao}$  et la tension composée entre deux phases  $V_{ab}$ .



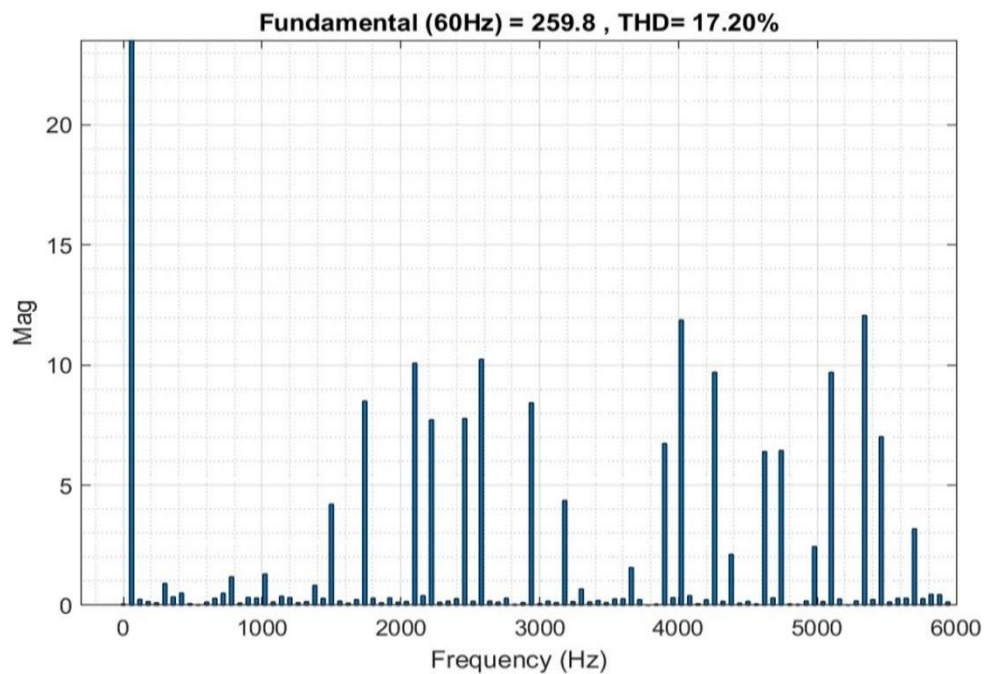
**Figure 5.15 : Signaux des tensions de sortie  $V_{ao}$  et  $V_{ab}$  de l'onduleur NPC5**

La tension composée  $V_{ab}$  se caractérise par une allure quasi sinusoïdale, avec une amplitude maximale d'environ 300 V, traduisant une excellente synthèse du signal alternatif. Les différents paliers de tension montrent la capacité de la structure

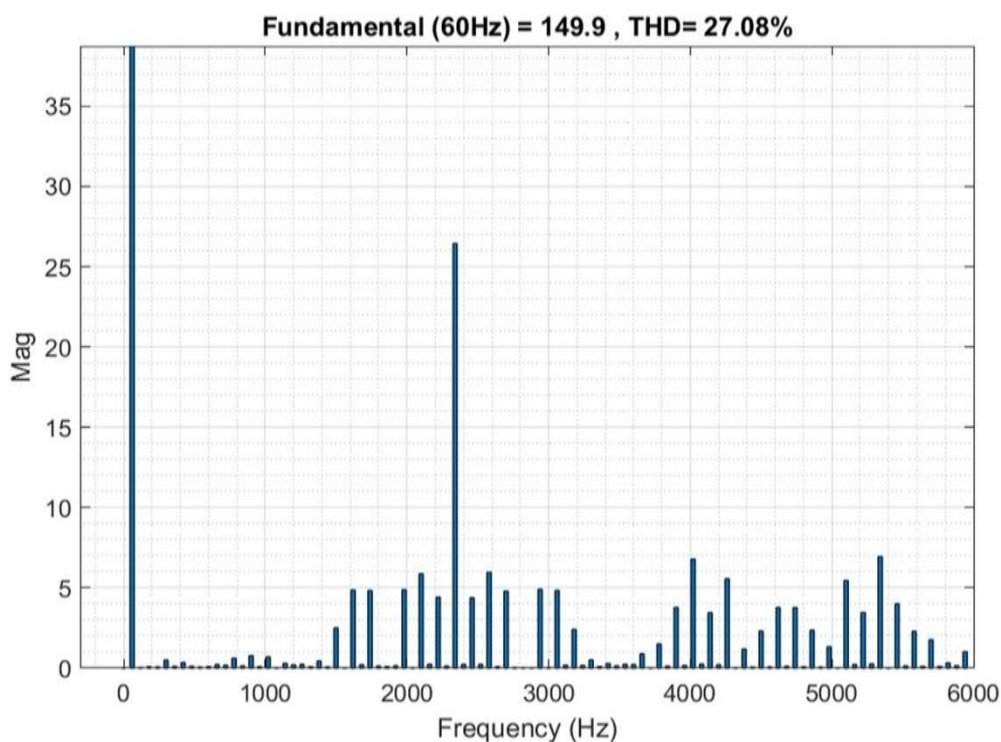
multiniveaux à approcher une sinusoïde tout en réduisant la distorsion harmonique. Cette régularité favorise une injection de puissance plus propre et minimise les pertes liées au filtrage.

La tension simple  $V_{ao}$ , de son côté, évolue entre  $\pm 150$  V suivant cinq niveaux distincts. Son aspect en escalier est typique du fonctionnement PWM, mais reste bien symétrique et stable autour de zéro. Cette configuration démontre une bonne répartition de la tension continue entre les différents condensateurs du bus CC et un équilibrage satisfaisant des commutations.

Si on fait l'analyse spectrale de cette simulation, on arrive aux résultats présentés par les figures 5.15 et 5.16 qui présentent les spectres harmoniques des signaux de la tension composée entre deux phases  $V_{ab}$  et la tension simple entre phase et neutre  $V_{ao}$ .



**Figure 5.16 : Spectre harmonique de la tension  $V_{ab}$  de l'onduleur NPC5**



**Figure 5.17 : Spectre harmonique de la tension  $V_{ao}$  de l'onduleur NPC5**

L'analyse fréquentielle des tensions de sortie  $V_{ab}$  et  $V_{ao}$  met en évidence une bonne amélioration de la qualité des signaux pour la topologie à cinq niveaux.

La tension composée  $V_{ab}$  dans la figure 5.15 présente une composante fondamentale d'amplitude 259,8 V à 60 Hz et un THD de valeur 17,20 %, ce qui confirme une bonne qualité de synthèse de la tension alternative. Les composantes harmoniques sont regroupées autour des multiples de la fréquence de commutation (entre 2 kHz et 5 kHz) et leur amplitude reste faible, facilitant leur élimination par filtrage.

De son côté, la tension simple  $V_{ao}$  dans la figure 5.16 affiche une composante fondamentale d'amplitude 149,9 V avec un THD de 27,08 %, traduisant un signal légèrement plus perturbé en raison des commutations directes au niveau du bras

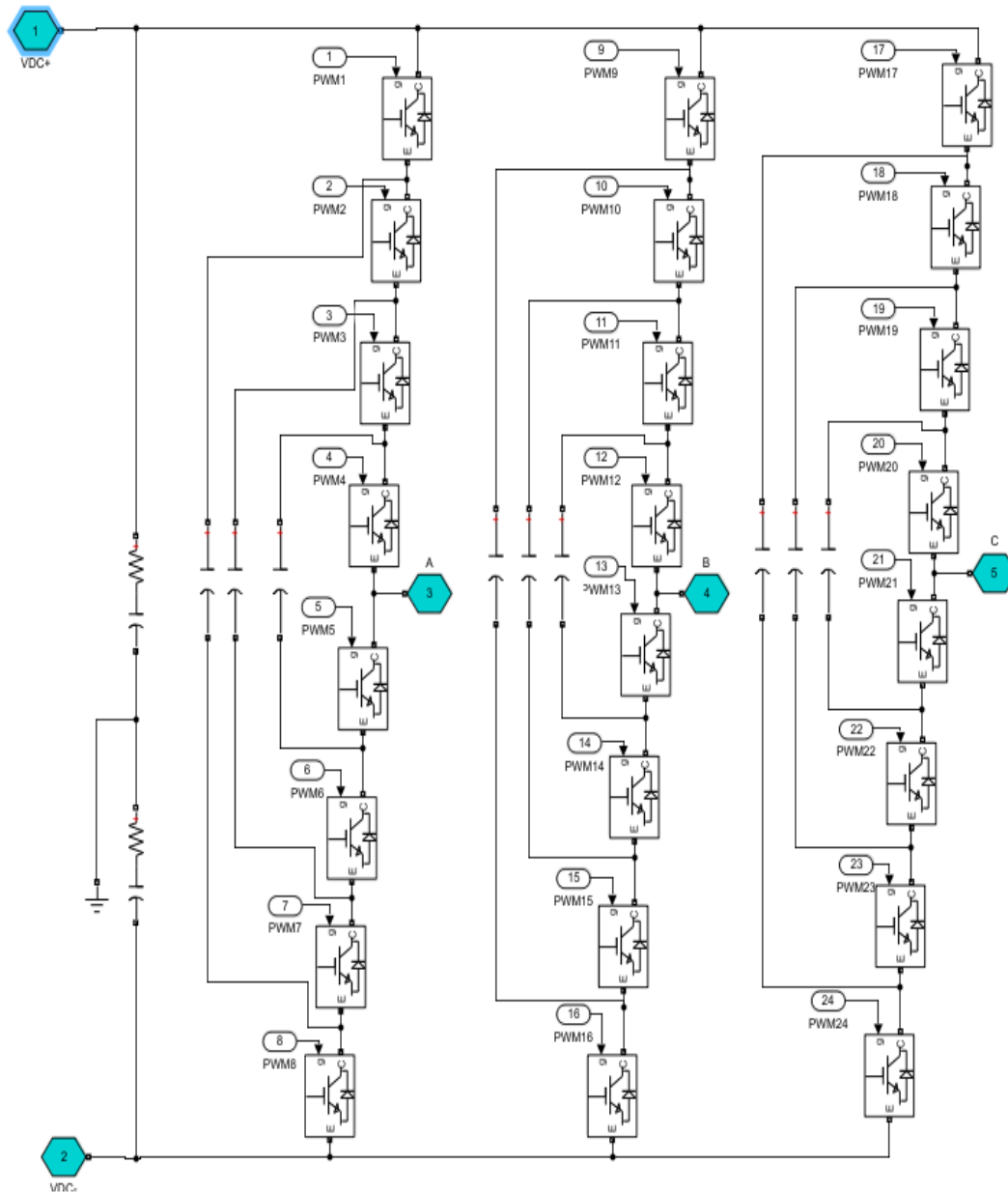
d'onduleur. Toutefois, cette distorsion demeure bien inférieure à celle du cas à trois niveaux, ce qui confirme la contribution positive de la structure à cinq niveaux à la réduction des harmoniques.

Ainsi, la tension  $V_{ab}$  se distingue par une forme d'onde plus régulière et une distorsion minimale, tandis que  $V_{ao}$  conserve quelques harmoniques résiduelles liées à la modulation MLI. Ces résultats démontrent que l'augmentation du nombre de niveaux de tension améliore considérablement la pureté spectrale, la qualité du signal alternatif, et donc les performances globales de l'onduleur destiné aux systèmes photovoltaïques connectés au réseau.

#### ***5.4.5 – Simulation d'un onduleur triphasé FC5***

Le circuit modélisé sur MATLAB/Simulink d'un onduleur triphasé FC 5-niveaux est présenté par la figure 5.18 :

Contrairement aux deux topologies précédentes, chaque bras de l'onduleur a sa propre source d'alimentation qui est égale à 150V.



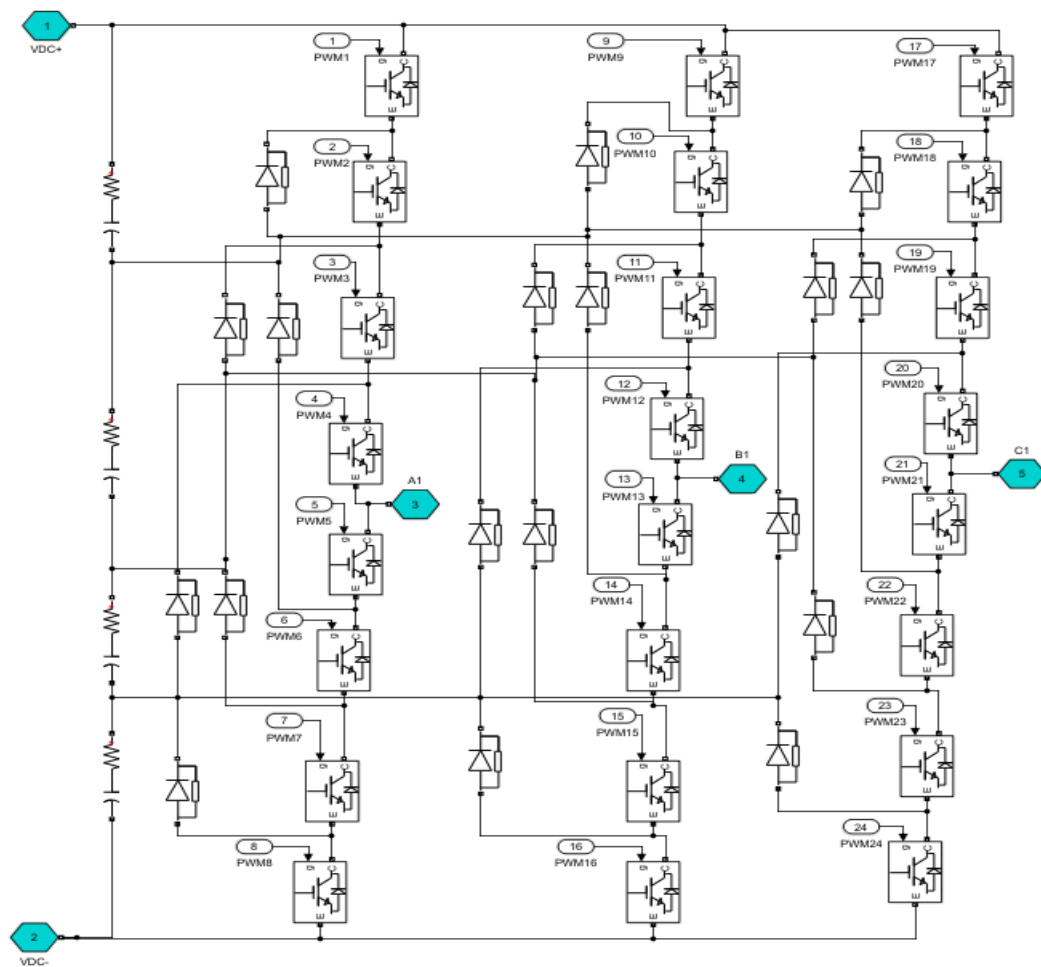
**Figure 5.18 : Circuit modélisé sur MATLAB/Simulink d'un onduleur FC5**

Après simulation de ce circuit, nous avons obtenu les mêmes formes d'onde obtenues dans la simulation d'un onduleur NPC5. Les valeurs de THD de  $V_{ao}$  et  $V_{ab}$  sont présentées dans le tableau 5.4.

#### 5.4.6 – Simulation d'un onduleur triphasé CHB5

Contrairement aux deux topologies précédentes, chaque étage d'onduleur qui forme cette structure a sa propre source d'alimentation qui est égale à 75V.

Le circuit modélisé sur MATLAB/Simulink d'un onduleur triphasé CHB 5-niveaux est présenté par la figure 5.19 :



**Figure 5.19 : Circuit modélisé sur MATLAB/Simulink d'un onduleur CHB5**

Après simulation de ce circuit, nous avons obtenu les mêmes formes d'ondes obtenues dans la simulation d'un onduleur NPC5. Les valeurs de THD,  $I_a$ ,  $V_{ao}$  et  $V_{ab}$  sont présentés dans le tableau 5.4.

## 5.5 – Comparaison des résultats obtenus

### 5.5.1 – Résultats de simulation des topologies des onduleurs trois niveaux

Le tableau suivant récapitule les résultats de simulation obtenus avec les topologies d'onduleur NPC3, FC3 et CHB3.

*Tableau 5.4 : Comparaison entre les trois topologies d'onduleurs 3 niveaux*

		Topologie		
		NPC3	FC3	CHB3
<b>Caractéristiques</b>	<b>Nombre de commutateurs</b>	12	12	12
	<b>Sources d'alimentations continues</b>	1	1	1
	<b>Condensateurs de bus continu</b>	2	2	3
	<b>Diodes de bouclage</b>	6	0	0
	<b>Condensateurs flottants</b>	0	3	0
	<b>Amplitude de la composante fondamentale de la tension simple Vao (V)</b>	150.4	150.3	149.8
	<b>TDH de tension Vao (en %)</b>	51.46	51.81	52.21
	<b>Amplitude de la composante fondamentale de la tension simple Vab (V)</b>	260	260.1	259.6
	<b>TDH de la tension Vab (en %)</b>	34.83	34.9	35.3

L'analyse des résultats de simulation montre que les trois structures d'onduleurs à trois niveaux NPC3, FC3 et CHB3 présentent des performances globalement proches, mais avec des différences notables selon les critères étudiés.

La topologie NPC se distingue par une répartition équilibrée de la tension du bus continu grâce aux diodes de bouclage, ce qui garantit une meilleure robustesse des semi-conducteurs et une stabilité du point neutre. Elle affiche un THD de 34,83 % pour la tension composée  $V_{ab}$ , légèrement inférieur à celui des autres structures, traduisant une meilleure qualité de tension et une distorsion harmonique réduite.

La structure FC présente un comportement similaire sur le plan du THD (34.9 pour  $V_{ab}$ ), mais la présence de condensateurs flottants accroît la complexité de commande et peut engendrer des déséquilibres de tension entre les condensateurs. Elle reste néanmoins intéressante pour des applications où une régulation dynamique rapide est recherchée.

Enfin, la topologie CHB offre une architecture modulaire simple et ne nécessite ni diodes de bouclage ni condensateurs flottants, ce qui réduit les contraintes d'isolation et les pertes dans les dispositifs de commutation. Son THD de valeur 35,3 % reste comparable aux autres structures, mais sa modularité la rend plus flexible et plus adaptée aux applications photovoltaïques de moyenne puissance nécessitant une mise en série de plusieurs modules indépendants.

En résumé, la topologie NPC se démarque par sa meilleure qualité de tension et sa robustesse, tandis que le CHB est privilégié pour sa modularité et sa simplicité d'implémentation, et le FC pour sa rapidité de commande, au prix d'une complexité accrue et d'un risque de déséquilibre capacitif.

### 5.5.2 – Résultats de simulation des topologies des onduleurs cinq niveaux

Le tableau suivant récapitule les résultats obtenus avec les trois topologies d'onduleur :

**Tableau 5.5 : Comparaison entre les trois topologies d'onduleurs 5 niveaux**

		Topologie		
		NPC5	FC5	CHB5
<b>Caractéristiques</b>	<b>Nombre de commutateurs</b>	24	24	24
	<b>Sources d'alimentations continues</b>	1	1	6
	<b>Condensateurs de bus continu</b>	4	4	6
	<b>Diodes de bouclage</b>	18	0	0
	<b>Condensateurs flottants</b>	0	18	0
	<b>Amplitude de la composante fondamentale de la tension simple Vao (V)</b>	149.6	146.1	149.9
	<b>TDH de Vao (en %)</b>	27.08	28.96	26.92
	<b>Amplitude de la composante fondamentale de la tension simple Vab (V)</b>	259.8	253.2	259.7
	<b>TDH de Vab (en%)</b>	17.20	18.45	17.16

L'analyse des résultats de simulation des onduleurs à cinq niveaux met en évidence une amélioration significative de la qualité de tension par rapport aux structures à trois

niveaux, avec une réduction marquée du THD et une meilleure répartition des contraintes sur les semi-conducteurs.

La topologie NPC5 présente un THD de valeur 17,20 % pour la tension composée  $V_{ab}$ , indiquant une très bonne pureté spectrale. Grâce à ses diodes d'écrêtage, elle assure un équilibrage efficace du point neutre et une répartition homogène des tensions sur les interrupteurs. Cette configuration confère à la structure une grande robustesse électrique et une stabilité de fonctionnement, au prix toutefois d'un nombre de composants plus élevé.

La structure FC5 offre une souplesse de commande accrue dans le sens où elle dispose de plusieurs états de commutation redondants, ce qui permet une plus grande flexibilité dans la synthèse des niveaux de tension et un meilleur contrôle du flux de puissance injecté au réseau. Cette flexibilité se traduit par des performances harmoniques satisfaisantes, avec un taux de distorsion harmonique total (THD) de 18,45 %, une valeur très proche de celle obtenue avec la structure NPC5.

En revanche, cette souplesse de commande s'accompagne d'une complexité accrue au niveau de la gestion interne des condensateurs flottants. En effet, l'équilibrage des tensions de ces condensateurs n'est pas naturellement garanti et nécessite la mise en œuvre de stratégies de commande supplémentaires. Cette contrainte est particulièrement critique lors des régimes transitoires, où des déséquilibres de tension peuvent apparaître et affecter temporairement la qualité du signal.

Ainsi, la structure FC5 combine une bonne performance harmonique et une grande flexibilité de commande externe avec une complexité plus élevée de régulation interne, ce qui en fait une topologie performante, mais plus exigeante en termes de contrôle.

La topologie CHB5 se démarque par son THD minimal de 17,16 %, le plus faible parmi les trois. Sa structure modulaire, constituée de ponts H indépendants alimentés par des sources isolées, réduit les pertes de commutation et facilite la mise en œuvre à grande échelle. De plus, sa conception simple améliore la fiabilité et la maintenance du système tout en garantissant une tension de sortie quasi sinusoïdale.

En conclusion, pour les systèmes photovoltaïques connectés au réseau, la topologie CHB5 apparaît comme la plus performante en termes de qualité de tension et de rendement, tandis que la NPC5 offre un excellent compromis entre robustesse et stabilité du point neutre. La FC5, malgré sa flexibilité, reste plus complexe à contrôler et moins adaptée aux puissances élevées.

## **5.6 – Contribution réalisée**

À travers ce chapitre, nous avons développé et simulé trois topologies d'onduleurs multiniveaux (NPC, FC et CHB) à trois et cinq niveaux, en utilisant la modulation MLI sinusoïdale sous MATLAB/Simulink. Les résultats comparatifs obtenus ont permis de quantifier la qualité de tension pour chaque structure et de dégager la topologie la plus adaptée. Ces travaux constituent une étape essentielle dans la conception du système complet présenté au chapitre suivant.

## 5.7 – Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié en détail les différentes topologies d'onduleurs multiniveaux triphasés ainsi que leurs principes de fonctionnement, structures et performances. Les trois architectures les plus répandues, NPC (Neutral Point Clamped), FC (Flying Capacitors) et CHB (Cascaded H-Bridge), ont été modélisées et simulées sous MATLAB/Simulink à trois et cinq niveaux afin d'en évaluer le comportement électrique et la qualité de tension en sortie.

Les résultats obtenus ont mis en évidence que l'augmentation du nombre de niveaux permet une amélioration notable de la forme d'onde, une réduction du THD et une répartition plus équilibrée des contraintes sur les semi-conducteurs. Parmi les structures à trois niveaux, la topologie NPC3 s'est distinguée par sa stabilité et sa robustesse, tandis que pour les structures à cinq niveaux, la CHB5 a offert la meilleure qualité de tension et le plus faible taux de distorsion harmonique. La FC, quant à elle, s'est révélée performante sur le plan dynamique, mais au prix d'une complexité de commande accrue et d'un risque de déséquilibre capacitif.

Ces analyses confirment que les onduleurs multiniveaux constituent une solution efficace pour la conversion d'énergie dans les systèmes photovoltaïques connectés au réseau, en assurant une tension de sortie quasi sinusoïdale, des pertes réduites et un meilleur rendement global.

Les conclusions de ce chapitre serviront de base à la mise en œuvre de la commande du système photovoltaïque complet, présentée dans le chapitre suivant.

## CHAPITRE 6 – MODÉLISATION ET SIMULATION D’UN SYSTÈME PV CONNECTÉ AU RÉSEAU ÉLECTRIQUE

### 6.1 – Simulation d’un module photovoltaïque

Le module photovoltaïque simulé dans ce travail est le modèle APOS Energy AP 215M, qui comporte 60 cellules monocristallines.

Dans les conditions de test standard (ensoleillement de  $1000\text{W}/\text{m}^2$  avec une température  $T=25^\circ\text{C}$ ), ce module délivre une puissance qui peut atteindre 222 W.

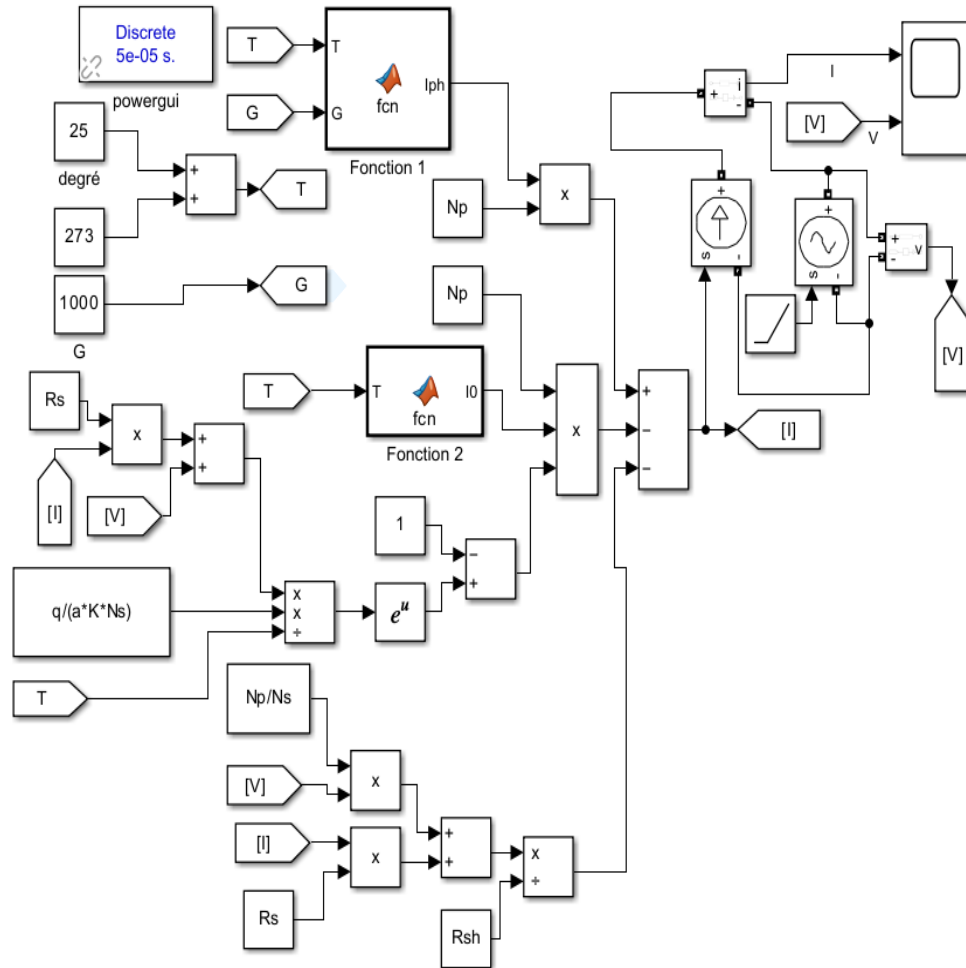
Les caractéristiques de ce module sont représentées par le tableau suivant :

*Tableau 6.1 : Caractéristiques du module APOS Energy AP 215M*

<b>Nombre des cellules en séries (Ncell)</b>	60 cells
<b>Puissance maximale</b>	222 W
<b>Tension à puissance maximale ou tension optimale</b>	29.34 V
<b>Courant à puissance maximale ou courant optimal</b>	7.58 A
<b>Courant de court-circuit</b>	8.05 A
<b>Tension à circuit ouvert</b>	35.94 V
<b>Coefficient de température à tension à circuit ouvert (% / deg.C)</b>	-0.3701
<b>Coefficient de température au courant de court-circuit (% / deg.C)</b>	0.042199

Nous avons modélisé le circuit du modèle APOS Energy AP 215M comme montre la figure 6.1. Ensuite, nous avons simulé ce circuit dans les conditions standard (ensoleillement de  $1000\text{W}/\text{m}^2$  avec une température  $T=25^\circ\text{C}$ ). Les résultats obtenus sont

présentés sous forme d'ondes : la puissance en fonction de la tension (figure 6.2) et le courant en fonction de la tension (figure 6.3).



**Figure 6.1 : Circuit du module PV sur MATLAB/Simulink**

- Le bloc fonction MATLAB appelé dans le circuit fonction 1 est une fonction qui fait le calcul de  $I_{ph}$  (c'est le photo-courant de la cellule) en utilisant l'équation suivante :

$$I_{ph} = (I_{sc} + K_r \times (T - T_r)) \times \frac{G}{G_r} \quad (6.1)$$

- Le bloc fonction MATLAB appelé dans le circuit fonction 2 est une fonction qui fait le calcul de  $I_0$  (c'est le courant de saturation inverse de la diode) en utilisant l'équation suivante :

$$I_0 = \left(\frac{T}{T_r}\right)^3 \times \exp\left(\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r}\right) \times q \times \frac{E_{g0}}{a \times K}\right) \times \frac{I_{sc}}{\exp\left(q \times \frac{V_{ocn}}{N_s \times a \times K \times T}\right) - 1} \quad (6.2)$$

$N_s = 60$  cells : Nombre de cellules en série

$T_r = 298$  K : Température de référence en K

$I_{sc} = 8.05$  A : Courant de court-circuit

$K_r = 0.042$  : Coefficient de CC

$G_r = 1000$  W/m<sup>2</sup> : Éclairement de référence

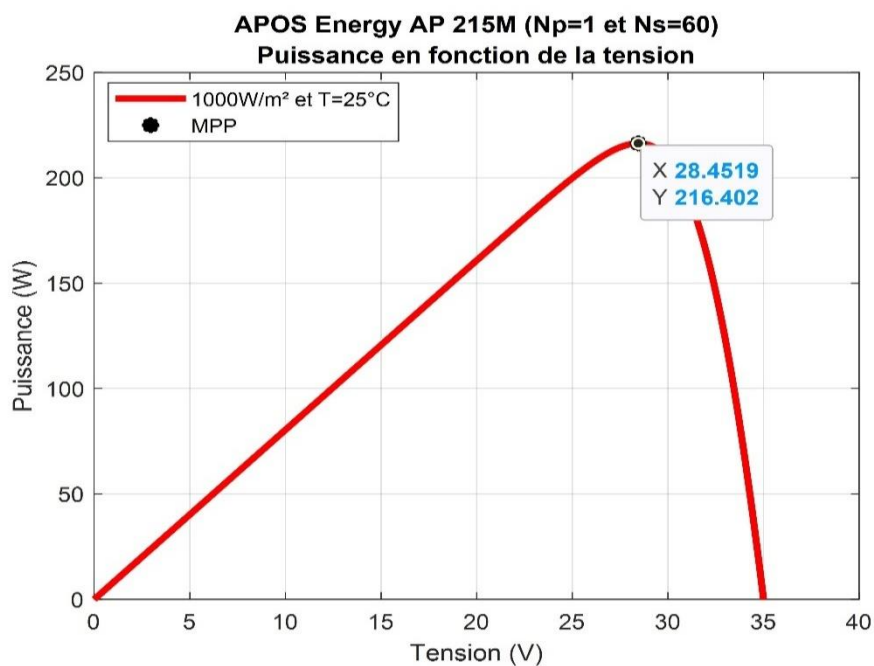
$q = 1.602 \times 10^{-19}$  C : Charge d'un électron

$V_{ocn} = 35.94$  V : Tension de circuit ouvert

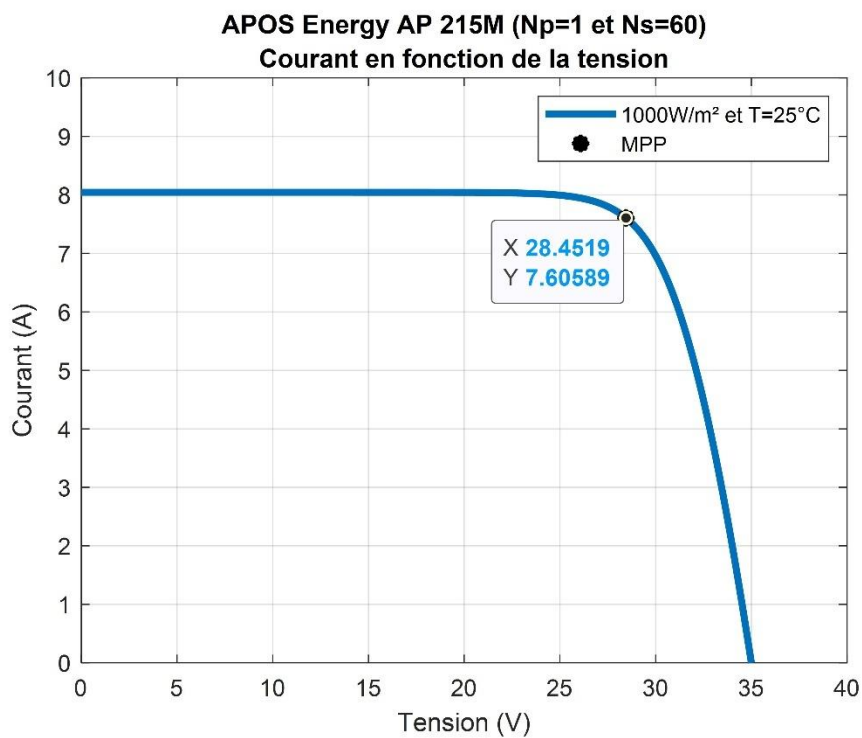
$a = 0.98042$  : Constante d'idéalité de la diode

$K = 1.38065 \times 10^{-23}$  J/K : Constante de Boltzman

$E_{g0} = 1.12$  eV: Gap d'énergie dans les conditions de références



*Figure 6.2 : Forme d'onde P (V) du module PV*



*Figure 6.3 : Forme d'onde I (V) du module PV*

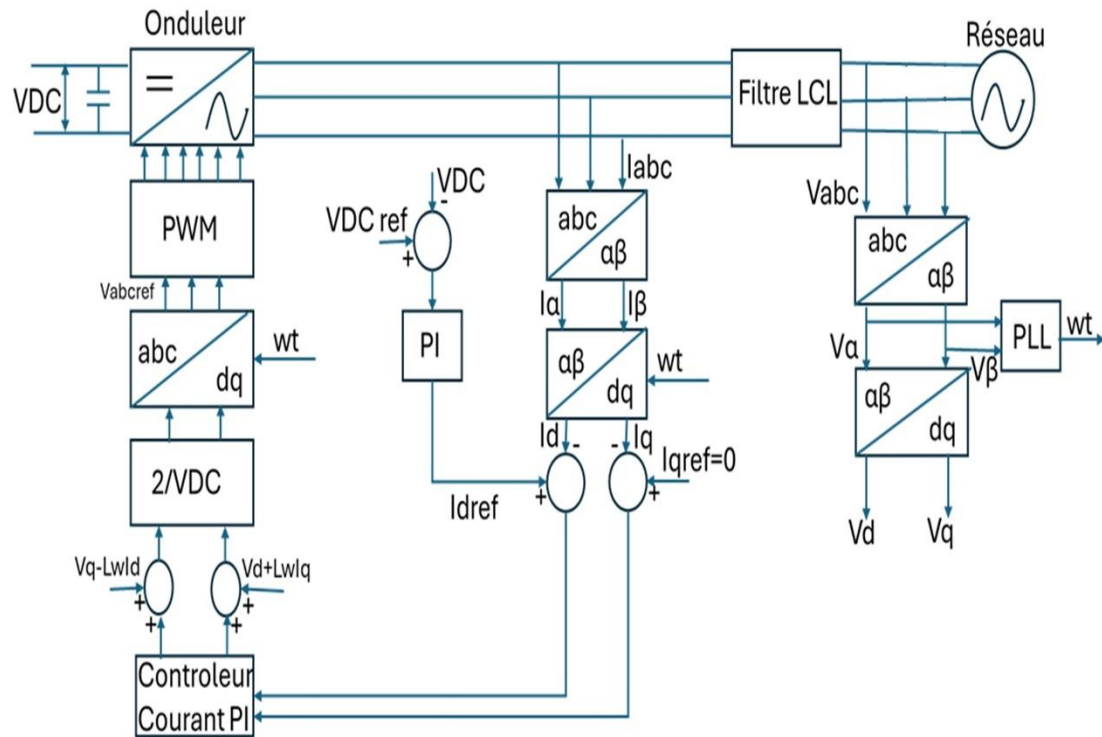
Si on compare les valeurs de la tension et du courant au point de la puissance maximale obtenue par simulation avec les valeurs données par le constructeur, on remarque que les valeurs sont presque les mêmes, donc on peut déduire que le modèle qu'on a modélisé avec Matlab Simulink est valide.

## **6.2 – Raccordement de l'onduleur du système PV au réseau électrique**

Pour raccorder une installation d'un système de production photovoltaïque au réseau électrique, il y a des boucles de contrôle et de commande qu'on doit implanter dans l'installation de notre système. Ces boucles sont les suivantes :

- Une boucle pour la synchronisation avec la tension du réseau : c'est la boucle à verrouillage de phase (PLL Phase Locked Loop).
- Une boucle de contrôle de courant envoyé vers le réseau.
- Une boucle pour le contrôle de la tension du bus continu.

Le schéma synoptique de la commande vectorielle en dq (commande en double boucle de régulation) pour la connexion au réseau électrique se présente dans la figure 6.4 [54].



**Figure 6.4 : Schéma synoptique de la commande de la connexion au réseau [54]**

La tension  $V_{dcref}$  est généralement fixée en fonction de la tension du réseau afin de garantir une modulation efficace de l'onduleur. Elle doit être supérieure à la valeur crête de la tension réseau pour permettre une bonne injection de puissance active.

Le principe revient à échantillonner la tension du réseau ( $V_a$ ,  $V_b$  et  $V_c$ ) et la phase de verrouillage. Les courants ( $I_a$ ,  $I_b$  et  $I_c$ ) à la sortie de l'onduleur sont échantillonnés et comparés avec ses références  $i_{dref}$  et  $i_{qref}$ .

$I_{ref}$  est synthétisé à l'aide d'un correcteur PI à partir de l'erreur calculée entre la tension du bus continu et sa tension de référence.

Les composantes de la tension de référence de la commande MLI dans le repère (dq) sont données par les sorties du régulateur. La transformation inverse de Park donne les références du signal de commande (MLI).

$V_d$  et  $V_q$ : sont les composantes directes et quadratiques de la tension du réseau dans le référentiel de Park.

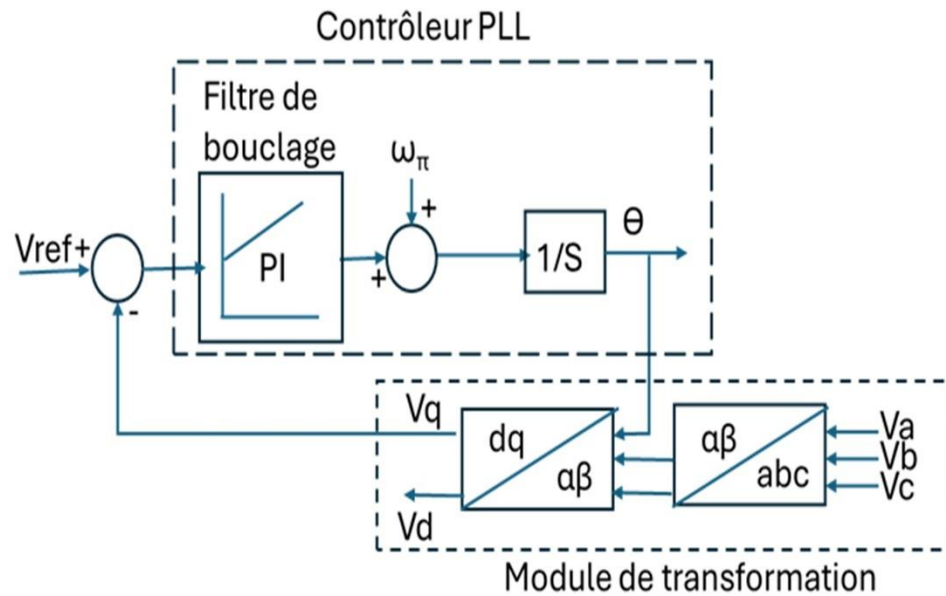
$I_d$  et  $I_q$  : sont les composantes directes et quadratiques du courant à la sortie d'onduleur dans le référentiel de Park.

### ***6.2.1 – Boucle à verrouillage de phase (PLL : Phase Locked Loop)***

Une boucle à verrouillage de phase (PLL), est un circuit électronique qui a un double rôle. Son premier rôle est de nous permet d'asservir la phase instantanée de sortie sur la phase instantanée d'entrée, le deuxième rôle c'est qu'il permet aussi d'asservir une fréquence de sortie sur un multiple de la fréquence d'entrée [54] [55].

La boucle à verrouillage de phase (PLL) triphasée a un principe qui consiste à appliquer une transformation inverse de Park sur les tensions triphasées du réseau. La composante d'axe q générée par cette transformation est asservie à zéro par action sur l'angle du repère de Park afin de générer l'angle de synchronisation [55].

La figure 6.5 montre le schéma de principe de la boucle à verrouillage de phase (PLL).



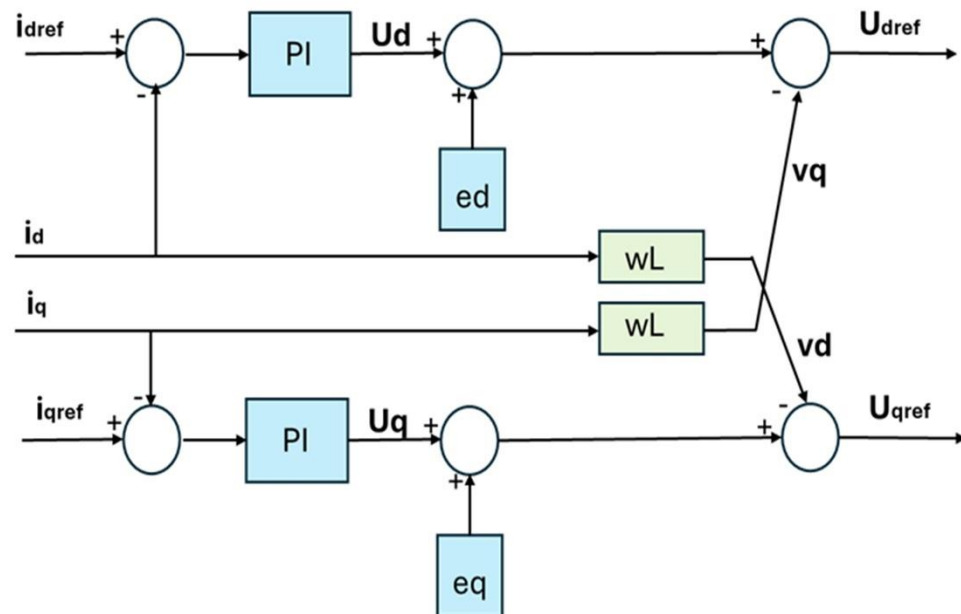
**Figure 6.5 : Schéma de principe de la PLL [55]**

Dans la boucle de verrouillage de phase PLL, la tension de référence  $V_{ref}$  est généralement fixée à zéro. Cela permet à la boucle PLL de rechercher une bonne synchronisation avec la tension du réseau.

### **6.2.2 – Contrôle des courants envoyés au réseau électrique**

Pour obtenir le dispositif de commande des courants ( $i_d$  et  $i_q$ ), il suffit de faire l'inversion du modèle de la liaison au réseau dans le repère de Park [54].

La figure 6.6 représente le schéma bloc du contrôle des courants transités par le réseau dans le repère de Park [54]:



**Figure 6.6 : Principe de dispositif de commande des courants dans le repère de Park [54]**

$e_d$  et  $e_q$ : sont les composantes directe et quadratique de la tension du réseau dans le référentiel de Park.

$v_d$  et  $v_q$ : sont les tensions réelles du système (mesurées).

$U_d$  et  $U_q$ : sont les tensions de référence calculées par le régulateur PI.

Ce dispositif comporte trois opérations spécifiques :

- Découplage des courants : cette action est représentée par les équations suivantes :

$$U_{dref} = U_d + e_d - v_q \quad (6.3)$$

$$U_{qref} = U_q + e_d + v_d \quad (6.4)$$

- Une compensation de la tension : cette action est représentée par les équations suivantes :

$$v_q = w \times L \times i_q \quad (6.5)$$

$$v_d = w \times L \times i_d \quad (6.6)$$

- Un contrôle en boucle fermée des courants : cette action est représentée par les équations suivantes :

$$U_d = PI \times (i_{dref} - i_d) \quad (6.7)$$

$$U_q = PI \times (i_{qref} - i_q) \quad (6.8)$$

### **6.2.3 – Contrôle de la tension du bus continu**

Pour permettre de maintenir une tension constante du bus continu, on doit utiliser la régulation du bus continu qui est réalisé à l'aide d'une boucle de régulation avec un correcteur PI générant la référence du courant à injecter dans le condensateur C ( $i_{cref}$ ).

Cette régulation des transits de puissance permet d'imposer le courant capacitif au bus continu, ce courant est exprimé par l'équation suivante.

$$i_{cref} = PI \times (i_{cref} - i_c) \quad (6.9)$$

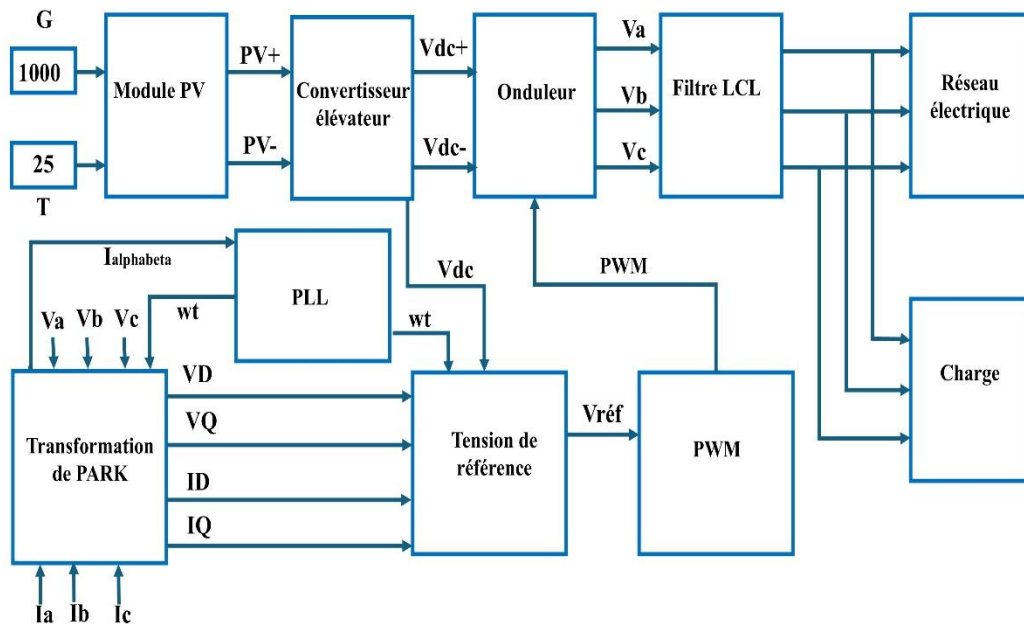
## **6.3 – Simulation du système photovoltaïque connecté au réseau électrique**

Dans cette partie, nous allons simuler le système photovoltaïque global, ce système comporte le panneau solaire, le bloc convertisseur CC–CC (hacheur Boost) avec sa

commande MPPT, le convertisseur CC-CA (onduleur multiniveaux) avec sa commande MLI et une boucle de régulation pour adapter le système aux conditions du réseau électrique, un filtre LCL, une charge inductive RL, des blocs de mesure de tension et de courant et un bloc de réseau électrique moyenne tension 20 kV et une fréquence de 50 Hz qui est constitué d'un transformateur (380 V/20 kV) et une source de tension triphasée de 20 kV.

La méthodologie adoptée dans ce travail vise à modéliser, simuler et comparer les performances de différentes topologies d'onduleurs multiniveaux connectés à un système photovoltaïque (PV) injectant l'énergie dans le réseau électrique.

L'approche suivie se décompose en plusieurs étapes successives, illustrées à la figure 6.7.



*Figure 6.7 : Circuit du système PV connecté au réseau électrique*

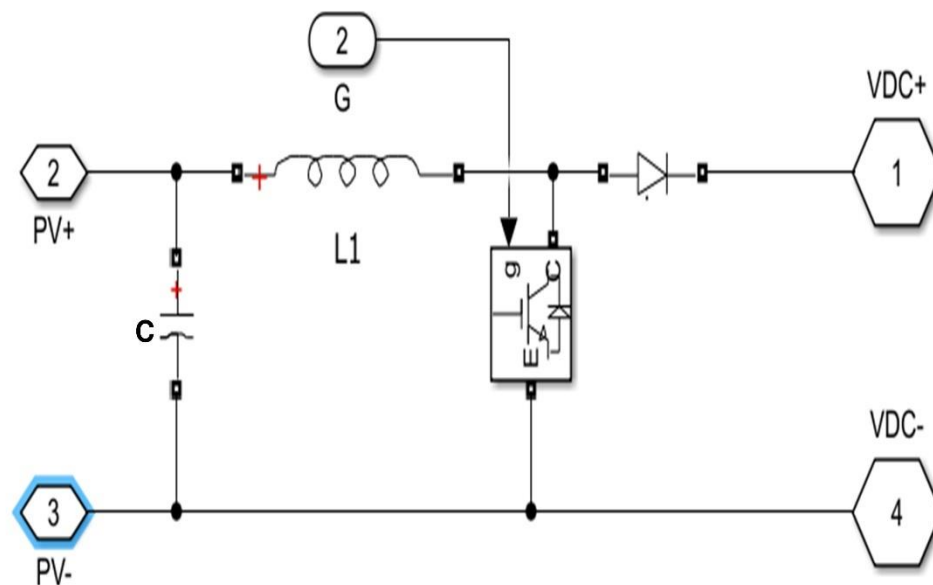
Dans un premier temps, un modèle complet du système PV a été développé sous MATLAB/Simulink.

Ce modèle intègre les sous-systèmes essentiels suivants :

➤ Le générateur photovoltaïque : Notre module PV est constitué de 10 modules en série et 75 modules en parallèle qui vont former un champ photovoltaïque de 750 modules de type APOS Energy AP 215M dont chaque module contient 60 cellules solaires.

Ce panneau nous offre une puissance qui peut atteindre 167kW.

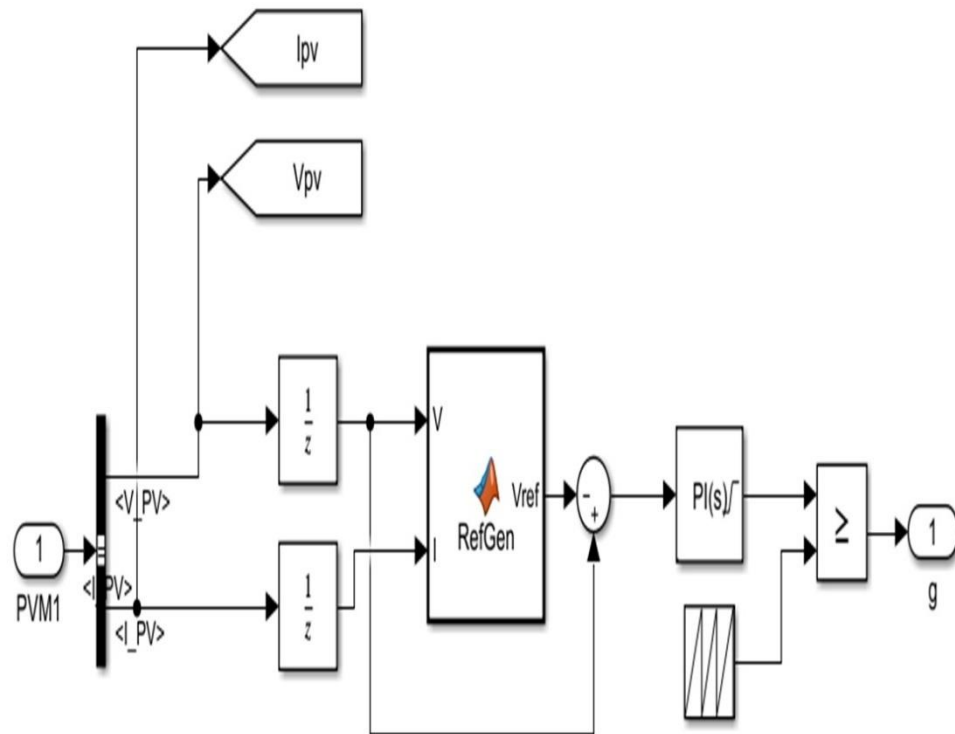
➤ Le convertisseur CC-CC (BOOST) : La figure 6.8 représente le circuit du hacheur élévateur modélisé sur MATLAB/Simulink



**Figure 6.8 : Circuit du hacheur Boost modélisé sur MATLAB/Simulink**

Le convertisseur est utilisé pour élever la tension issue du champ photovoltaïque à une valeur compatible avec le bus continu de l'onduleur,

Ce convertisseur comporte un condensateur de valeur  $C=100\mu\text{F}$ , une inductance de valeur  $L=5\text{mH}$ , une diode et un IGBT. Ce convertisseur est commandé par la commande MPPT type perturbation et observation. Cette commande modélisée sur MATLAB/Simulink est représentée par le circuit dans la figure 6.9:



**Figure 6.9 : Circuit sur MATLAB/Simulink de la commande MPPT type P O**

La tension  $V_{\text{ref}}$  est générée par l'algorithme de la fonction MPPT (bloc RefGen). Le sommateur fait la comparaison entre la tension mesurée  $V_{\text{pv}}$  et la tension optimale  $V_{\text{ref}}$ , afin de calculer l'erreur. Cette erreur est ensuite réglée par le PI pour ajuster la commande du convertisseur CC-CC et suivre le point de puissance maximale.

➤ Convertisseur CC–CA (onduleur multiniveaux) : Les convertisseurs utilisés dans notre travail sont des onduleurs multiniveaux de topologie NPC, CHB et FC de trois niveaux et cinq niveaux.

La commande de l'onduleur est assurée par une modulation sinusoïdale de largeur d'impulsion MLI SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation) à disposition de phase (PDPWM).

Ce choix est motivé par sa simplicité de mise en œuvre, sa bonne symétrie des signaux de commande, et sa capacité à réduire la distorsion harmonique (THD) par rapport aux autres techniques classiques (comme la SPWM bipolaire ou unipolaire).

- L'indice de modulation d'amplitude est fixé à  $m_a = 1$ , ce qui permet d'obtenir une tension de sortie maximale sans distorsion de la fondamentale.
- L'indice de fréquence est fixé à  $m_f = 40$ , soit une fréquence de commutation de 2 kHz pour une fréquence fondamentale de 60 Hz.

Ce choix de fréquence constitue un compromis optimal entre :

- Une bonne qualité de tension en sortie (THD faible),
- Une réduction des pertes de commutation dans les interrupteurs de puissance.

De plus, la disposition en phase (PDPWM) permet une répartition équilibrée des commutations sur les bras de l'onduleur, ce qui améliore la fiabilité thermique et la stabilité des points neutres dans les topologies NPC et FC.

➤ Filtre LC : Afin de limiter les harmoniques hautes fréquences générées par la commutation PWM, un filtre LC triphasé est connecté entre la sortie de l'onduleur et le

transformateur de couplage au réseau, l'inductance a pour valeur 0.75 mH et la capacité est de 1  $\mu$ F.

Ce filtre a été dimensionné de manière à :

- Maintenir une ondulation de courant inférieure à 5 %,
- Fixer une fréquence de coupure de l'ordre de 500Hz, bien inférieure à la fréquence de commutation.

Ainsi, seules les composantes fondamentales (50/60 Hz) sont transmises vers le réseau, tandis que les harmoniques de découpage (dans la bande de 2 à 5 kHz) sont efficacement atténuées.

Le filtre assure donc :

- Une forme d'onde de courant quasi sinusoïdale,
- Une réduction significative du THD,
- Une protection du réseau contre les perturbations à haute fréquence.

➤ Charge et réseau électrique : La charge simulée correspond à un réseau triphasé équilibré de 20 kV – 50 Hz, alimenté via un transformateur 380 V/20 kV.

Le système PV injecte ainsi sa puissance dans une charge équivalente modélisant le réseau.

La charge connectée à la sortie de l'onduleur est de type RL, avec  $R=20 \Omega$  et  $L=60$  mH.

Cette combinaison résistive–inductive est choisie pour représenter :

- La nature inductive du réseau,

- Les conditions réalistes de fonctionnement d'un système photovoltaïque connecté à une ligne moyenne tension,
  - Permettre l'étude de la puissance active et réactive échangée entre le système PV et le réseau.
  - Ainsi, les courants simulés présentent un décalage de phase contrôlable, ce qui permet d'évaluer le facteur de puissance et la capacité de régulation de la puissance réactive du convertisseur.
- Boucle de verrouillage de phase PLL : La synchronisation du système PV avec le réseau électrique est assurée par une boucle à verrouillage de phase (Phase-Locked Loop, PLL) triphasée.

Cette boucle extrait l'angle instantané de phase du réseau à partir de la composante fondamentale de la tension triphasée.

Le rôle du PLL est crucial :

- Il synchronise la référence de phase de l'onduleur avec celle du réseau,
- Assure un transfert de puissance actif stable,
- Empêche toute désynchronisation pouvant entraîner des courants de circulation entre le réseau et le convertisseur.

Dans cette simulation, le PLL est configuré pour suivre rapidement les variations de fréquence et de phase, tout en rejetant les harmoniques et le bruit grâce à une bande passante étroite (autour de 20 à 30 Hz).

Le signal d'angle fourni par le PLL sert de référence à la commande en quadrature du courant injecté, permettant de réguler la puissance active et réactive.

Dans un second temps, une analyse comparative a été effectuée entre les différentes topologies à trois et cinq niveaux.

Les critères de comparaison portent sur :

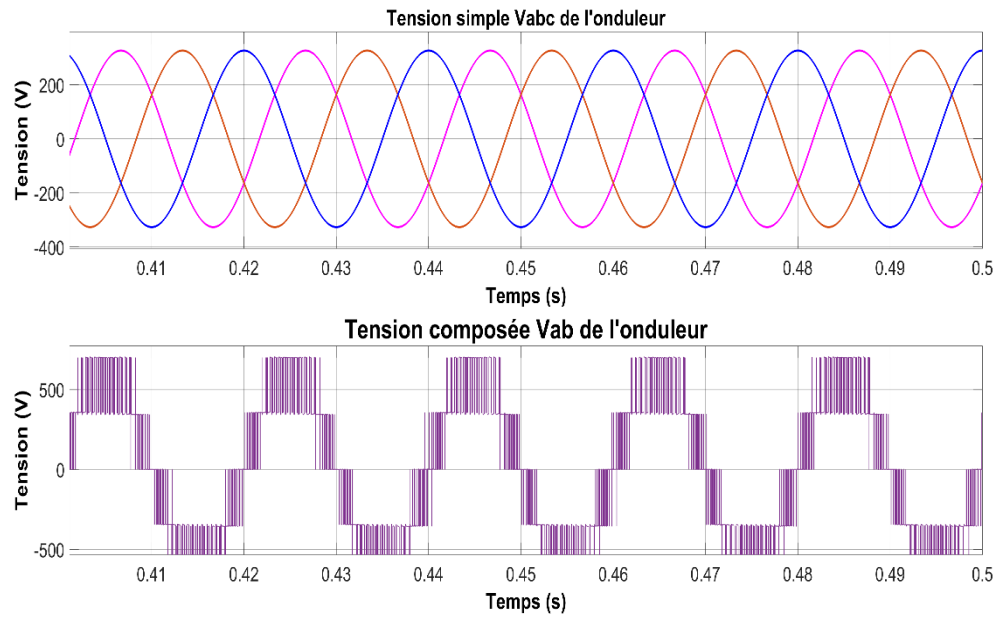
- La forme d'onde de la tension et du courant de sortie,
- Le taux de distorsion harmonique (THD),
- La répartition des contraintes de tension sur les interrupteurs de puissance.

Enfin, les résultats de simulation ont été interprétés afin de déterminer la topologie offrant le meilleur compromis entre complexité, qualité de tension et stabilité du point neutre. Cette méthodologie permet ainsi de valider expérimentalement, à travers la simulation numérique, la pertinence des structures étudiées pour l'injection d'énergie PV dans le réseau électrique.

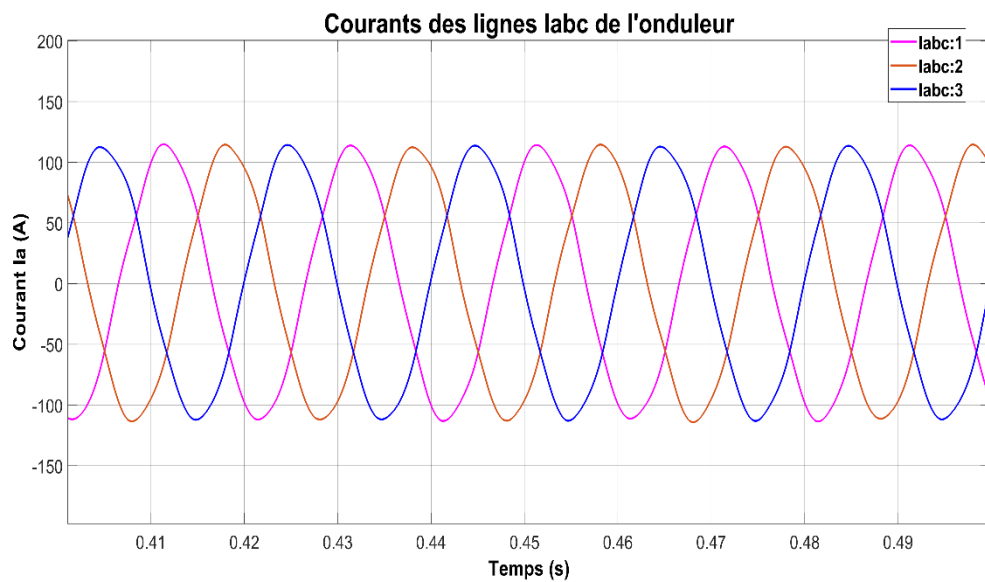
## **6.4 – Résultat de simulation d'un système PV connecté au réseau**

### ***6.4.1 – Système PV avec onduleur triphasé NPC à trois niveaux***

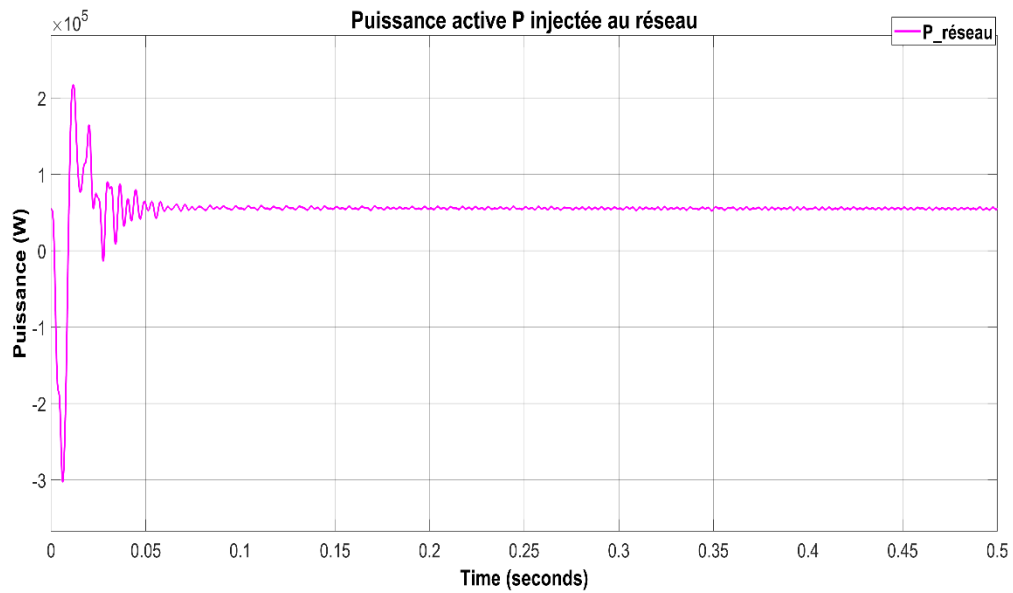
Après simulation avec les conditions de test de température à 25°C et irradiation 1000 W/m<sup>2</sup>, on obtient la figure 6.10 qui représente les formes d'onde des tensions simples  $V_{abc}$  et la tension composée  $V_{ab}$  à la sortie de l'onduleur triphasé NPC trois niveaux, la figure 6.11 représente les formes d'onde des courants  $I_{abc}$  des trois lignes de l'onduleur, figure 6.12 représente la forme d'onde de la puissance active  $P$  et la figure 6.13 représente celle de la puissance réactive  $Q$  injectée au réseau.



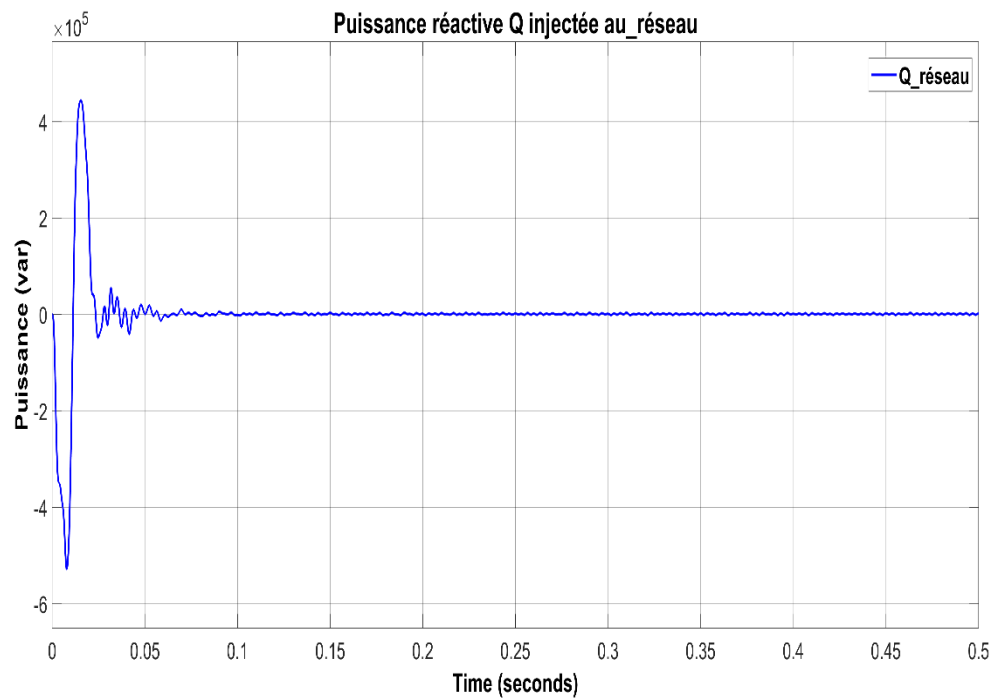
**Figure 6.10 : Forme d'onde des signaux  $V_{abc}$  et  $V_{ab}$  de l'onduleur NPC 3-niveaux connecté au réseau**



**Figure 6.11 : Forme d'onde du courant de l'onduleur NPC 3-niveaux connecté au réseau**



**Figure 6.12 : Forme d'onde de la puissance active  $P$  injectée au réseau par l'onduleur NPC3**



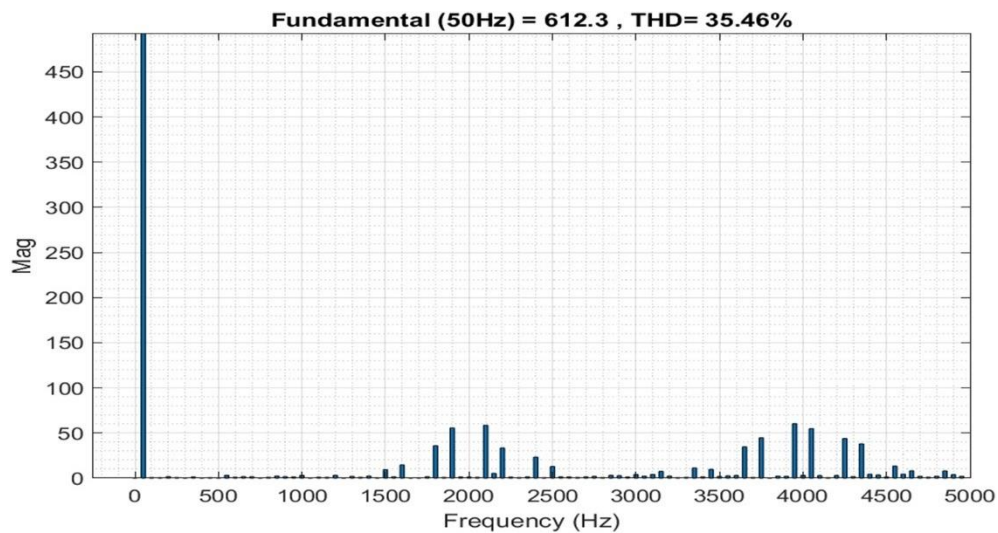
**Figure 6.13 : Forme d'onde de la puissance réactive  $Q$  injectée au réseau par l'onduleur NPC3**

Les fortes variations de puissance observées au démarrage sont dues aux phénomènes transitoires liés à la synchronisation de la PLL, à l'établissement du bus continu et à la dynamique du filtre.

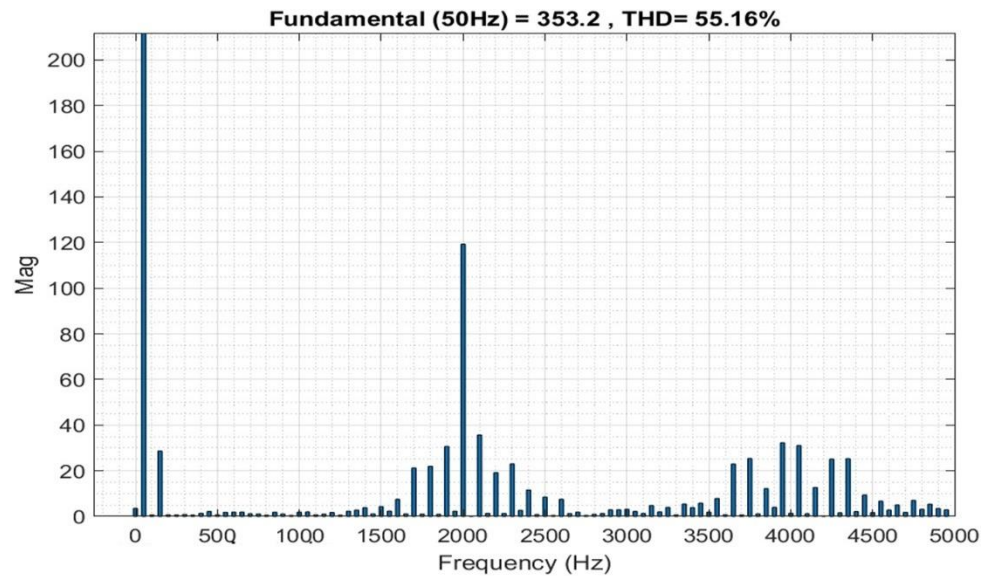
La présence d'une puissance réactive significative, parfois supérieure à la puissance active, s'explique par l'échange naturel de réactive avec les éléments du filtre, les erreurs transitoires de synchronisation et l'absence d'une contrainte explicite imposant un facteur de puissance unitaire.

Une fois le régime permanent atteint, les puissances se stabilisent, ce qui confirme le bon fonctionnement et la stabilité du système.

Après l'analyse spectrale, la figure 6.14 représente les spectres harmoniques de la tension composée  $V_{ab}$  à la sortie de l'onduleur et la figure 6.15 représente les spectres harmoniques de la tension composée  $V_{ab}$  à la sortie de l'onduleur.



**Figure 6.14 : Spectre harmonique de la tension  $V_{ab}$  de l'onduleur NPC3 connecté au réseau électrique**

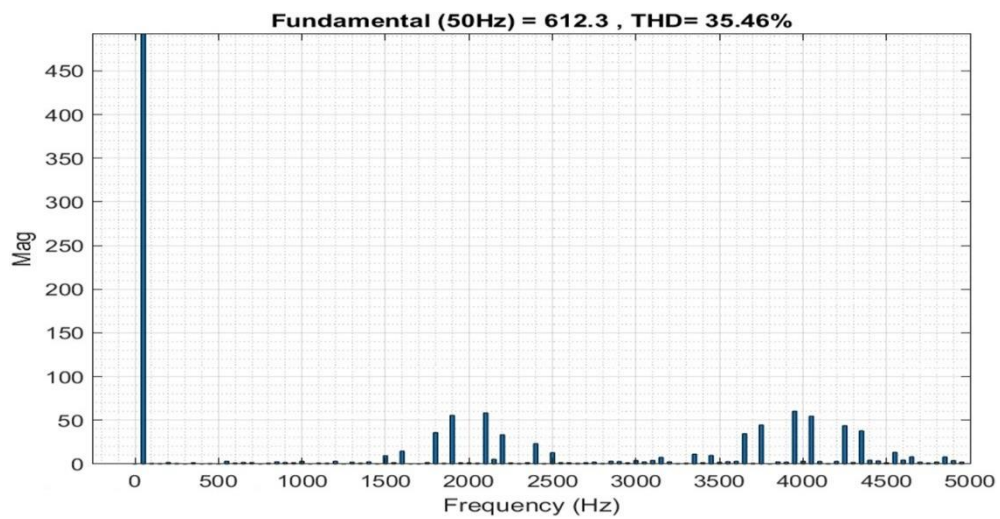


**Figure 6.15 : Spectre harmonique de la tension  $V_{ao}$  de l'onduleur NPC3 connecté au réseau électrique**

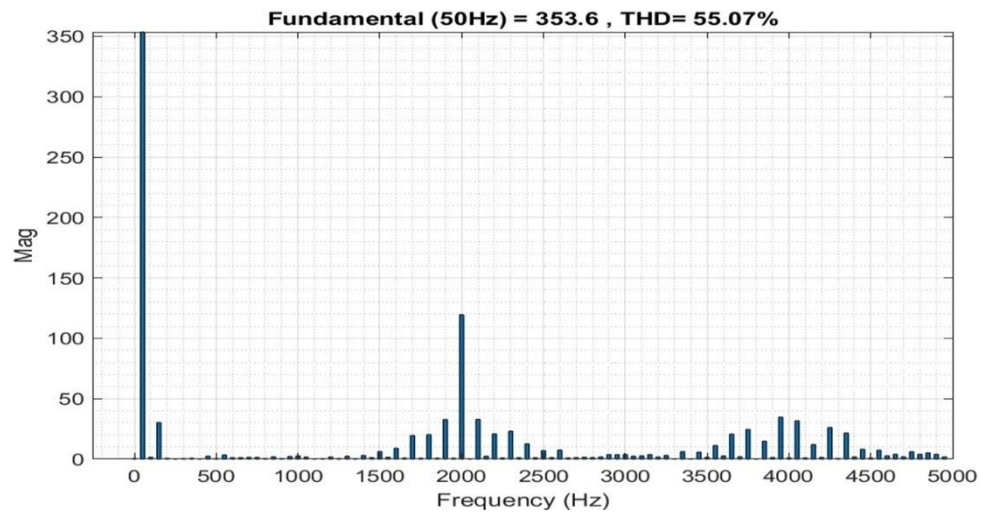
#### **6.4.2 – Système PV avec onduleur triphasé FC à trois niveaux**

Après simulation du circuit d'un système PV avec onduleur FC à trois niveaux, nous avons obtenu les mêmes formes d'ondes obtenues dans la simulation d'un système PV avec onduleur NPC à trois niveaux. Les valeurs de THD  $V_{ao}$  et  $V_{ab}$  sont présentées dans le tableau 6.2.

Après l'analyse spectrale, la figure 6.16 représente les spectres harmoniques de la tension composée  $V_{ab}$  et la figure 6.17 représente les spectres harmoniques de la tension simple  $V_{ao}$  à la sortie de l'onduleur.



*Figure 6.16 : Spectre harmonique de la tension  $V_{ab}$  de l'onduleur FC3 connecté au réseau électrique*

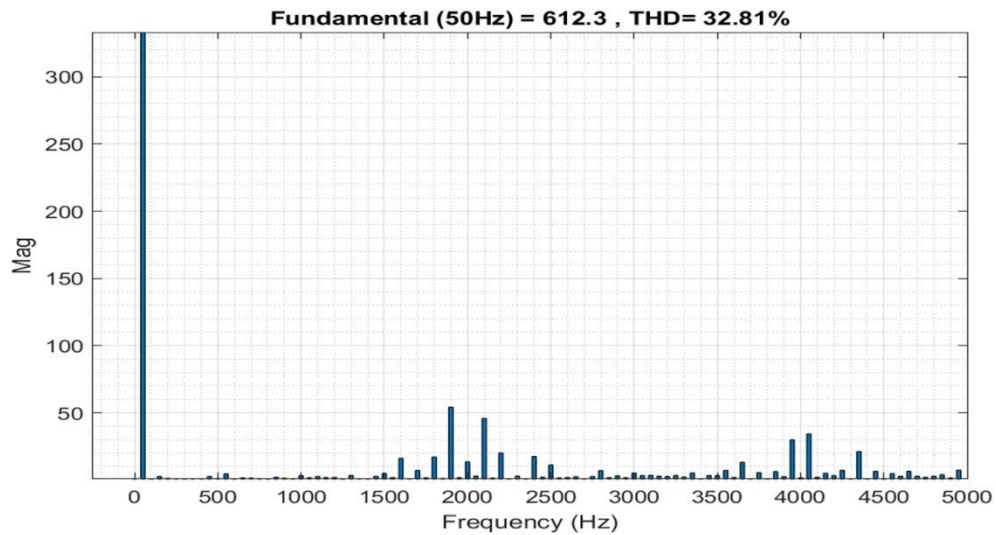


*Figure 6.17 : Spectre harmonique de la tension  $V_{ao}$  de l'onduleur FC3 connecté au réseau électrique*

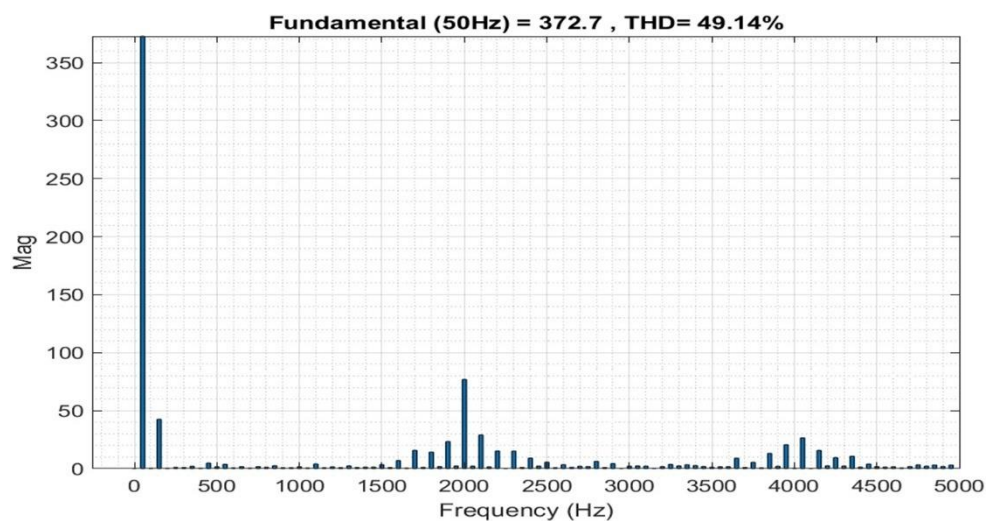
#### 6.4.3 – Système PV avec onduleur triphasé CHB à trois niveaux

Après simulation du circuit d'un système PV avec onduleur CHB trois niveaux, nous avons obtenu les mêmes formes d'ondes obtenues dans la simulation d'un système PV avec onduleur NPC à trois niveaux. Les valeurs de THD  $V_{ao}$  et  $V_{ab}$  sont présentées dans le tableau 6.2.

Après l'analyse spectrale, la figure 6.18 représente les spectres harmoniques de la tension composée  $V_{ab}$  et la figure 6.19 représente les spectres harmoniques la tension simple  $V_{ao}$  à la sortie de l'onduleur.



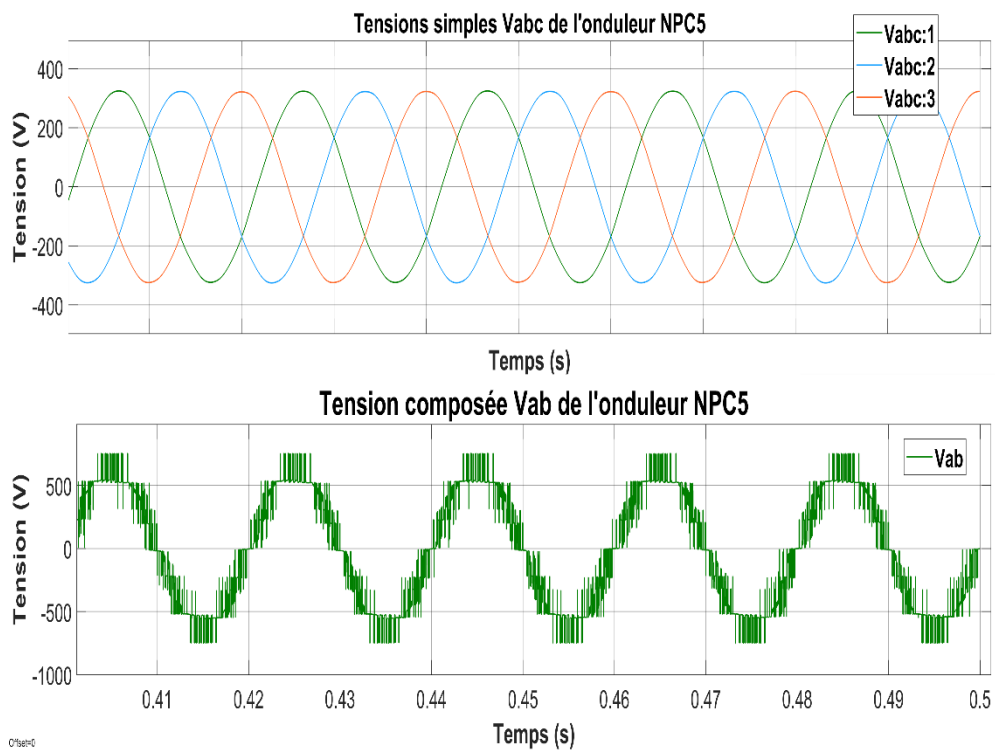
**Figure 6.18 : Spectre harmonique de la tension  $V_{ab}$  de l'onduleur CHB3 connecté au réseau électrique**



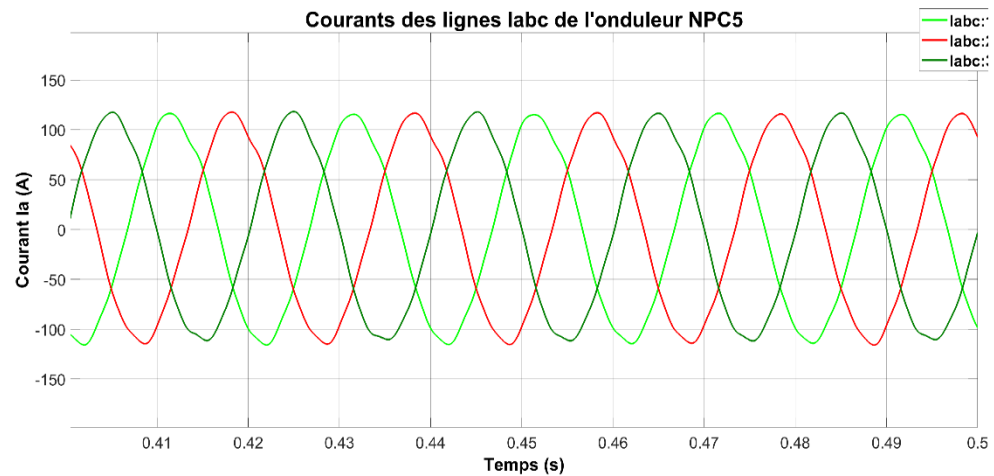
**Figure 6.19 : Spectre harmonique de la tension  $V_{ao}$  de l'onduleur CHB3 connecté au réseau électrique**

#### 6.4.4 – Système PV avec onduleur triphasé NPC cinq-niveaux

Après simulation avec les mêmes conditions de test, de température à 25°C et irradiation 1000W/m<sup>2</sup>, on obtient la figure 6.20 qui représente les formes d'onde des tensions simples  $V_{abc}$  et la tension composée  $V_{ab}$  à la sortie de l'onduleur triphasé NPC cinq niveaux, la figure 6.21 représente les formes d'onde des courants  $I_{abc}$  des trois lignes de l'onduleur.

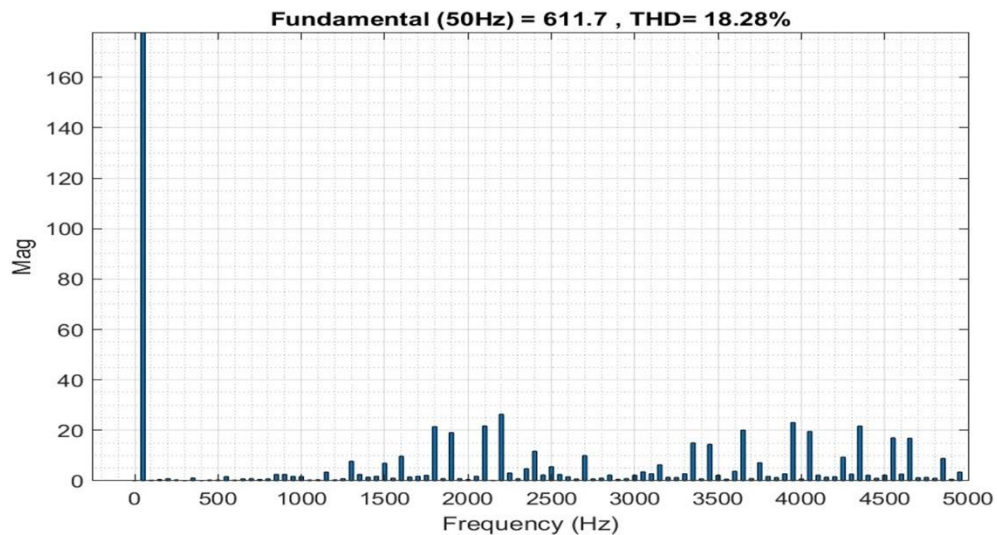


**Figure 6.20 : Forme d'onde des signaux  $V_{abc}$  et  $V_{ab}$  de l'onduleur NPC 5-niveaux connecté au réseau**

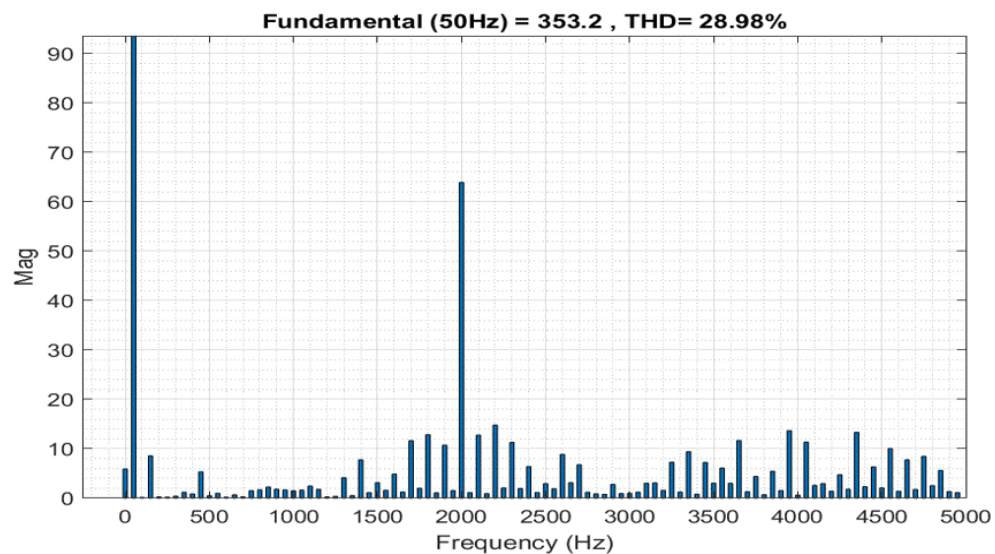


**Figure 6.21 : Forme d'onde du courant  $I_a$  de l'onduleur NPC 5-niveaux connecté au réseau**

Après l'analyse spectrale, la figure 6.22 représente les spectres harmoniques de la tension composée  $V_{ab}$  à la sortie de l'onduleur et la figure 6.23 représente les spectres harmoniques de la tension composée  $V_{ab}$  à la sortie de l'onduleur.



**Figure 6.22 : Spectre harmonique de la tension  $V_{ab}$  de l'onduleur NPC5 connecté au réseau électrique**

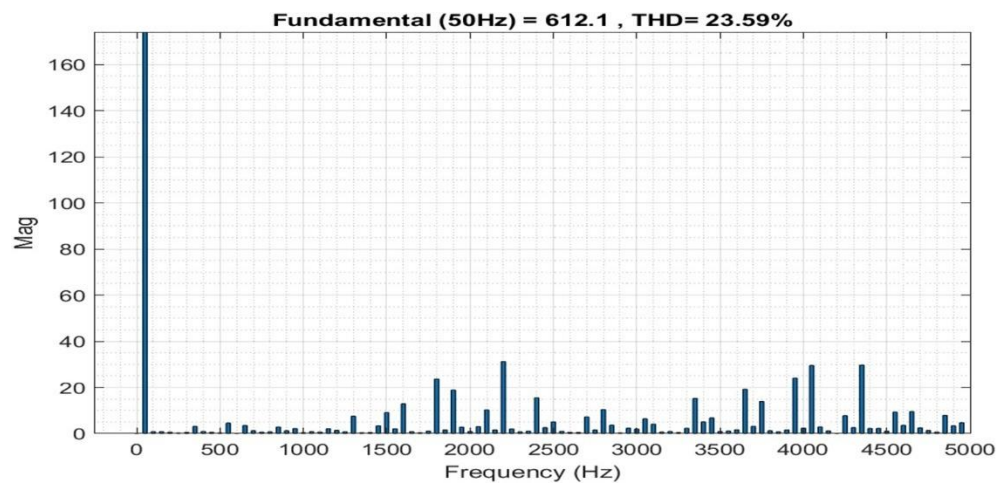


*Figure 6.23 : Spectre harmonique de la tension  $V_{ao}$  de l'onduleur NPC5 connecté au réseau électrique*

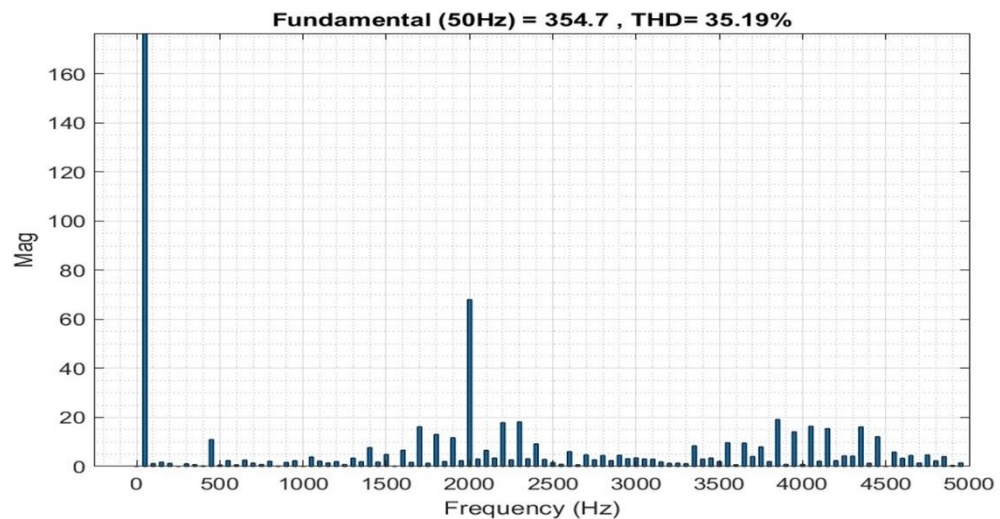
#### **6.4.5 – Système PV avec onduleur triphasé FC à cinq niveaux**

Après simulation du circuit d'un système PV avec onduleur FC à cinq niveaux, nous avons obtenu les mêmes formes d'onde obtenues dans la simulation d'un système PV avec onduleur NPC à cinq niveaux. Les valeurs de THD,  $V_{ao}$  et  $V_{ab}$  sont présentées dans le tableau 6.2.

Après l'analyse spectrale, la figure 6.24 représente les spectres harmoniques de la tension composée  $V_{ab}$  et la tension simple  $V_{ao}$  à la sortie de l'onduleur.



*Figure 6.24 : Spectre harmonique de la tension  $V_{ab}$  de l'onduleur FC5 connecté au réseau électrique*

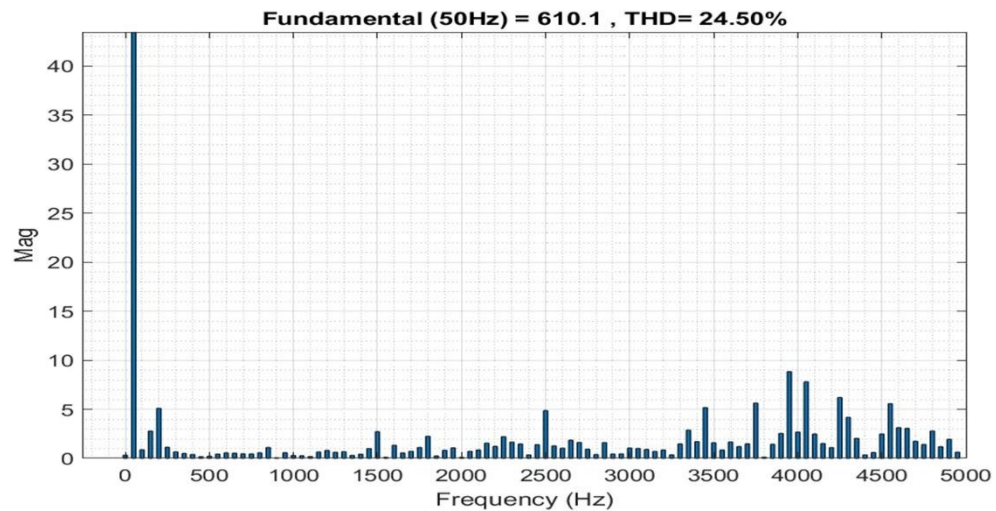


*Figure 6.25 : Spectre harmonique de la tension  $V_{ao}$  de l'onduleur FC5 connecté au réseau électrique*

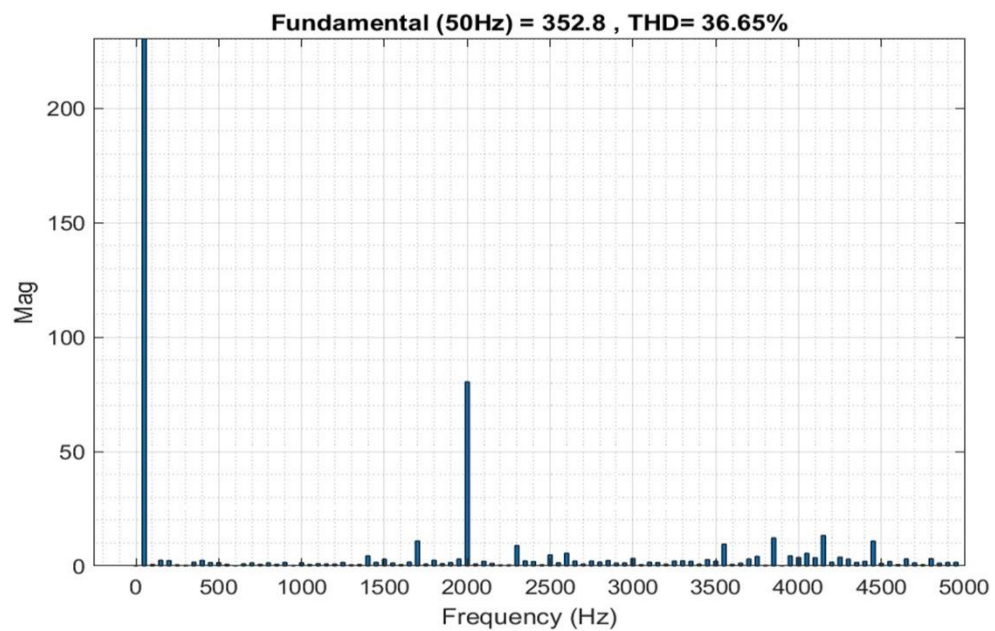
#### 6.4.6 – Système PV avec onduleur triphasé CHB à cinq niveaux

Après simulation du circuit d'un système PV avec onduleur CHB à cinq niveaux, nous avons obtenu les mêmes formes d'ondes obtenues dans la simulation d'un système PV avec onduleur NPC à trois niveaux. Les valeurs de THD  $V_{ao}$  et  $V_{ab}$  sont présentées dans le tableau 6.2.

Après l'analyse spectrale, la figure 6.28 représente les spectres harmoniques de la tension composée  $V_{ab}$  et la figure 6.29 représente les spectres harmoniques la tension simple  $V_{ao}$  à la sortie de l'onduleur.



*Figure 6.26 : Spectre harmonique de la tension  $V_{ab}$  de l'onduleur CHB5 connecté au réseau électrique*



*Figure 6.27 : Spectre harmonique de la tension  $V_{ao}$  de l'onduleur CHB5 connecté au réseau électrique*

## 6.5 – Interprétations des résultats obtenues et discussion

Le tableau suivant récapitule les résultats de l'analyse spectrale harmonique des différentes grandeurs mesurées après simulation.

**Tableau 6.2 : Tableau récapitulatif des résultats de l'analyse spectrale des différentes grandeurs mesurées**

	Topologie					
	NPC3	FC3	CHB3	NPC5	FC5	CHB5
<b>THD de la tension simple <math>V_{ao}</math> de l'onduleur (%)</b>	55.16	55.07	49.14	28.98	35.19	36.65
<b>THD de la tension composée <math>V_{ab}</math> de l'onduleur (%)</b>	35.48	35.46	32.81	18.28	23.59	24.50

**Tableau 6.3 : Tableau des valeurs des puissances active et réactive injectées au réseau**

	Topologie					
	NPC3	FC3	CHB3	NPC5	FC5	CHB5
<b>Puissance active P (KW)</b>	88.42	85.48	82.59	98.1	88.89	87.6
<b>Puissance réactive Q (var)</b>	469	471	453.3	284	310	352.3

**Tableau 6.4 : Mesure du courant et la tension aux bornes de l'IGBT**

	Topologie					
	NPC3	FC3	CHB3	NPC5	FC5	CHB5
<b>Tension aux bornes de l'IGBT <math>V_{ce}</math> (V)</b>	789.04	1481.72	1158.99	329.90	418.28	424.82
<b>Courant dans l'IGBT <math>I_{cg}</math> (A)</b>	460.71	527.89	858.34	108.39	180.63	253.45

### **6.5.1 – Interprétation des résultats de simulation d'un système PV avec onduleur trois niveaux**

Les figures 6.10 à 6.19 et le tableau 6.2 présentent les performances du système PV lorsqu'il est associé aux trois topologies d'onduleurs multiniveaux à trois niveaux : NPC, FC et CHB.

Les résultats montrent que pour la topologie NPC, le THD de la tension simple  $V_{ao}$  est de 55,16 % et celui de la tension composée  $V_{ab}$  de 35,48 %. Ces valeurs restent élevées, mais acceptables pour un fonctionnement sans filtre optimisé. La structure FC donne des résultats similaires (THD = 55,07 % pour  $V_{ao}$  et 35,46 % pour  $V_{ab}$ ), ce qui traduit un comportement harmonique proche, mais avec une légère augmentation des contraintes sur les condensateurs flottants. La structure CHB, en revanche, présente un meilleur comportement harmonique avec un THD de 49,14 % ( $V_{ao}$ ) et 32,81 % ( $V_{ab}$ ), ce qui montre une meilleure approximation sinusoïdale de la tension de sortie grâce à la modularité de ses cellules en pont H.

Concernant les contraintes électriques, le tableau 6.4 indique que les IGBT de l'onduleur CHB subissent une tension maximale de 1158,99 V et un courant de 858,34 A, contre 789,04 V/460,71 A pour le NPC et 1481,72 V/527,89 A pour le FC. Ainsi, la structure CHB répartit mieux les tensions et courants sur ses cellules, réduisant ainsi les contraintes semi-conducteurs et les pertes de commutation.

Sur le plan énergétique, le CHB présente une puissance active de 82,59 kW et une puissance réactive de 453,3 VAR, soit une injection plus stable et moins réactive que le NPC (88,42 kW, 469 VAR). Cette topologie à trois niveaux apparaît donc comme la plus efficace pour réduire les harmoniques et les contraintes sur les composants.

#### ***6.5.2 – Comparaison entre les topologies d'onduleur trois niveaux***

La comparaison quantitative des trois structures met en évidence plusieurs points importants :

- Le THD de la tension de sortie et du courant est plus faible pour le CHB, ce qui se traduit par une meilleure qualité d'énergie injectée dans le réseau.
- Le NPC présente une bonne robustesse et une bonne répartition du courant dans les bras, mais subit un déséquilibre du point neutre qui augmente légèrement le THD.
- Le FC offre une flexibilité de commande, mais ses condensateurs flottants sont sujets à un déséquilibre de tension qui peut détériorer la symétrie de la tension de sortie.
- Du point de vue des contraintes semi-conducteurs, le CHB reste le moins pénalisant, car chaque cellule ne supporte qu'une fraction de la tension totale du bus CC, ce qui réduit les pertes de commutation et l'échauffement des IGBT.

En résumé, pour le fonctionnement à trois niveaux, le CHB se distingue par une meilleure qualité de tension et un compromis efficace entre rendement, simplicité de commande et fiabilité des composants.

### ***6.5.3 – Interprétation des résultats de simulation d'un système PV avec onduleur cinq niveaux***

Les figures 6.20 à 6.27 et les tableaux 6.2 à 6.4 présentent les résultats du système PV utilisant des onduleurs NPC, FC et CHB à cinq niveaux.

L'analyse montre que le passage de trois à cinq niveaux améliore nettement la qualité des formes d'onde et réduit le THD de la tension. Ainsi, le THD de la tension  $V_{ab}$  passe de 35,48 % (NPC3) à 18,28 % (NPC5). Cette réduction confirme l'efficacité de l'augmentation du nombre de niveaux pour améliorer la qualité harmonique.

En comparant les topologies, le NPC5 présente la meilleure performance globale (THD le plus faible, puissance active élevée de 98,1 kW et puissance réactive de 284 VAR). Le FC5 et le CHB5 suivent avec des THD de 23,59% et 24,50%, respectivement.

Du point de vue des contraintes semi-conducteurs, les tensions aux bornes des IGBT sont fortement réduites dans les topologies à cinq niveaux : de 789 V (NPC3) à 330 V (NPC5). Cela confirme que l'augmentation du nombre de niveaux diminue la tension supportée par chaque interrupteur, limitant ainsi les pertes de commutation et améliorant la durabilité des composants.

#### 6.5.4 – Comparaison entre les topologies d'onduleur cinq niveaux

La comparaison quantitative des trois structures met en évidence plusieurs points importants :

- Le THD de la tension de sortie est le plus faible pour la topologie NPC5, avec 28,98% pour  $V_{ao}$  et 18,28% pour  $V_{ab}$ , ce qui traduit une meilleure qualité de tension et une forme d'onde très proche de la sinusoïde idéale.
- La structure FC5 présente un THD légèrement plus élevé (35,19% pour  $V_{ao}$  et 23,59% pour  $V_{ab}$ ), en raison du déséquilibre possible des condensateurs flottants, mais elle conserve une bonne flexibilité de commande et une réponse dynamique rapide.
- La structure CHB5 affiche un comportement harmonique stable (36,65% pour  $V_{ao}$  et 24,50% pour  $V_{ab}$ ), tout en offrant une modularité avantageuse et une meilleure répartition des contraintes électriques sur les semi-conducteurs.

Du point de vue des contraintes appliquées aux interrupteurs de puissance, la topologie CHB5 reste la moins pénalisante, car chaque cellule ne supporte qu'une fraction de la tension du bus continu, ce qui réduit les pertes de commutation et la chauffe thermique des composants.

En résumé, pour le fonctionnement à cinq niveaux, la topologie NPC5 offre la meilleure qualité de tension et la plus grande stabilité électrique, tandis que la structure CHB5 constitue un compromis efficace entre qualité harmonique, modularité et fiabilité des composants. La structure FC5, quant à elle, reste intéressante pour ses capacités de commande, mais limitée par la gestion complexe de ses condensateurs flottants.

### 6.5.5 – Synthèse des performances globales

L'analyse comparative des trois topologies d'onduleurs multiniveaux à cinq niveaux fait ressortir plusieurs constats significatifs sur leurs performances électriques et leur comportement harmonique.

L'augmentation du nombre de niveaux permet nette amélioration de la forme d'onde de la tension de sortie, avec une réduction marquée du taux de distorsion harmonique (THD). En effet, la tension composée présente un THD réduit d'environ 50% par rapport aux topologies à trois niveaux, ce qui se traduit par une forme d'onde plus sinusoïdale et une injection d'énergie plus propre vers le réseau.

Parmi les trois topologies étudiées, la structure NPC à cinq niveaux se distingue par la meilleure performance harmonique, avec des valeurs de THD de 28,98% pour la tension simple et 18,28 % pour la tension composée. Cette amélioration est due à la symétrie des commutations et à la stabilité du point neutre, qui assurent une répartition homogène des tensions sur les interrupteurs et une réduction efficace des harmoniques d'ordre élevé.

La topologie FC à cinq niveaux présente également une bonne qualité de tension, bien que légèrement inférieure à celle du NPC, avec un THD de 35,19% pour  $V_{ao}$  et 23,59% pour  $V_{ab}$ . Elle offre une grande flexibilité de commande et une réactivité rapide, mais reste limitée par le déséquilibre des condensateurs flottants, qui peut altérer la symétrie de la tension de sortie au fil du temps.

Quant à la structure CHB à cinq niveaux, elle affiche un comportement harmonique stable (THD de 36,65% pour  $V_{ao}$  et 24,50% pour  $V_{ab}$ ) ainsi qu'une modularité avantageuse, permettant de réduire les contraintes électriques sur les interrupteurs. Chaque cellule ne

supporte qu'une fraction de la tension totale du bus continu, ce qui contribue à réduire les pertes de commutation et à améliorer la fiabilité thermique du système.

En conclusion, la topologie NPC5 offre la meilleure qualité de tension et une stabilité électrique supérieure, constituant ainsi la solution la plus performante pour les systèmes photovoltaïques connectés au réseau. La structure CHB5, de son côté, demeure un excellent compromis entre performance harmonique, modularité et réduction des contraintes sur les semi-conducteurs, tandis que la structure FC5 conserve l'avantage d'une commande souple, mais reste limitée par la gestion complexe de ses condensateurs.

## **6.6 – Conclusion**

Dans ce chapitre on a modélisé et la simulé un système photovoltaïque connecté au réseau à l'aide d'un convertisseur CC-CA multiniveaux. Le modèle global a intégré le générateur photovoltaïque, le convertisseur Boost associé à la commande MPPT de type P&O, l'onduleur multiniveaux commandé par la technique SPWM en disposition de phase, le filtre LC, la charge RL et la boucle de synchronisation PLL.

Les simulations réalisées sous MATLAB/Simulink nous ont permis d'analyser le comportement dynamique du système et la qualité de l'énergie injectée. Nos résultats ont montré qu'une augmentation du nombre de niveaux de tension améliore nettement la qualité de la tension de sortie et réduit le taux de distorsion harmonique (THD) d'environ 50 %.

La comparaison qu'on a faite entre les trois topologies d'onduleurs (NPC, FC et CHB) a mis en évidence que la structure NPC à cinq niveaux offre la meilleure performance harmonique et une stabilité de fonctionnement supérieure.

Ainsi, ce chapitre a permis de valider le modèle global du système photovoltaïque connecté au réseau et de démontrer l'influence du choix de la topologie sur la qualité de l'énergie injectée. Notre contribution principale réside dans la modélisation intégrée et la comparaison quantitative des topologies NPC, FC et CHB, qui constituent une base solide pour le dimensionnement optimal des convertisseurs multiniveaux appliqués aux systèmes photovoltaïques.

## CHAPITRE 7 – CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce travail a porté sur la modélisation, la commande et l'analyse comparative d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique à l'aide d'un convertisseur CC-AC multiniveaux. L'objectif principal de ce travail était de modéliser et de simuler des topologies d'onduleurs capables d'améliorer la qualité de l'énergie injectée tout en réduisant les contraintes appliquées aux composants de puissance. L'ensemble des travaux a été réalisé dans l'environnement MATLAB/Simulink, permettant de développer un modèle numérique complet et cohérent.

Dans un premier temps, les différentes topologies d'onduleurs multiniveaux, à savoir NPC, FC et CHB, ont été modélisées et simulées individuellement lorsqu'elles alimentent une charge inductive. Cette étape, présentée au chapitre 5, a permis d'analyser le comportement des onduleurs à trois et cinq niveaux, de comparer leurs tensions de sortie et d'évaluer leurs taux de distorsion harmonique (THD). Les résultats ont montré que l'augmentation du nombre de niveaux améliore significativement la qualité de la tension de sortie, tandis que la topologie CHB se distingue par sa modularité et la réduction des contraintes électriques sur les semi-conducteurs.

Dans un second temps, le chapitre 6 a présenté la modélisation complète d'un système photovoltaïque connecté au réseau, intégrant le générateur photovoltaïque, le convertisseur CC-CC de type Boost associé à la commande MPPT P&O, ainsi que les onduleurs multiniveaux (NPC, FC et CHB) commandés par la technique SPWM en

disposition de phase. Le modèle a été complété par un filtre LC, une charge RL et une boucle de synchronisation PLL assurant la cohérence de phase avec le réseau électrique. Les simulations ont permis d'évaluer la qualité de l'énergie injectée, montrant une amélioration nette du THD et une meilleure stabilité de tension avec l'augmentation du nombre de niveaux.

Les contributions réelles de ce travail sont multiples et complémentaires. D'abord, une modélisation complète et structurée des trois topologies d'onduleurs multiniveaux connectés à une charge inductive a été réalisée, permettant une analyse comparative claire entre les structures NPC, FC et CHB à trois et cinq niveaux. Ensuite, un modèle global d'un système photovoltaïque connecté au réseau a été développé, intégrant toutes les composantes nécessaires à son fonctionnement réaliste : convertisseur Boost, commande MPPT, onduleur multiniveaux, filtre LC et PLL. Ce modèle a permis de quantifier l'impact du nombre de niveaux sur la qualité de tension et sur les contraintes électriques appliquées aux interrupteurs de puissance. Enfin, les résultats de simulation ont permis de justifier le choix des topologies les plus performantes selon les critères de rendement, de robustesse et de stabilité du point neutre.

Cependant, certaines limites doivent être reconnues. Le modèle proposé reste numérique et n'a pas fait l'objet d'une validation expérimentale. Les effets réels, tels que les pertes de commutation, les délais de commande, les variations thermiques et les imprécisions des capteurs, n'ont pas été pris en compte. De plus, la stratégie de commande utilisée repose sur une modulation sinusoïdale SPWM classique, dont l'efficacité pourrait être surpassée par des techniques plus avancées.

Pour la poursuite de ces travaux, plusieurs perspectives d'amélioration sont envisageables. Une validation expérimentale sur un banc de test photovoltaïque réel permettrait de confronter les résultats simulés aux mesures pratiques. L'étude pourrait également être étendue à d'autres topologies d'onduleurs multiniveaux, comme les structures modulaires (MMC) ou hybrides, plus adaptées aux puissances élevées. Enfin, l'intégration de stratégies de commande plus avancées, telles que la modulation vectorielle spatiale (SVPWM), la PWM sélective harmonique (SHE-PWM) ou encore la commande prédictive, permettrait d'améliorer la qualité de la tension de sortie et d'optimiser le rendement énergétique global du système.

En conclusion, ce mémoire a permis de démontrer l'efficacité des convertisseurs multiniveaux dans l'amélioration de la qualité de l'énergie produite par les systèmes photovoltaïques connectés au réseau. Les modèles et analyses développés constituent une contribution concrète à la compréhension et à l'optimisation de ces architectures, tout en offrant une base solide pour le développement futur de solutions expérimentales et de stratégies de commande plus performantes, en vue d'une intégration durable et efficace de l'énergie solaire dans les réseaux électriques modernes.

## Bibliographie

- [1] D. C. Shaik Nyamathulla, «Examen des topologies d'onduleurs multiniveaux pour les systèmes photovoltaïques solaires durables raccordés au réseau,» *sustainability*, 2023.
- [2] K. P. J. K. Shanikumar Vaidya, «Le rôle des onduleurs multiniveaux dans l'atténuation des harmoniques et l'amélioration de la qualité de l'énergie dans les réseaux intelligents alimentés par des énergies renouvelables : une revue complète,» *energies*, 2025.
- [3] B. M. e. L. A. Ravi Samikannu, «Analyse structurelle des onduleurs hybrides multiniveaux à nombre de commutateurs réduit,» *frontiers*, 2024.
- [4] S. M. ., V. S. e. a. Bhupender Sharma, «Un examen complet des onduleurs multiniveaux, de la modulation et du contrôle des systèmes photovoltaïques solaires raccordés au réseau,» *Rapports scientifiques*, 2025.
- [5] H. M. X. P. L. e. a. Rui Cai, «Largeur admissible des piliers pour le stockage de gaz en cavernes salines selon une configuration de puits triangulaire : une étude de cas en Chine,» *energies*, Vol.17, 2024.
- [6] H. M. D. H. M. H. e. a. Edrees Yahya Alhawsawi, «Conception et exploitation optimales des systèmes hybrides d'énergies renouvelables pour l'Université d'Oakland,» *energies*, 2023.
- [7] D. X. Y. W. e. a. Wei Gu, «Recherche sur la stabilité et l'étanchéité à l'eau des piliers de charbon étanches entre deux fronts de taille adjacents sous l'influence de l'accumulation d'eau dans les zones d'exploitation abandonnées — Étude de cas,» *applied sciences*, 2024.
- [8] S. C. A. F. e. a. Alessandro Benevieri, «Progrès et perspectives des convertisseurs multiniveaux : une revue complète,» *electronics*, 2024.
- [9] M. A. a. S. D. e. a. Amirreza Azizi, «Étude comparative des topologies et des stratégies de contrôle des onduleurs de forte puissance dans les grandes centrales photovoltaïques,» *Helion*, 2025.
- [10] N. K. e. N. Korolev, «Courbe de diagnostic pour la détection en ligne des défauts dans les variateurs de fréquence,» *energies*, 2024.
- [11] F. Portillo, A. Alfredo et G. e. a. Rosa Maria, «Life Cycle Assessment in Renewable Energy: Solar and Wind Perspectives,» *Environments*, 2024.
- [12] A. A. M. M. S. H. L. e. a. Tuhibur Rahman, «Investigation of Degradation of Solar Photovoltaics: A Review of Aging Factors, Impacts, and Future Directions toward Sustainable Energy Management,» *energies*, 2023.
- [13] Q. Z. S. W. e. a. Mingxuan Mao, «Control and Intelligent Optimization of a Photovoltaic (PV) Inverter System: A Review,» *energies*, 2024.

- [14] A. L. a. S. Hegedus, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, John Wiley & Sons Ltd, 2003.
- [15] S. A. Ludovic Protin, «Convertisseurs photovoltaïques,» *Génie électrique D 3360, Techniques de l'ingénieur*, 1997.
- [16] Chebana A, «Contrôle d'un système photovoltaïque connecté au réseau,» Université Mohamed Khider Biskra, 2014.
- [17] D. B. D. A. Gohmez Mohammed Yassine, «Modélisation et commande d'un système PV connecté au réseau électrique utilisant DSTATCOM,» UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, Algérie, 2019/2020.
- [18] M. K. M. D. S. M. Mohamed Hafeez Mohamed Hariri, «Système de production photovoltaïque connecté au réseau : composants et défis : analyse,» *energies*, 2020.
- [19] W. Boucheritte, «Convertisseurs multi niveaux dans les systèmes PV Connectés au réseau,» Mémoire de Magistère, Université de Biskra, Algérie, 2013.
- [20] S. K. Abdelhamid Kaabeche, «Optimisation du dimensionnement d'un système hybride photovoltaïque/éolien par des méthodes méta heuristiques,» *Journal des énergies renouvelables 20(2)*, 2017.
- [21] B. H. EDDINE, «Topologie d'onduleurs Multiniveaux et Stratégie de Commande (Application aux Systèmes photovoltaïques),» UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR- ANNABA, Algérie, 2021.
- [22] Picault D, «Reduction of mismatch losses in grid-connected photovoltaic systems using alternative topologies,» Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, Grenoble, 2010.
- [23] W. Omran, «Performance Analysis of Grid-Connected Photovoltaic Systems,» the University of Waterloo, Ontario, Canada, 2010.
- [24] C. C. R.-A. T. e. F. M. S. e. Maria Cristea, «Levelized Cost of Energy (LCOE) of Different Photovoltaic Technologies,» *applied sciences*, 2025.
- [25] E. B. Mir Esmaeel Seyed Mahmoodieh, «Méthode systématique de conception des éléments du convertisseur Cuk,» *Journal international des systèmes électriques et énergétiques 55:351–361 DOI : 10.1016/j.ijepes.2013.09.024*, 2014.
- [26] J. M. E. G. Elsevier BV, «Évaluation théorique de l'efficacité de suivi du point de puissance maximale des installations photovoltaïques avec différentes topologies de convertisseurs,» *Énergie solaire*, 2007.
- [27] M. A. Mazouz N, «Electrical Power and Energy Systems Control of a DC / DC converter by fuzzy controller for a solar pumping system,» *Int J Electr Power Energy Syst*, 2011.
- [28] R. MH., «POWER ELECTRONICS,» *Academic Press Series in Engineering*, 2001.
- [29] M. S. Harrag A, «Adaptive GA-based reconfiguration of photovoltaic array combating partial shading conditions,» *Neural Comput Appl*, 2016.

- [30] «Review of DC-DC boost converter derived topologies for renewable energy applications,» *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, 2024.
- [31] K. Z. M. M. Kummara Venkat Guru Raghavendra, «A Comprehensive Review of DC-DC Converter Topologies and Modulation Strategies with Recent Advances in Solar Photovoltaic Systems,» *electronics*, 2019.
- [32] A. E. R. B. Hazem Meshael, «High Gain Isolated Switched-Boost DC-DC Converter for PV Application,» *Queen's University Belfast*, 2023.
- [33] M. H. M. A. Farahat MA, «Optimal choice and design of different topologies of DC e DC converter used in PV systems , at different climatic conditions in Egypt,» *Renew Energy*, 2012.
- [34] D. F. B. A. B. N. B. A. Ballouti A, «Mppt system for photovoltaic module connected to battery adapted for unstable atmospheric conditions using vhdl-ams,» *Arab J Sci Eng*, 2014.
- [35] A. K. Pati, «A new approach in maximum power point tracking for a photovoltaic array with power management system using Fibonacci search algorithm under partial shading conditions,» *Energy Syst*, 2016.
- [36] P. R. Anouar H M, «A Modified Incremental Conductance Based Photovoltaic MPPT Charge Controller,» 2019.
- [37] X. JIANG, «Étude comparative de structures de convertisseurs pour les systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique moyenne tension,» Université du Québec à Trois-Rivières, TROIS-RIVIÈRES, QUÉBEC, 2019.
- [38] Sahraoui H, «Modélisation Et Commande Des Convertisseurs DC-DC Utilisés Dans Les Systèmes Photovoltaïques (Théorie et Expérimentation),» Université de Batna 2, Algérie, 2017.
- [39] C. P. L. ESRAM T, «Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques,» *IEEE Transactions on Energy conversion*, 2007.
- [40] S. S, «Maximum power point tracking algorithms for photovoltaic system: a review,» *International Review of Applied Engineering Research*, 2014.
- [41] A. B. M. S. O. Z. a. M. S. A. Musong L. Kathe, «A Comprehensive Review of Maximum Power Point Tracking (MPPT) Techniques Used in Solar PV Systems,» *energies*, 2023.
- [42] L. S. Yulin Wang, «Technologie de suivi du point de puissance maximale photovoltaïque basée sur une méthode améliorée d'observation des perturbations et un algorithme de retour en arrière,» *electronics*, 2024.
- [43] R. K. M. A. S. M. Abhinav Saxena, «Extraction maximale de puissance des systèmes solaires photovoltaïques à l'aide de stratégies de calcul logiciel intelligentes : une analyse critique et une analyse complète des performances,» *Helion*, 2023.

- [44] Lahlah S, «Étude comparative des technique MPPT perturbation and observation (P&O) Incrémentale conductance (Inc. Con) et Hill climbing (HC),» Mémoire préparée au laboratoire d'électrotechnique de Batna, Batna, 2007.
- [45] Zergoune M A et Hideb, «Commande d'onduleur multiniveaux à structure en cascade par stratégie d'élimination d'harmonique sélective,» Université Kasdi Merbah de Ouargla, Algérie, 2017.
- [46] N. I. I. Abaidi Oussama, «Modélisation et Simulation d'un Onduleur à Trois Niveaux NPC alimenter par une machine asynchrone double étoile,» UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, Algerie, 2023.
- [47] B. K, «Étude de différentes topologies des onduleurs multi niveaux (Cascade et NPC),» Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar, Annaba, Algerie , 2020.
- [48] M. Mohammed, «Étude et conception d'un onduleur photovoltaïque,» Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Algérie, 2015.
- [49] D. J. N. A. N. H. Nik Fasdi Nik Ismail, «A Comparative Study between Phase Disposition PWM(PDPWM) and Phase Opposition Disposition (PODPWM) for Cascade H-Bridge, Flying Capacitor and Neutral Point Clamped Multilevel Voltage Source Inverters (MVSIs),» *International Journal of Engineering & Technology*, n° 18 (1.7) (2019) 33-40, pp. 34-40, 2019.
- [50] V. R. Vijaya Sambhavi Y, «Phase disposition PWM control topology based: A novel multilevel inverter with reduced switch for power electronics applications,» *Heliyon*, 2024.
- [51] S. M. V. S. e. a. Bhupender Sharma, «A comprehensive review of multilevel inverters, modulation, and control for grid-interfaced solar PV systems,» *scientific reports*, 2025.
- [52] S. N. P. P. K. e. a. Ramakrishna S, «Design and implementation of single DC-link based three-phase multilevel inverter with CB-PWM techniques,» *scientific reports*, 2024.
- [53] A. A. E. M. T. e. a. Sofia Lemssaddak, «A Novel Multilevel Inverter Topology Generating a 19-Level Output Regulated by the PD-PWM Method,» *energies*, 2025.
- [54] C. Anouar, «Techniques d'intégration d'un système photovoltaïque au réseau,» Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf -Mila, Algérie, 2022.
- [55] V. C. E. Semakina, «Études expérimentales et numériques de l'aérodynamique d'un système d'échappement de turbine à gaz stationnaire à deux arbres,» *energies*, 2023.