

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

PAR  
XUEYANG JIANG

ÉTUDE COMPARATIVE DE STRUCTURES DE CONVERTISSEURS  
POUR LES SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES CONNECTÉS À UN  
RÉSEAU ÉLECTRIQUE MOYENNE TENSION

AOÛT 2019

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

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

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 ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE (M. Sc. A.)

Programme offert par l'Université du Québec à Trois-Rivières

ÉTUDE COMPARATIVE DE STRUCTURES DE CONVERTISSEURS  
POUR LES SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES CONNECTÉS À UN  
RÉSEAU ÉLECTRIQUE MOYENNE TENSION

PAR

XUEYANG JIANG

---

Mamadou Lamine DOUMBIA,  
directeur de recherche

Université du Québec à Trois-Rivières

---

Ahmed CHÉRITI, évaluateur

Université du Québec à Trois-Rivières

---

Rachid BEGUENANE, évaluateur

Collège Militaire Royal du Canada

# Résumé

Devant le développement des énergies renouvelables, et en ce qui concerne l'énergie solaire, la demande de la conversion de cette énergie, pour les applications connectées au réseau électrique, augmente de plus en plus. La recherche en électronique de puissance s'intéresse de plus en plus à la topologie des onduleurs solaires.

L'onduleur est le cœur de tout système photovoltaïque alimentant des charges en courant alternatif ou connecté à un réseau électrique. Cet appareil est utilisé pour convertir le courant continu obtenu à partir du générateur photovoltaïque (PV) en courant alternatif à alimenter le réseau. Il joue le rôle d'interface entre le champ photovoltaïque et le réseau électrique.

On distingue trois topologies d'onduleur multi-niveaux, à savoir les topologies à diodes de bouclage (Neutral Point Clamped : NPC), à condensateurs flottants (Flying Capacitors : FC) et en pont H cascades (Cascade H-Bridge : CHB). Ce travail consiste à l'étude comparative des trois onduleurs multi-niveaux dans les systèmes photovoltaïques connectés à un réseau en moyenne tension.

Les principaux éléments constitutifs d'une centrale PV connectée au réseau sont modélisés et simulés sous Matlab/Simulink. Le générateur PV, le convertisseur CC/CC (hacheur élévateur) et les convertisseurs CC/CA (onduleurs multi-niveaux) sont ainsi représentés par des modèles mis au point en vue d'une simulation de comportement de l'ensemble du réseau.

Nous finirons par une analyse comparative des caractéristiques, performances et spectres des signaux de sortie des topologies à 3 et 5 niveaux afin d'identifier celles offrant les meilleures performances.



# Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude ainsi que toute ma reconnaissance à mon directeur de mémoire M. Mamadou Lamine DOUMBIA, Professeur au département de génie électrique et génie informatique à l'Université du Québec à Trois-Rivières, qui en tant que directeur de mémoire s'est toujours montré très disponible, le long de la réalisation de ce mémoire et pour ses conseils.

Je tiens à remercier également tous les professeurs du département de génie électrique et génie informatique de l'UQTR et spécialement les professeurs, qui ont accepté de corriger mon mémoire : le professeur Ahmed CHERITI de l'UQTR et le professeur Rachid BEGUENANE du Collège Militaire Royal du Canada.

Je voudrais remercier tout particulièrement tous les membres de ma famille ainsi que mes parents de leur soutien et leurs encouragements tout au long de mon cursus.



# Table des matières

Résumé .....	I
Remerciements .....	II
Table des matières .....	III
Liste des figures .....	VII
Liste des tableaux .....	XI
Liste des Symboles et Abréviations .....	XII
Introduction générale .....	I
<b>Chapitre 1 : Production d'électricité par le solaire photovoltaïque</b>	
1.1 Énergie solaire .....	4
1.2 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque .....	4
1.3 Cellule photovoltaïque .....	5
1.3.1 Effet photovoltaïque .....	6
1.3.2 Différents types de cellules photovoltaïques .....	6
1.4 Générateur photovoltaïque .....	7
1.4.1 Module photovoltaïque .....	8
1.4.2 Panneau photovoltaïque .....	8
1.4.3 Paramètres d'un module PV .....	9
1.4.4 Influences de l'éclairement sur les caractéristiques I-V et P-V .....	10
1.4.5 Influences de la température sur les caractéristiques I-V et P-V .....	10
1.5 Modèle d'une cellule photovoltaïque .....	11
1.5.1 Cas d'une cellule idéale .....	11



1.5.2 Cas d'une cellule photovoltaïque réelle .....	13
1.6 Conclusion .....	15

## **Chapitre 2 : Hacheurs de puissance pour systèmes photovoltaïques**

2.1 Convertisseurs CC-CC .....	16
2.2 Types des convertisseurs CC-CC .....	16
2.2.1 Convertisseurs non isolés de la source .....	16
2.2.2 Convertisseurs isolés de la source .....	17
2.3 Fonctionnement du convertisseur élévateur (Boost) .....	18
2.4 Importance du MPPT (Maximum Power Point Tracker) .....	21
2.5 Méthode de perturbation et observation (P&O) .....	23
2.5.1 Principe de méthode P&O .....	23
2.5.2 Organigramme de méthode P&O .....	24
2.6 Conclusion .....	26

## **Chapitre 3. Systèmes photovoltaïques connectés au réseau**

3.1 Classification d'un système photovoltaïque .....	27
3.1.1 Système autonome .....	27
3.1.2 Système connecté au réseau .....	27
3.2 Avantages et inconvénients des systèmes connectés au réseau .....	29
3.3 Topologies des systèmes photovoltaïques connectés au réseau .....	30
3.3.1 Topologie d'onduleur central (Centralized inverter) .....	30



3.3.2 Topologie d'onduleur string (String inverter).....	31
3.3.3 Topologie d'onduleur multi-string (Multi-string inverter) .....	32
3.3.4 Topologie d'onduleur modulaire (Module inverter) .....	33
3.4 Onduleurs multi-niveaux .....	35
3.5 Différents topologie des onduleurs multi-niveaux .....	36
3.5.1 Onduleur de tension à diodes de bouclage .....	37
3.5.2 Onduleur de tension à condensateur flottant .....	40
3.5.3 Onduleur multi-niveaux en pont H cascades .....	41
3.6 Comparaison entre les trois principaux onduleurs multi-niveaux .....	44
3.7 Modulation de largeur d'impulsion (MLI) .....	45
3.7.1 La modulation sinus-triangle (MLI sinusoïdale) .....	45
3.8 Raccordement de l'onduleur PV au réseau électrique .....	48
3.8.1 Boucle à verrouillage de phase (PLL : Phase Locked Loop) .....	49
3.8.2 Contrôle des courants envoyés au réseau électrique .....	50
3.8.3 Contrôle de la tension du bus continu .....	51
3.9 Conclusion .....	52

## **Chapitre 4. Modélisation et simulation du système photovoltaïque connecté au réseau**

4.1 Simulation de module photovoltaïque .....	53
4.2 Modélisation et simulation des structures d'onduleurs triphasés.....	55
4.2.1 Modèle d'onduleur NPC 3-niveaux développé .....	55
4.2.2 Modèle d'onduleur FC 3-niveaux développé .....	55
4.2.3 Modèle d'onduleur CHB 3-niveaux développé .....	56



4.2.4 Analyse Comparative des formes d'ondes obtenues en simulation pour les trois modèles d'onduleur à 3-niveaux .....	57
4.2.5 Analyse comparative des formes d'ondes obtenues en simulation pour les trois modèles d'onduleur à 5-niveaux .....	63
4.3 Simulation de l'onduleur multi-niveaux dans un système PV connecté au réseau .....	69
4.4 Résultats de simulation .....	71
4.4.1 Onduleur à 3-niveaux .....	71
4.4.2 Onduleur à 5-niveaux .....	76
4.5 Conclusion .....	83
 <b>Chapitre 5. Conclusion générale et recommandations</b>	
5.1 Conclusion générale .....	84
5.2 Recommandations .....	85
 <b>Références</b> .....	 87
<b>Annexes</b> .....	91

## Liste des figures

<i>Figure 1 : Topologies d'installations PV : a) onduleur central. b) onduleurs strings. c) multi-string mixte. d) onduleurs intégrés</i> .....	2
<i>Figure 1.1 : Schéma d'une photovoltaïque</i> .....	6
<i>Figure 1.2 : Types de cellules photovoltaïques</i> .....	7
<i>Figure 1.3 : Configuration des cellules photovoltaïques</i> .....	8
<i>Figure 1.4 : a) Caractéristique I-V en fonction de l'éclairement b) Caractéristique P-V en fonction de l'éclairement</i> .....	10
<i>Figure 1.5 : a) Caractéristique I-V en fonction de la température b) Caractéristique P-V en fonction de la température</i> .....	11
<i>Figure 1.6 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale</i> .....	12
<i>Figure 1.7 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale</i> .....	13
<i>Figure 1.8 : Circuit équivalent du module PV</i> .....	14
<i>Figure 2.1 : Schéma des convertisseurs CC-CC couramment utilisés a) Boost; (b) Buck; (c) Buck-boost</i> .....	17
<i>Figure 2.2 : Schéma équivalent du Boost quand l'interrupteur est fermé</i> .....	19
<i>Figure 2.3 : Schéma équivalent du Boost quand l'interrupteur est ouvert</i> .....	19
<i>Figure 2.4 : Caractéristique de puissance maximum</i> .....	22
<i>Figure 2.5 : Caractéristique de fonctionnement de la méthode P&amp;O</i> .....	24
<i>Figure 2.6 : Organigramme de MPPT de la perturbation &amp; observation</i> .....	25
<i>Figure 3.1 : Schéma d'un système autonome (a) et d'un système connecté au réseau (b)</i> .....	28
<i>Figure 3.2 : Arbre des systèmes photovoltaïques</i> .....	28
<i>Figure 3.3 : Topologie d'onduleur central</i> .....	30
<i>Figure 3.4 : Topologie d'onduleur string</i> .....	31
<i>Figure 3.5 : Topologie d'onduleur multi-string</i> .....	32
<i>Figure 3.6 : Topologie d'onduleur modulaire</i> .....	33
<i>Figure 3.7 : Onduleur à niveaux multiples : a) à deux niveaux. b) à trois niveaux. c) à N niveaux</i> .....	35
<i>Figure 3.8 : Différentes topologies des onduleurs multi-niveaux</i> .....	36



<i>Figure 3.9 : Circuit d'une phase d'un onduleur NPC a) à trois niveaux. b) à cinq niveaux</i>	37
<i>Figure 3.10 : Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur NPC trois niveaux</i>	38
<i>Figure 3.11 : Circuit d'une phase d'un onduleur à condensateur flottant a) à trois niveaux b) à cinq niveaux</i>	40
<i>Figure 3.12 : Circuit d'une phase d'un onduleur en pont H cascadié a) à trois niveaux b) à cinq niveaux et c) à N niveaux</i>	42
<i>Figure 3.13 : Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur trois niveaux en cascade</i>	43
<i>Figure 3.14 : Schéma de principe de la technique MLI sinusoïdale</i>	46
<i>Figure 3.15 : Forme d'onde des signaux PD pour 7 niveaux</i>	47
<i>Figure 3.16 : Forme d'onde des signaux POD pour 7 niveaux</i>	47
<i>Figure 3.17 : Forme d'onde des signaux APOD pour 7 niveaux</i>	48
<i>Figure 3.18 : Schéma synoptique de commande de la connexion au réseau</i>	49
<i>Figure 3.19 : Schéma de régulation de la PLL</i>	50
<i>Figure 3.20 Schéma bloc du contrôle des courants transités par le réseau dans le repère de Park</i>	51
<i>Figure 4.1: Bloc du module Poly ELYSUN dans Simulink</i>	53
<i>Figure 4.2 a) Caractéristique <math>I(V)</math> et b) caractéristique <math>P(V)</math> d'un module PV pour différentes valeurs de l'éclairement</i>	54
<i>Figure 4.3 a) Caractéristique <math>I(V)</math> et b) caractéristique <math>P(V)</math> d'un module PV pour différentes valeurs de température</i>	55
<i>Figure 4.4 Modèle développé d'onduleur NPC 3-niveaux</i>	55
<i>Figure 4.5 Modèle développé d'onduleur FC 3-niveaux</i>	56
<i>Figure 4.6 Modèle développé d'onduleur CHB 3-niveaux</i>	56
<i>Figure 4.7 Forme des signaux de l'onduleur NPC 3-niveaux</i>	57
<i>Figure 4.8 Spectre harmonique de la tension <math>V_{un}</math> de NPC 3-niveaux</i>	58
<i>Figure 4.9 Spectre harmonique de la tension <math>V_{ub}</math> de NPC 3-niveaux</i>	58

Figure 4.10 Spectre harmonique du courant de charge NPC 3-niveaux .....	58
Figure 4.11 Forme des signaux de l'onduleur CHB 3-niveaux .....	59
Figure 4.12 : Spectre harmonique de la tension $V_{an}$ de CHB 3-niveaux .....	59
Figure 4.13 : Spectre harmonique de la tension $V_{ab}$ de CHB 3-niveaux .....	60
Figure 4.14 : Spectre harmonique du courant de charge de CHB 3-niveaux .....	60
Figure 4.15 : Forme des signaux de l'onduleur FC 3-niveaux .....	61
Figure 4.16 : Spectre harmonique de la tension $V_{an}$ de FC 3-niveaux .....	61
Figure 4.17 : Spectre harmonique la tension $V_{ab}$ de FC 3-niveaux .....	61
Figure 4.18 : Spectre harmonique du courant $I_a$ de FC 3-niveaux .....	62
Figure 4.19 : Forme des signaux de l'onduleur NPC 5-niveaux .....	64
Figure 4.20 : Spectre harmonique de la tension $V_{an}$ de NPC 5-niveaux .....	64
Figure 4.21 : Spectre harmonique de la tension $V_{ab}$ de NPC 5-niveaux .....	65
Figure 4.22 : Spectre harmonique du courant $I_a$ de NPC 5-niveaux .....	65
Figure 4.23 : Forme des signaux de l'onduleur CHB 5-niveaux .....	66
Figure 4.24 : Spectre harmonique de la tension $V_{an}$ de CHB 5-niveaux .....	66
Figure 4.25 : Spectre harmonique de la tension $V_{ab}$ de CHB 5-niveaux .....	66
Figure 4.26 : Spectre harmonique du courant de charge de CHB 5-niveaux .....	67
Figure 4.27 : Forme des signaux de l'onduleur FC 5-niveaux .....	67
Figure 4.28 : Spectre harmonique de la tension $V_{an}$ de FC 5-niveaux .....	68
Figure 4.29 : Spectre harmonique la tension $V_{ab}$ de FC 5-niveaux .....	68
Figure 4.30 : Spectre harmonique du courant $I_a$ de FC 5-niveaux .....	68
Figure 4.31 : Schéma de simulation global système PV connecté au réseau .....	70
Figure 4.32 : Schéma du hacheur élévateur (Boost) .....	71
Figure 4.33 : Forme des signaux de l'onduleur NPC 3-niveaux connecté au réseau .....	72
Figure 4.34 : Forme des courants de NPC 3-niveaux .....	72
Figure 4.35 : Spectres harmoniques des signaux de NPC 3-niveaux .....	73
Figure 4.36 : Forme des signaux de l'onduleur FC 3-niveaux connecté au réseau .....	73
Figure 4.37 : Forme des courants de FC 3-niveaux .....	74

<i>Figure 4.38 : Spectres harmoniques des signaux de FC 3-niveaux</i>	74
<i>Figure 4.39 : Forme des signaux de l'onduleur CHB 3-niveaux connecté au réseau</i>	75
<i>Figure 4.40 : Forme des courants de CHB 3-niveaux</i>	75
<i>Figure 4.41 : Spectres harmoniques des signaux de CHB 3-niveaux</i>	76
<i>Figure 4.42 : Forme des signaux de l'onduleur NPC 5-niveaux connecté au réseau</i>	77
<i>Figure 4.43 : Forme des courants de NPC 5-niveaux</i>	77
<i>Figure 4.44 : Spectres harmoniques des signaux de NPC 5-niveaux</i>	78
<i>Figure 4.45 : Forme des signaux de l'onduleur FC 5-niveaux connecté au réseau</i>	78
<i>Figure 4.46 : Forme des courants de FC 5-niveaux</i>	79
<i>Figure 4.47 : Spectres harmoniques des signaux de FC 5-niveaux</i>	79
<i>Figure 4.48 : Forme des signaux de l'onduleur CHB 5-niveaux connecté au réseau</i>	80
<i>Figure 4.49 : Forme des courants de CHB 5-niveaux</i>	80
<i>Figure 4.50 : Spectres harmoniques des signaux de NPC 5-niveaux</i>	81



## Liste des tableaux

Tableau 2.1: Rapports de transformation des principaux convertisseurs CC-CC ----	18
Tableau 3.1 : Comparaison entre les différentes topologies -----	34
Tableau 3.2 : États de commutation de l'onduleur NPC à trois niveaux -----	39
Tableau 3.3 : États possibles de l'onduleur cascade à trois niveaux -----	43
Tableau 3.4 : Nombre de composants nécessaires à la réalisation des trois structures d'onduleurs multi-niveaux -----	44
Tableau 4.1 : Caractéristiques électriques du module photovoltaïque Poly ELYSUN dans les conditions standards de test (CST) -----	53
Tableau 4.2 : Comparaison des résultats de simulation des trois types d'onduleurs 3-niveaux -----	63
Tableau 4.3 : Comparaison des résultats de simulation des trois types d'onduleur 5-niveaux -----	69
Tableau 4.4 : Comparaison des résultats de simulation des trois types d'onduleur --	82

## Liste des Symboles et Abréviations

### Symboles

$P_c$	Puissance crête (W)
$P_{max}$	Puissance maximale (W)
$V_{co}$	Tension de circuit-ouvert (V)
$I_{cc}$	Courant de court-circuit (A)
$I$	Courant de la cellule photovoltaïque (A)
$I_d$	Courant de diode (A)
$I_{ph}$	Photo-courant, dépendant de l'intensité de l'irradiation (A)
$I_p$	Courant dérivé par la résistance parallèle (A)
$I_0$	Courant de saturation de diode, dépendant de la température (A)
$V$	Tension de la cellule photovoltaïque (V)
$V_t$	Tension thermique (V)
$V_d$	Tension de diode (V)
$k$	Constant de Boltzmann ( $1.38 \times 10^{-23} J / K$ )
$q$	Charge de l'électron ( $1.6 \times 10^{-19} C$ )
$A$	Facteur de qualité de la diode
$R_s$	Résistance série de la cellule ( $\Omega$ )
$R_p$	Résistance parallèle de la cellule ( $\Omega$ )
$G$	Éclairement ( $W/m^2$ )
$G_{ref}$	Éclairement de référence ( $1000 W/m^2$ )
$N_s$	Nombre de cellules en série
$N_p$	Nombre de cellules en parallèle
$K_i$	Coefficient de courant en fonction de température ( $A/^{\circ}C$ )
$K_v$	Coefficient de tension en fonction de température ( $V/^{\circ}C$ )
$D$	Rapport cyclique du convertisseur
$K$	Rapport de transformation du transformateur d'isolement
$N$	Nombre de niveau de tension de sortie
$V_{dc}$	Source de tension continu (V)
$V_{ref}$	Tension de signal de référence (V)

$V_p$	Tension de signal de porteuse (V)
$f_r$	Fréquence du signal de référence (Hz)
$f_p$	Fréquence de la porteuse (Hz)
$r$	Coefficient de réglage en amplitude
$m$	Indice de modulation de fréquence
$V_{ao}$	Tension entre le point a et le point o (V)
$V_{ab}$	Tension entre la phase a et la phase b (V)

### **Abréviations**

PV	Photovoltaïque
GPV	Générateur Photovoltaïque
CST	Conditions Standards de Test
CC	Courant continu
CA	Courant alternatif
PPM	Point de Puissance Maximale
MPPT	Maximum Power Point Tracker
P&O	Perturbation et Observation
NPC	Onduleur à diodes de bouclage (Neutral Point Clamped)
CHB	Onduleur en pont H cascadié (Cascade H-Bridge)
FC	Onduleur à condensateur flottant (Flying Capacitor)
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
PWM	Pulse Width Modulation
PD	Phase Disposition
POD	Phase Opposition Disposition
APOD	Alternate Phase Opposition Disposition
TDH	Taux de Distorsion Harmonique
PLL	Boucle à verrouillage de phase (Phase Locked Loop)
PI	Proportionnel Intégral

## Introduction générale

Aujourd'hui, le défi mondial est tourné vers les énergies renouvelables, notamment le solaire, l'éolien, l'hydraulique, la géothermie, etc. Ce type d'énergie n'est pas seulement gratuit et inépuisable, mais il est aussi très propre pour l'environnement. A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies liées aux cycles du soleil et de la terre et elles sont de plus en plus utilisées de nos jours à cause de l'augmentation du coût et la limitation de la disponibilité des énergies classiques. L'exploitation de l'énergie solaire photovoltaïque fait l'objet de notre étude.

A travers l'effet photovoltaïque, l'énergie fournie est très variable et est toujours en courant continu: il faut souvent la stocker et parfois la transformer. Les systèmes photovoltaïques peuvent être divisés en deux catégories : les systèmes autonomes et les systèmes hybrides connectés au réseau électrique. L'association des centrales PV connectées au réseau électrique se fait à l'aide d'un convertisseur courant continu/courant alternatif (CC/CA).

Il existe différentes topologies d'installations PV connectées à un réseau électrique. Néanmoins, toutes ces topologies reposent sur un générateur photovoltaïque (GPV) raccordé au réseau par le biais d'onduleurs qui transfèrent et mettent en forme l'énergie solaire électrique. Les progrès effectués ces dernières années dans le développement des onduleurs dédiés aux photovoltaïques ont permis de faire évoluer grandement ces systèmes de gestion. Les onduleurs ne se limitent plus seulement à transformer la puissance continue générée par les panneaux solaires en puissance alternative sous forme d'une tension sinusoïdale de fréquence souhaitée (par ex. 230V/400V - 50Hz), mais ils exploitent également la puissance délivrée par le GPV en le forçant à fonctionner à son point de puissance maximum. De plus, ils assurent une surveillance fiable du réseau pour protéger ce dernier contre les pannes et interrompre l'alimentation en cas de problèmes survenant, soit du réseau, soit de l'installation. Actuellement, il existe principalement trois architectures d'onduleurs donnant de

bonnes solutions techniques : l'onduleur central, les onduleurs strings et les onduleurs intégrés aux panneaux [1], [2].

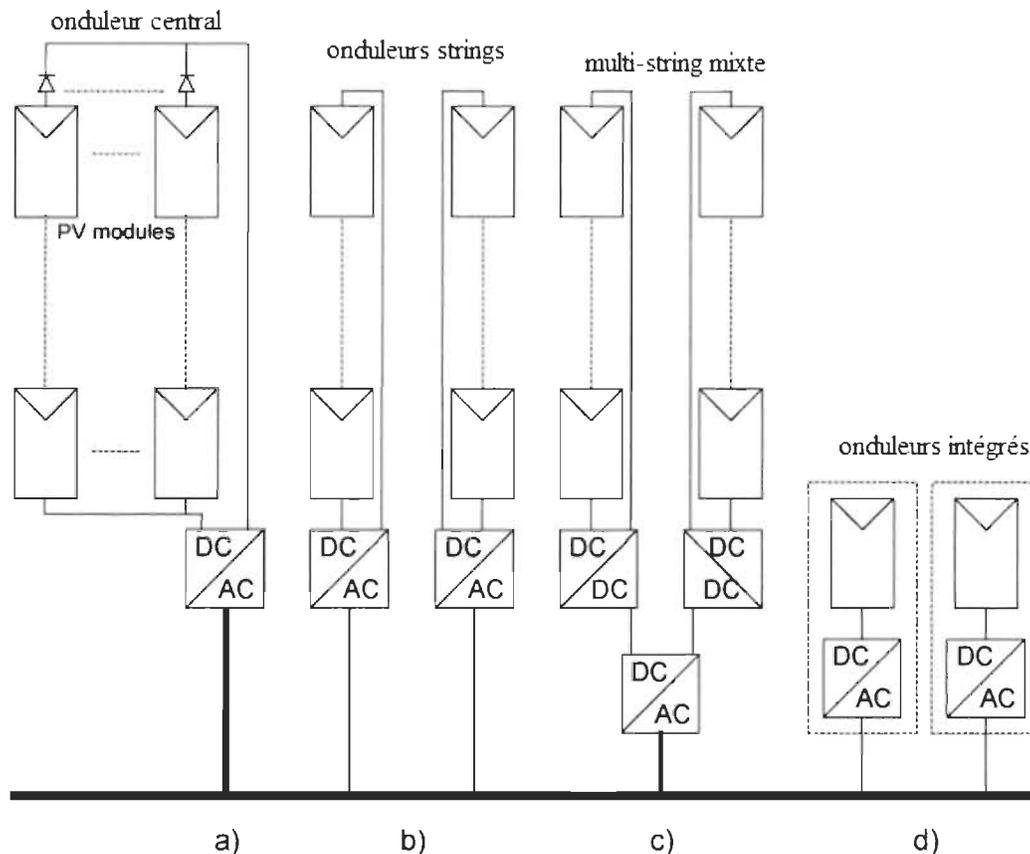


Figure 1 Topologies d'installations PV : a) onduleur central. b) onduleurs strings. c) multi-string mixte. d) onduleurs intégrés

Une nouvelle structure de conversion multi-string mixte (en Figure 1 c) permet une grande modularité des GPV. En fait, la structure multi-string est née de la combinaison entre la gestion par onduleur central et la gestion par strings. Le principe de la conversion multi-string est basé sur de nombreux convertisseurs CC-CC modulables connectés à un onduleur central via un bus continu. Chaque convertisseur CC-CC dispose de sa propre commande « Maximum Power Point Tracking » (MPPT) permettant à chaque string de fonctionner à son point de fonctionnement maximal. Par conséquent, le dysfonctionnement d'un GPV peut être rapidement détecté et localisé. Le fonctionnement de l'ensemble du champ ne sera donc pas affecté par le dysfonctionnement d'un seul GPV. Grâce aux convertisseurs CC-CC, il est possible de travailler sur une plus large gamme de tension PV (tension plus faible en entrée des convertisseurs CC/CC) optimisant ainsi la production photovoltaïque [2].

L'objectif principal de mon projet vise à étudier et comparer les différentes structures de convertisseurs utilisées dans les systèmes photovoltaïques (centrales solaires) de grande puissance connectés aux réseaux électriques moyenne tension.

Pour ce faire, le mémoire est organisé en quatre chapitres et une conclusion générale. Le premier chapitre décrit la production d'énergie photovoltaïque et ses avantages et inconvénients. Ensuite nous rappellerons les différents types des cellules photovoltaïques, la constitution d'un GPV et les principales caractéristiques de l'énergie solaire. Nous terminons ce chapitre par la présentation du modèle d'une cellule PV et ses caractéristiques I-V et P-V.

Dans le deuxième chapitre, pour que le GPV fonctionne à sa puissance maximale, un étage d'adaptation doit être inséré entre la source et la charge. Pour cela, on présente les différents types de convertisseurs CC-CC ainsi qu'une analyse de fonctionnement du convertisseur élévateur (Boost). On termine le chapitre par l'algorithme de recherche du point de puissance maximale (MPPT) en utilisant la méthode Perturbe & Observe (P&O).

Dans le troisième chapitre, les différents systèmes photovoltaïques sont exposés. De plus, les différentes topologies d'onduleur multi-niveaux ainsi que les différentes stratégies de commande utilisées sont présentées.

Le quatrième chapitre est consacré à la simulation de l'onduleur multi-niveaux intégré dans un système photovoltaïque. Les résultats de simulation sont présentés ainsi que l'analyse spectrale pour les différentes topologies utilisées. L'étude par simulation est effectuée sous l'environnement Matlab/Simulink.

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

# Chapitre 1

## Production d'électricité par le solaire photovoltaïque

### 1.1. Énergie solaire

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (kWc/m<sup>2</sup>) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année. L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés:

➤ L'énergie solaire thermique: qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux solaires. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.

➤ L'énergie solaire photovoltaïque: qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays où les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles telles que les hydrocarbures ou le charbon [3].

### 1.2. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

➤ Les avantages de l'énergie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque offre de multiples avantages :

- ❖ La production de cette électricité renouvelable est propre. Elle n'est pas toxique.
- ❖ Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables.

- ❖ L'énergie photovoltaïque est particulièrement attractive pour les sites urbains, dus à leur petite taille, et leur opération silencieuse.

- ❖ La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montage dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville.

- ❖ L'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez utilisateur.

- ❖ Les matériaux employés (verre, aluminium) résistent aux pires conditions climatiques (notamment à la grêle).

- ❖ La durée de vie des panneaux photovoltaïque est très longue. Certains producteurs garantissent les panneaux solaires pour une durée de 25 ans.

- Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque

- ❖ Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable.

- ❖ Le coût très élevé.

- ❖ Faible rendement de conversion.

- ❖ S'il faut stocker l'énergie avec des batteries, le coût de l'installation augmente.

- ❖ Pollution à la fabrication.

Malgré ces inconvénients, le marché photovoltaïque ne cesse de trouver des applications et de s'agrandir. En plus, la technologie photovoltaïque est dans un processus de maturation dans laquelle les inconvénients pourraient s'atténuer, surtout en ce qui concerne les coûts de fabrication [4].

### **1.3. Cellule photovoltaïque**

Les cellules photovoltaïques (photon : grain de lumière et volt : unité de tension) sont des composants électroniques à semiconducteurs (généralement faits de silicium sous ses différentes formes). Elles convertissent directement l'énergie lumineuse en électricité courant continu basse tension (effet photovoltaïque). Comme l'énergie lumineuse est le soleil, on parle alors de cellules solaires.

### 1.3.1. Effet photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule [5]. La figure (1.1) illustre une cellule PV typique où sa constitution est détaillée.

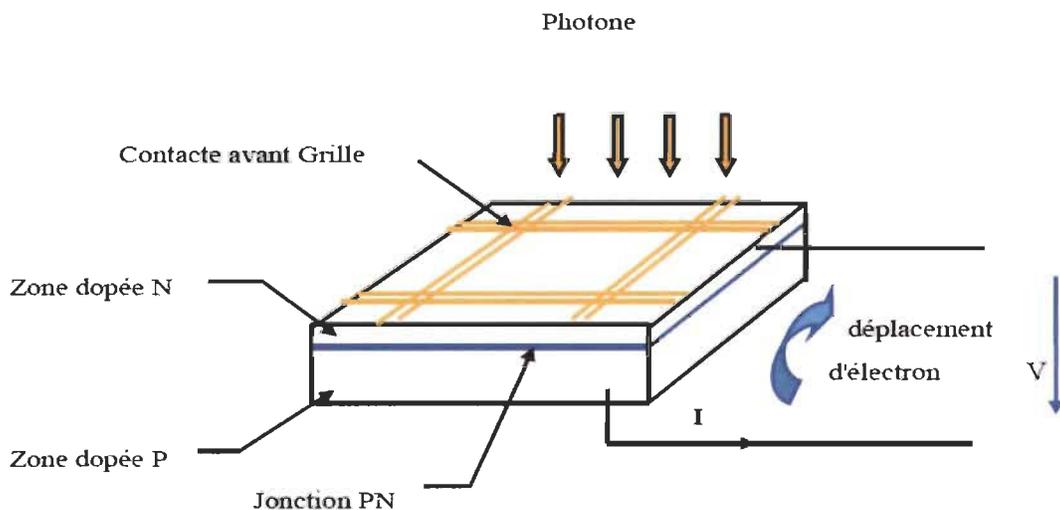


Figure 1.1 Schéma d'une photovoltaïque [5]

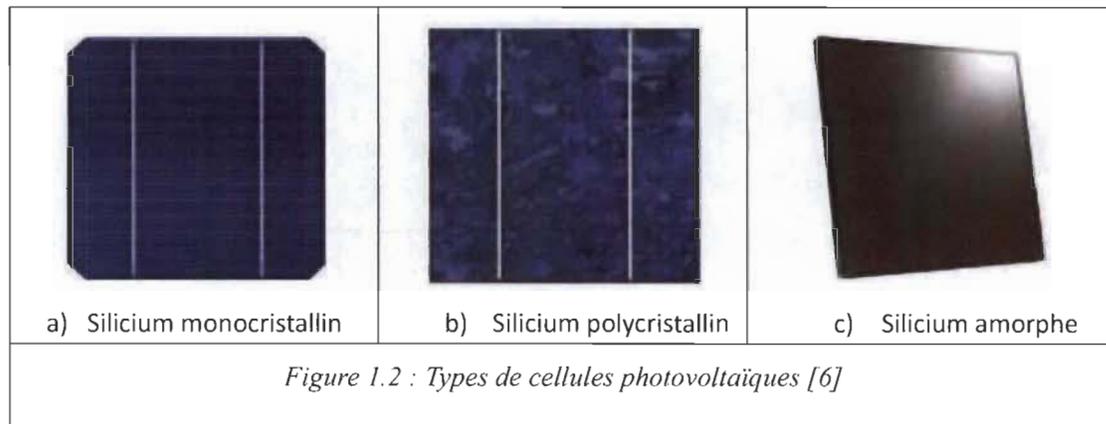
### 1.3.2. Différents types de cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques sont constituées de semi-conducteurs à base de silicium (Si), de germanium (Ge), de sélénium (Se), de sulfure de cadmium (CdS), de tellure de cadmium (CdTe) ou d'arséniure de gallium (GaAs). Le silicium est

actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques, car il est très abondant dans la nature. On le trouve dans la nature sous forme de pierre de silice. La silice est un composé chimique (dioxyde de silicium) et un minéral de formule  $\text{SiO}_2$ . Il est le principal constituant des roches sédimentaires détritiques (sables, grès) [6].

Les différents types de cellules PV existants sont (Figure 1.2) :

- Cellule en silicium amorphe (rendement : 6 à 10%)
- Cellule en silicium monocristallin (rendement : 13 à 17%)
- Cellule en silicium polycristallin (rendement : 11 à 15%)
- Cellule Tandem
- Cellule en matériaux organiques (rendement : 3.6%)



#### 1.4. Générateur photovoltaïque

La puissance disponible aux bornes d'une cellule est très faible. Il est donc nécessaire d'associer en série et en parallèle de telles cellules pour obtenir des modules de puissance compatible avec le matériel usuel. Les modules sont ensuite connectés en série pour former une chaîne. Enfin, les chaînes sont connectées en parallèle pour former un générateur photovoltaïque. Le nombre de modules dans chaque chaîne est spécifiée selon le besoin du niveau de tension du générateur.

### 1.4.1. Module photovoltaïque

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance vis-à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés, délivre au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au volt (tension de jonction PN). Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un panneau photovoltaïque. En effet, les modules PV sont composés d'un ensemble de cellules mises en série, réalisant la conversion proprement dite de la lumière du soleil en électricité. Ils sont eux-mêmes associés en série et parallèle pour former un champ photovoltaïque d'une puissance crête définie selon des conditions spécifiques d'éclairement, de température et de spectre solaire. La plupart des modules commercialisés sont constitués de deux à quatre réseaux de cellules en silicium cristallins connectés en série [7].

### 1.4.2. Panneau photovoltaïque

Le panneau photovoltaïque (ou champ solaire) est constitué de modules connectés en série et en parallèle pour obtenir la puissance souhaitée. Chaque module est lui-même composé de cellules.



Figure 1.3. Configuration des cellules photovoltaïques [38]

### 1.4.3. Paramètres d'un module PV

Les modules sont généralement des parallélépipèdes rectangles rigides minces (quelques centimètres d'épaisseur), dont les paramètres suivants [8]:

- **La puissance crête,  $P_c$**  : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m<sup>2</sup>).

- **La caractéristique  $I=f(V)$**  : Courbe représentant le courant  $I$  débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.

- **Tension de circuit-ouvert,  $V_{co}$**  : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement " plein soleil ".

- **Courant de court-circuit,  $I_{cc}$**  : C'est la plus grande valeur de courant générée par la cellule sous les conditions de court-circuit où  $V = 0$ . (Pratiquement  $I_{cc} = I_{ph}$ ).

- **La puissance maximale  $P_{max}$**  : C'est la puissance électrique maximale que peut fournir le module, qui est associé à une tension maximale  $V_{max}$  et à une intensité maximale  $I_{max}$

$$P_{max} = V_{max} \times I_{max} \quad (1.1)$$

- **Rendement  $\eta$**  : Rapport de la puissance électrique maximale  $P_{max}$  à la puissance de radiation incidente  $P_{inc}$

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} \quad (1.2)$$

Avec  $P_{inc}$  est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des photopiles. Ce paramètre reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

- **Facteur de forme  $FF$** : Rapport de la puissance maximale qui peut être délivré à la charge sur le produit de ( $I_{cc}$ ,  $V_{co}$ )

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \times V_{co}} \quad (1.3)$$

#### 1.4.4. Influences de l'éclairement sur les caractéristiques I-V et P-V

Les figures 1.4 a) et b) donnent respectivement la caractéristique I-V et P-V d'un module PV en fonction de l'éclairement incident et à température ambiante. Nous constatons que les variations du courant de court-circuit (c'est à dire pratiquement le photo-courant crée dans le module PV) est proportionnel au flux solaire incident. D'où la forte influence de l'éclairement sur le courant débité par le module PV. Cette influence se traduit par une augmentation de la puissance disponible dans les modules PV chaque fois l'éclairement augmente et à chacune des valeurs du flux lumineux correspond une puissance électrique maximale que pourrait fournir un module PV.

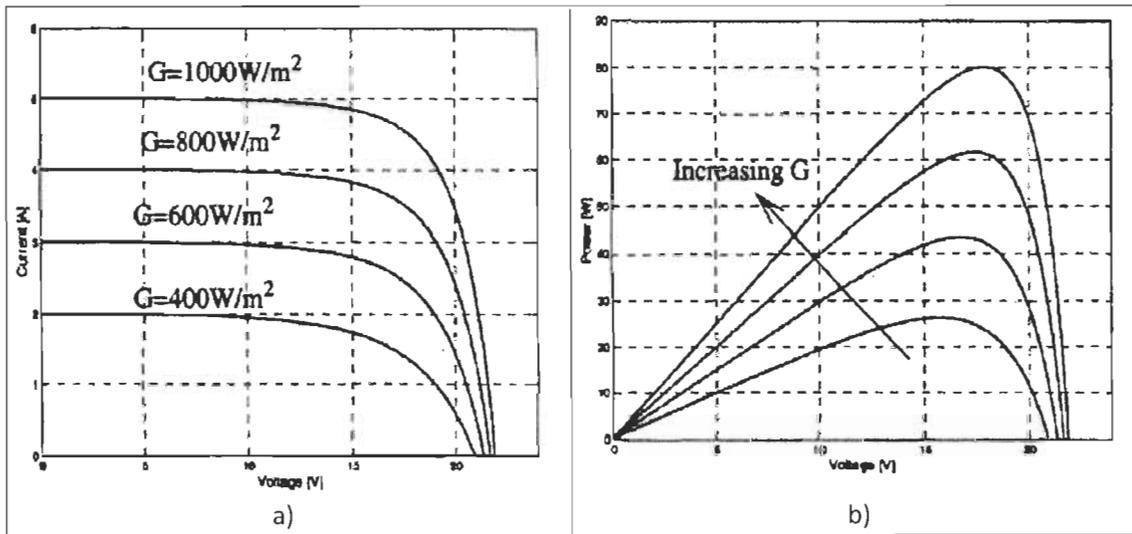


Figure 1.4 : a) Caractéristique I-V en fonction de l'éclairement  
b) Caractéristique P-V en fonction de l'éclairement [16]

La dépendance du courant  $I_{cc}$  de l'éclairement  $G$  peut être formulée par :

$$I_{cc} = I_{cc}^* \left( \frac{G}{G^*} \right) + K_i (T - T^*) \quad (1.4)$$

$I_{cc}^*$  est le courant de court-circuit dans les conditions CST ( $G^* = 1000 \text{ W/m}^2$ ,  $T^* = 25^\circ \text{C}$ )

$K_i$  ( $\text{A}/^\circ\text{C}$ ) est un coefficient de température du courant de court-circuit (généralement donné par le fabricant).

#### 1.4.5. Influences de la température sur les caractéristiques I-V et P-V

La température est un paramètre très important dans le comportement d'un module PV. Nous constatons à la (figure 1.5 a), qui représente la caractéristique I-V

pour un éclairement constant et pour diverses valeurs de la température, que le courant de court-circuit  $I_{cc}$  varie peu en fonction de température. Par contre, l'augmentation de la température engendre une diminution de la tension en circuit ouvert et se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible dans les modules PV (figure 1.5 b). D'où l'influence de la température sur le comportement du module PV.

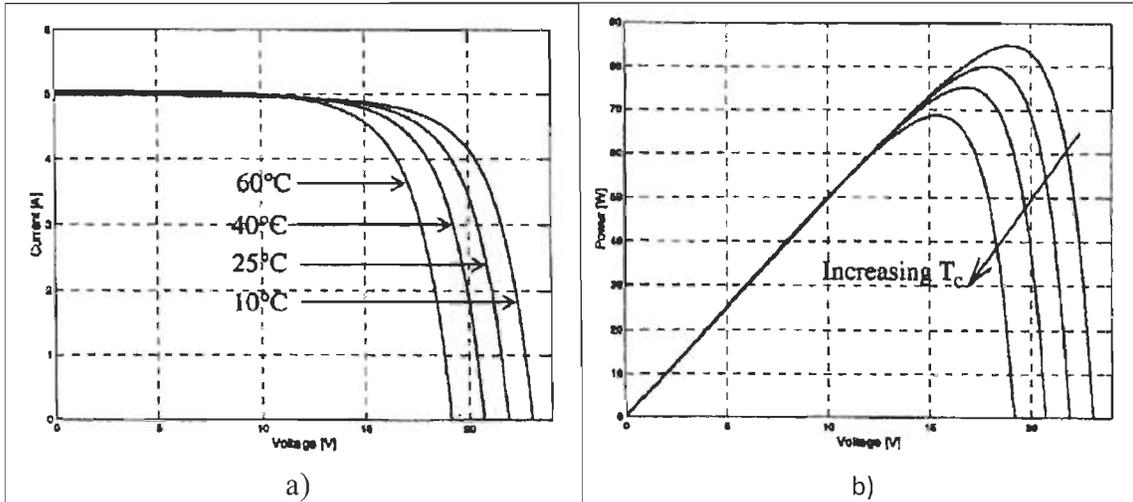


Figure 1.5 : a) Caractéristique  $I-V$  en fonction de la température; b) Caractéristique  $P-V$  en fonction de la température [16]

La tension à vide d'un module PV en fonction de la température et de l'éclairement est donnée par la relation suivante :

$$V_{co} = V_{co}^* + K_v(T - T^*) - (I_{cc} - I_{cc}^*)R_s \quad (1.5)$$

$V_{co}^*$  est la tension du circuit ouvert dans les conditions CST.

$K_v$  (V/°C) est un coefficient de température de tension de circuit-ouvert (généralement donné par le fabricant).

## 1.5. Modèle d'une cellule photovoltaïque

### 1.5.1. Cas d'une cellule idéale

Dans le cas idéal, la jonction PN soumise à l'éclairement photovoltaïque connectée à une charge peut être schématisée par un générateur de courant  $I_{ph}$  en parallèle avec

une diode, délivrant un courant selon la figure 1.6, qui représente le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale.

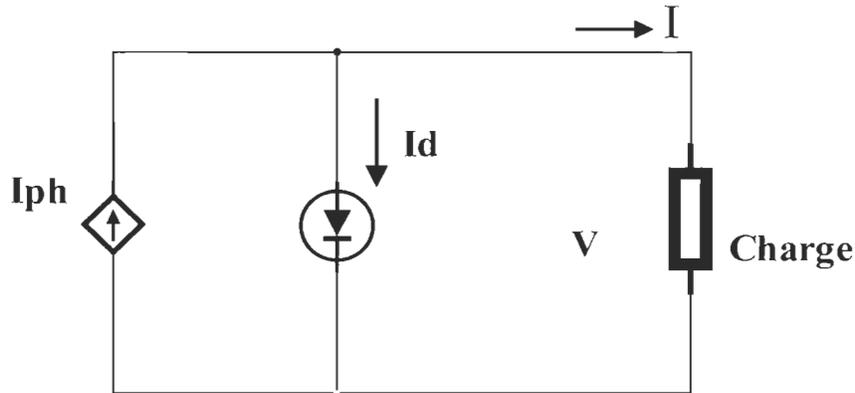


Figure 1.6 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale [9]

Après la loi de nœud :

$$I = I_{ph} - I_d \quad (1.6)$$

Où  $I$  est le courant délivré par la cellule PV,  $I_{ph}$  est le photo-courant et  $I_d$  est le courant de la diode. La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique courant-tension est donnée par la relation :

$$I_d = I_0 \left[ \exp\left(\frac{V_d}{V_t}\right) - 1 \right] \quad (1.7)$$

Où  $I_0$  est le courant de saturation inverse de la diode,  $V_d$  est la tension aux bornes de la diode,  $V_t = kT/q$  est la tension thermique,  $T$  est la température de la jonction en Kelvin,  $q$  est la charge de l'électron ( $1.6 \times 10^{-19} C$ ),  $k$  est la constante de Boltzmann ( $1.38 \times 10^{-23} J/K$ ) et  $A$  est un facteur de qualité de la diode (normalement compris entre 1 et 2).

Pour un générateur PV idéal, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode :

$$V = V_d \quad (1.8)$$

Donc la relation (1.1) sera :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{qV}{AkT}\right) - 1 \right] \quad (1.9)$$

En circuit ouvert, la charge tend vers l'infini et  $V \rightarrow V_{co}$ , qui est la tension en circuit ouvert.

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{qV_{co}}{AkT}\right) - 1 \right] = 0, \text{ soit } V_{co} = \frac{AkT}{q} \text{Log}\left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1\right) \quad (1.10)$$

Le courant  $I_{ph}$  est assimilé au courant  $I_{cc}$  avec  $V = 0$ , courant de court-circuit obtenu en court circuitant la charge.

### 1.5.2. Cas d'une cellule photovoltaïque réelle

Le modèle photovoltaïque précédent ne rendait pas compte de tous les phénomènes présents lors de la conversion d'énergie lumineuse. En effet, dans le cas réel, on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuite. On modélise donc cette perte de tension par une résistance en série  $R_s$  et les courants de fuite par une résistance en parallèle  $R_p$  [10]. Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle tient compte d'effets résistifs parasites dues la fabrication et représenté sur la figure 1.7.

Le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque se met sous la forme mathématique suivante :

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (1.11)$$

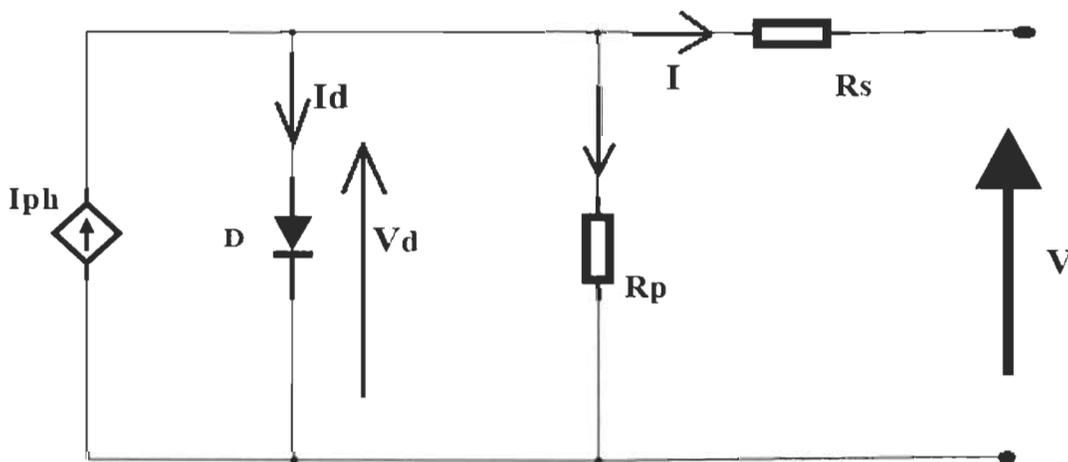


Figure 1.7. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale [10]

Et

$$I_p = \left( \frac{V + R_s I}{R_p} \right) \quad (1.12)$$

$$I_d = I_0 \left[ \exp\left(\frac{V + R_s I}{V_i}\right) - 1 \right] \quad (1.13)$$

Où  $I_{ph} = I_{cc} \left(\frac{G}{G_{ref}}\right)$  est le photo-courant dépendant de l'éclairement  $G$  et  $G_{ref}$  est l'éclairement de référence ( $1000W / m^2$ ).

En substituant les équations (6) et (7) dans l'équation (5) le courant  $I$  devient donc :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{AkT}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (1.14)$$

Les cellules PV, généralement considérées comme ayant les mêmes caractéristiques, sont disposées en série et en parallèle pour former les modules PV. Le circuit équivalent du module PV peut être décrit comme illustré sur la figure 1.8.

Donc l'expression du courant fourni par le module décrit :

$$I = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left[ \exp\left(\frac{q}{AkT} \left(\frac{V}{N_s} + \frac{R_s I}{N_p}\right)\right) - 1 \right] - \frac{N_p}{R_p} \left(\frac{V}{N_s} + \frac{R_s I}{N_p}\right) \quad (1.15)$$

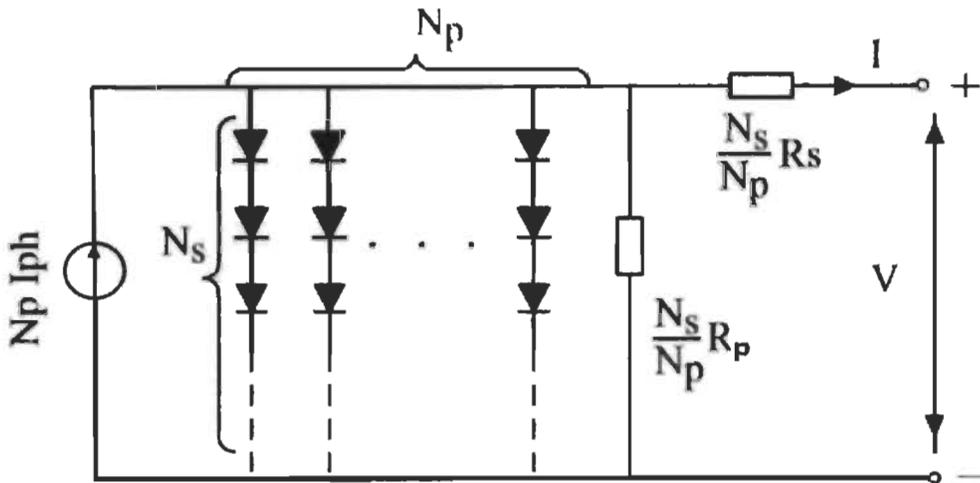


Figure 1.8 Le circuit équivalent du module PV [11]

Où,  $N_s$  et  $N_p$  sont respectivement les nombres des cellules connectées en série et en parallèles.

## **1.6. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu général sur les différentes notions importantes pour l'étude d'un système solaire photovoltaïque et les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire. Nous avons exploré le principe de la conversion photovoltaïque et les technologies utilisées ainsi que les différents types des cellules photovoltaïques.

Les caractéristiques d'un module solaire montrent bien que la puissance maximale générée dépend fortement de l'intensité des radiations solaires ainsi que de la température. Le module solaire ne peut générer sa puissance maximale que pour une certaine tension et courant de fonctionnement.

## Chapitre 2

### Hacheurs de puissance pour systèmes photovoltaïques

#### 2.1. Convertisseurs CC-CC

Les convertisseurs statiques servent à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant en une tension continue différente.

L'étude du convertisseur est intéressante dans la mesure où il est utilisé dans la plupart des nouveaux types de sources de production d'énergie dispersée connectée au réseau (éolienne, photovoltaïque, pile à combustible...).

Le hacheur est un convertisseur continu/continu permettant de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant). Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue [12].

#### 2.2. Types des convertisseurs CC-CC

Il y a plusieurs topologies des convertisseurs CC-CC. Ils sont classés en deux types : les convertisseurs non isolés et les convertisseurs isolés de la source.

##### 2.2.1. Convertisseurs non isolés de la source

Les topologies non isolées ne comportent pas de transformateurs d'isolement. Elles sont généralement utilisées dans l'entraînement des moteurs à courant continu. Ces topologies sont encore classées en trois catégories :

- Abaisseurs (Buck);
- Élévateurs (Boost);
- Abaisseurs - Élévateurs (Buck-Boost).

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

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

Les trois convertisseurs CC-CC couramment utilisés dans les systèmes PV sont: les convertisseurs Buck, Boost et Buck-Boost, sont représentés sur la figure 2.1.

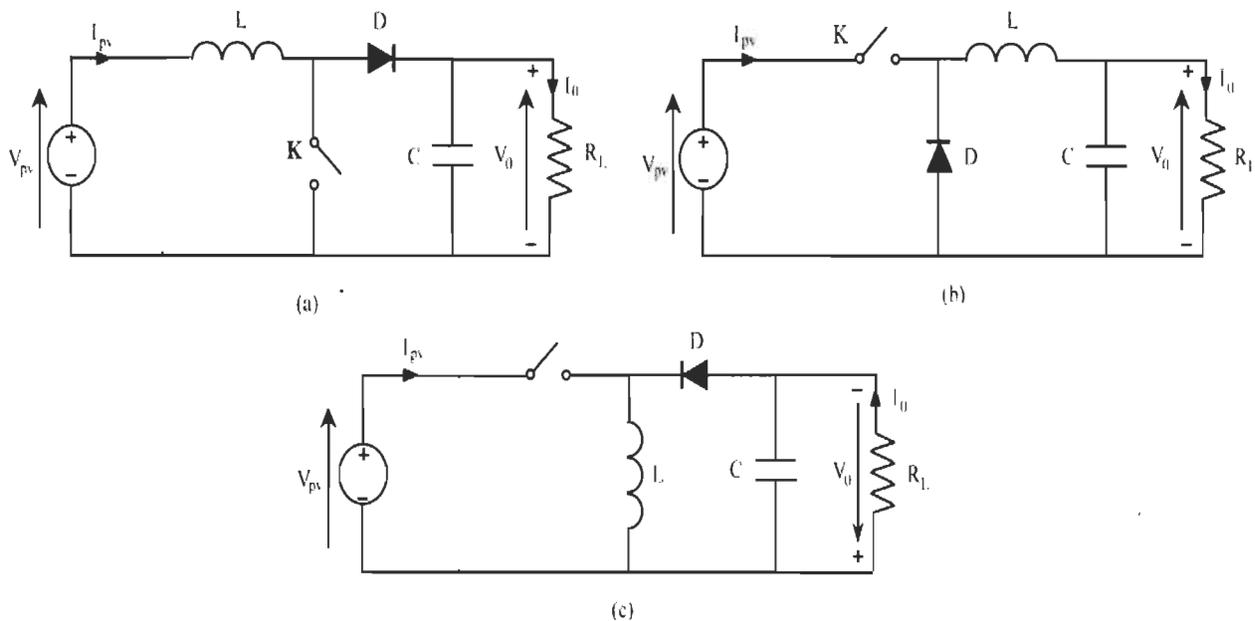


Figure 2.1 : Schéma des convertisseurs CC-CC couramment utilisés

(a) Boost; (b) Buck; (c) Buck-boost [13]

### 2.2.2. Convertisseurs isolés de la source

Les topologies isolées emploient un transformateur d'isolement fonctionnant à haute fréquence, elles sont souvent employées dans les alimentations à découpage. Les topologies les plus connues dans la majorité des applications sont le Fly back, le demi-pont et le pont complet. Dans les applications photovoltaïques (PV), les systèmes

de couplage avec le réseau électrique emploient souvent ces types de topologies quand l'isolement électrique est préféré pour des raisons de sûreté.

Le tableau 2.1 résume les principaux rapports de transformation en fonction du rapport cyclique pour les différentes structures de convertisseurs statiques avec et sans isolement galvanique. Où D désigne le rapport cyclique du convertisseur et K le rapport de transformation du transformateur d'isolement [13].

Tableau 2.1: Rapports de transformation des principaux convertisseurs CC-CC

Convertisseur	Rapport de transformation en fonction de (D)	Isolement galvanique
Buck	D	Non
Boost	$\frac{1}{1-D}$	Non
Buck-Boost	$\frac{-D}{1-D}$	Non
Fly back	$K \frac{D}{1-D}$	Oui

### 2.3. Fonctionnement du convertisseur élévateur (Boost)

Le schéma de principe d'un convertisseur Boost est déjà donné par la figure 2.1 (a). Cette structure est composée principalement d'une inductance L, un interrupteur K (comme IGBT ou MOSFET) et d'une diode D. La conduction des deux interrupteurs est complémentaire, quand K est fermé D est ouvert ; et quand K est ouvert, D est fermé. Durant chaque période, K est fermé de l'instant 0 à  $\alpha T$  et ouvert de  $\alpha T$  à T [14], [15].

✓ Séquence 1 : ( $0 < t < \alpha T$ )

A l'instant  $t = 0$ , on ferme l'interrupteur K pendant une durée  $\alpha T$ . La diode D est bloquée, on obtient alors le schéma équivalent suivant :

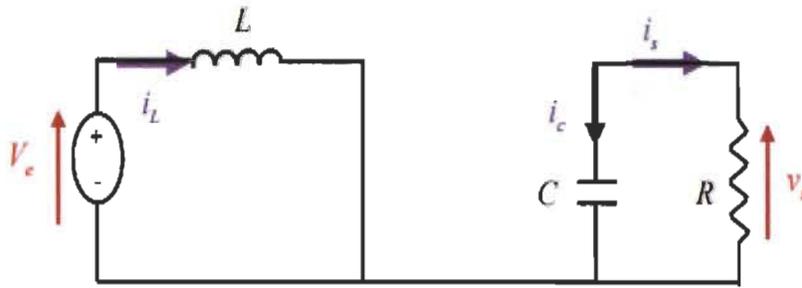


Figure 2.2. Schéma équivalent du Boost quand l'interrupteur est fermé

La tension aux bornes de l'inductance est alors :

$$V_L = V_e = L \frac{di_L}{dt} > 0$$

En résolvant cette équation différentielle, on obtient l'expression suivante qui exprime l'évolution du courant traversant l'inductance :

$$i_L = I_{\min} + \frac{V_e}{L} t \quad (2.1)$$

avec  $I_{\min}$  la valeur minimale du courant dans l'inductance.

A l'instant  $t = \alpha T$ , le courant dans l'inductance atteint sa valeur maximale  $I_{\max}$ .

$$I_{\max} = I_{\min} + \frac{V_e}{L} \alpha T \quad (2.2)$$

✓ Séquence 2 : ( $\alpha T < t < T$ )

A l'instant  $t = \alpha T$ , l'interrupteur K est ouvert, le circuit du convertisseur sera comme montré dans la Figure 2.3.

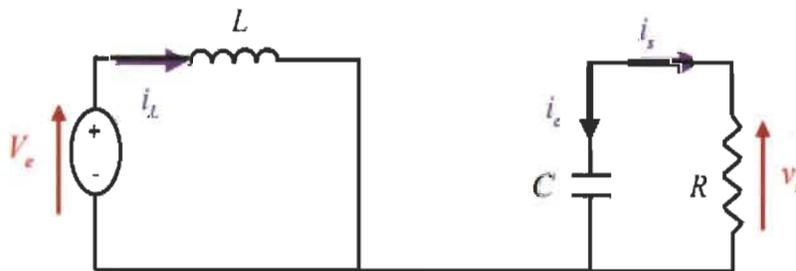


Figure 2.3. Schéma équivalent du Boost quand l'interrupteur est ouvert

La tension aux bornes de l'inductance est alors

$$V_L = V_e - V_s = L \frac{di_L}{dt} < 0$$

En résolvant cette équation différentielle, on obtient la formule suivante qui exprime l'évolution du courant traversant l'inductance :

$$i_L = I_{\max} + \frac{V_e - V_s}{L}(t - \alpha T) \quad (2.3)$$

A l'instant  $t = T$ , le courant dans l'inductance revient à sa valeur minimale  $I_{\min}$  :

$$I_{\min} = I_{\max} + \frac{V_e - V_s}{L}(1 - \alpha)T \quad (2.4)$$

Soit  $\Delta i_L = I_{\max} - I_{\min}$  l'ondulation du courant dans l'inductance.

En faisant l'égalité des valeurs de l'ondulation du courant tirées des équations (2.2) et (2.4), on peut déduire la tension de sortie  $V_s$  :

$$V_s = \frac{1}{1 - \alpha} V_e \quad (2.5)$$

Le rapport cyclique  $\alpha$  est compris entre 0 et 1 donc la tension de sortie  $V_s$  est nécessairement supérieure à la tension d'entrée  $V_e$  (montage survolteur).

En appliquant le principe de conservation de puissance entre l'entrée et la sortie du convertisseur, on peut établir la valeur moyenne du courant dans l'inductance en fonction du courant moyen dans la charge et du rapport cyclique :

$$I_L = \frac{1}{1 - \alpha} I_s \quad (2.6)$$

Pour l'ondulation de courant dans l'inductance et l'ondulation de tension de sortie on a l'expression :

$$\Delta i_L = \frac{\alpha V_e}{L} T = \frac{\alpha V_e}{Lf} \quad (2.7)$$

$$\Delta V_s = \frac{\alpha I_s}{Cf} = \frac{\alpha V_e}{(1 - \alpha)RCf} \quad (2.8)$$

Avec  $f$  la fréquence de découpage.

A partir de ces formules, on peut dimensionner le condensateur de filtrage  $C$  et l'inductance lissage  $L$  :

$$C = \frac{\alpha I_s}{\Delta V_s f} \quad (2.9)$$

$$L = \frac{\alpha V_e}{\Delta i_L f} \quad (2.10)$$

## 2.4. Importance du MPPT (Maximum Power Point Tracker)

Le rayonnement solaire qui atteint les modules photovoltaïques a un caractère fortement variable en fonction de la latitude, de l'orientation du champ solaire, de la saison et de l'heure du jour. Sur chaque cellule, au cours de la journée, on peut déterminer des ombres qui peuvent être prévisibles, comme dans le cas d'un édifice situé à proximité du champ solaire ou imprévisibles comme celles provoquées par les nuages. Par ailleurs la quantité d'énergie produite par chaque cellule photovoltaïque dépend du rayonnement et de sa température. A partir de ces considérations il est nécessaire de détecter à chaque instant ce point particulier sur la caractéristique V-I du générateur photovoltaïque où le transfert de puissance vers le réseau est au maximum.

Dans la figure 2.4, le point de puissance maximum correspond au point de tangence entre la caractéristique du générateur photovoltaïque pour une certaine valeur du rayonnement solaire et l'hyperbole d'équation  $V \times I = \text{constante}$  correspondante. Comme nous l'avons vu, le point de tangence varie instantanément en fonction des conditions de rayonnement solaire et des variations de la température. Le rôle du MPPT est justement de détecter à chaque instant ce point d'efficacité énergétique maximum [17].

Pour assurer le fonctionnement d'un générateur PV à son point de puissance maximale (PPM), des contrôleurs MPPT sont souvent utilisés. Ces contrôleurs sont destinés à minimiser l'erreur entre la puissance de fonctionnement et la puissance maximale de référence variable en fonction des conditions climatiques.

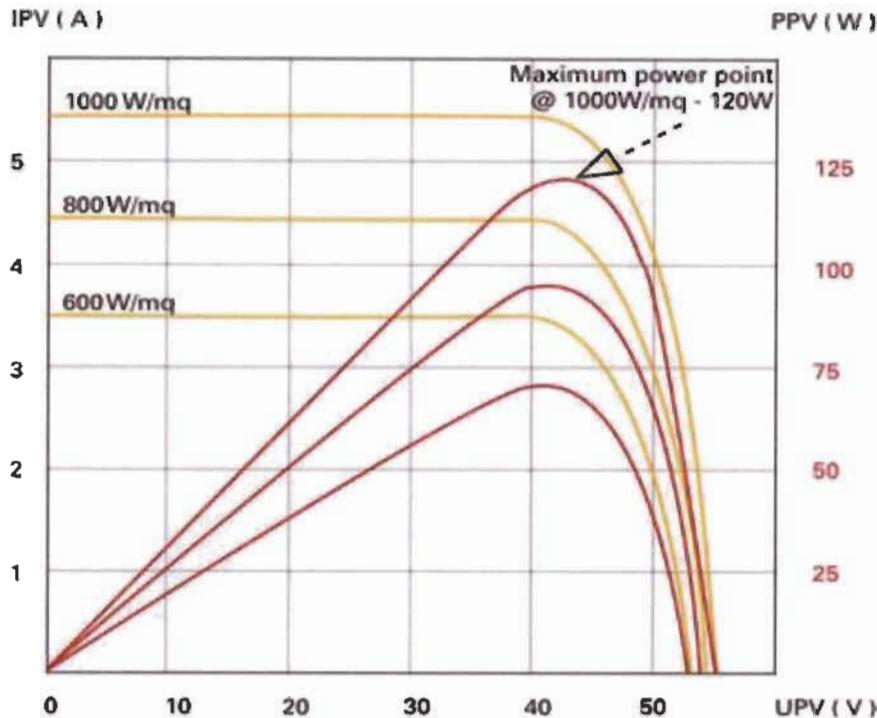


Figure 2.4. Caractéristique de puissance maximum [17]

La puissance de fonctionnement du générateur PV est facilement calculé à partir du produit tension-courant. Par contre, la détermination de la puissance maximale de référence est plus délicate vue que cette dernière est fonction des conditions climatiques (éclairage, température). Cette référence, étant alors non constante et étant caractérisée par une fonction non linéaire, rend le fonctionnement à puissance maximale plus difficile à réaliser. Afin de surmonter ces difficultés, plusieurs méthodes sont souvent adoptées telles que les méthodes analogiques et les méthodes numériques.

L'énergie photovoltaïque issue de la conversion de l'énergie solaire souffre d'un problème d'optimisation, du aux caractéristiques électriques non linéaires (courant-tension) des cellules photovoltaïques, ces caractéristiques dépendent essentiellement des conditions climatiques de rayonnement et température [18].

Dans le but d'améliorer le rendement du générateur photovoltaïque (PV) autrement dit maximiser la puissance délivrée à la charge reliée aux bornes du générateur, plusieurs critères d'optimisation de l'efficacité du système étaient appliqués et des techniques étaient suivies pour avoir une bonne adaptation et un rendement élevé parmi ces techniques, les plus utilisées sont [19][20][21] :

- ✓ Méthode basée sur la mesure de la tension en circuit ouvert
- ✓ Méthode basée sur la mesure du courant en court-circuit
- ✓ Perturbation et Observation (P&O, Perturb and Observe)
- ✓ Incrément de la conductance (IncCond, Incremental Conductance)

La méthode la plus utilisée dans le domaine du photovoltaïque est celle de Perturbation et Observation (P&O), notre travail est basé sur cette méthode appliquée à un système photovoltaïque.

## **2.5. Méthode de perturbation et observation (P&O)**

La méthode de perturbation et observation (P&O) est une approche largement répandue dans la recherche de MPPT parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque  $V_{pv}$  et  $I_{pv}$  respectivement, elle peut repérer le point maximum de puissance même lors des variations de l'éclairement et la température.

Comme son nom l'indique, la méthode P&O fonctionne avec la perturbation de la tension et l'observation de l'impact de ce changement sur la puissance de sortie du panneau photovoltaïque.

### **2.5.1 Principe de méthode P&O**

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension  $V_{pv}$  d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance  $P_{pv}$  qui en résulte ainsi, comme l'illustre dans la figure 2.5, on peut déduire que :

- ◇ Si  $\Delta P > 0$  alors la perturbation de la tension déplace le point de fonctionnement vers un point plus proche du PPM et on continue à perturber la tension dans la même

direction cela va déplacer le point de fonctionnement jusqu'à l'atteinte du PPM.

- ◇ Si  $\Delta P < 0$  le point de fonctionnement s'éloigne du PPM alors on perturbe la tension avec un signe algébrique contraire au signe précédent pour déplacer le point de fonctionnement jusqu'à l'atteinte du PPM.

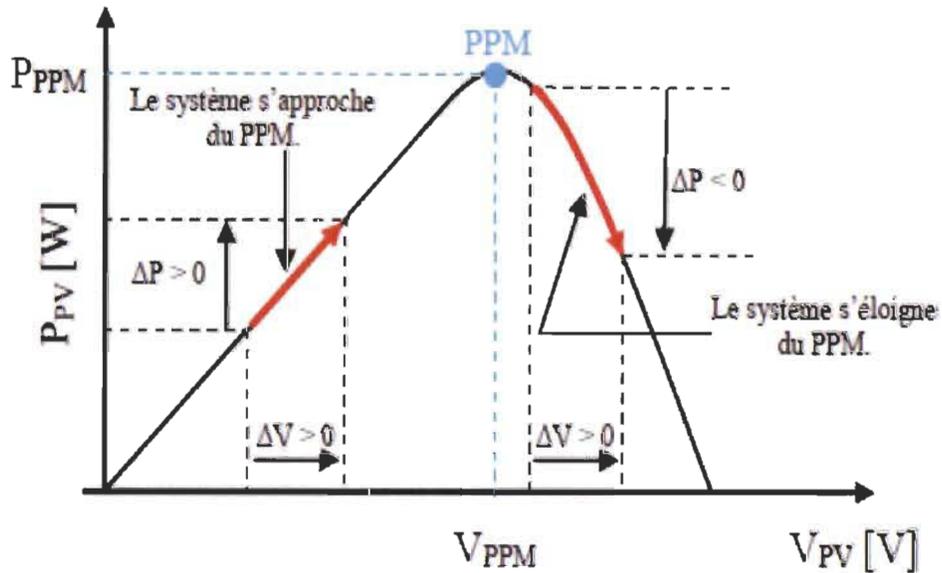


Figure 2.5. Caractéristique de fonctionnement de la méthode P&O [22]

En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance  $P_{pv}$  augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM [22].

### 2.5.2 Organigramme de méthode P&O

La figure 2.6 montre l'organigramme de la méthode P&O. D'après cette figure, la tension  $V$  et le courant  $I$ , sont mesurés pour calculer la puissance de sortie courante  $P(k)$  de la rangée. Cette valeur  $P(k)$  est comparée à la valeur  $P(k-1)$  de la dernière mesure. Si la puissance de sortie a augmenté, la perturbation continuera dans la même direction. Si la puissance a diminué depuis la dernière mesure, la perturbation de la tension de sortie sera renversée en direction opposée du dernier cycle.

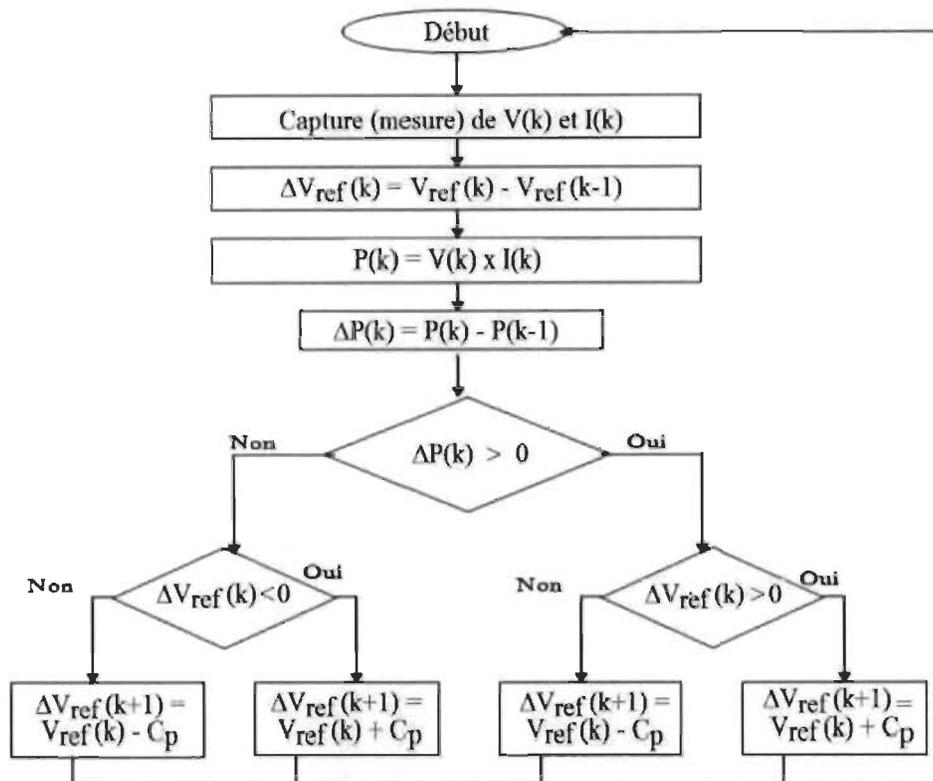


Figure 2.6 Organigramme de MPPT de la perturbation & observation [23]

- ✧ Avec cet algorithme, la tension de fonctionnement  $V$  est perturbée à chaque cycle du MPPT. Dès que le PPM sera atteint,  $V$  oscillera autour de la tension idéale  $V_{mp}$  de fonctionnement. Ceci cause une perte de puissance qui dépend de la largeur du pas d'une perturbation simple  $C_p$ .
- ✧ Si  $C_p$  est grande, l'algorithme du MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues dans les conditions stables ou légèrement changeantes.
- ✧ Si  $C_p$  est très petite, les pertes dans les conditions stables ou lentement changeantes seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température ou de l'insolation.

La valeur  $C_p$  idéale dépend du système. Elle doit être déterminée expérimentalement en fonction des besoins [23].

Les avantages de cet algorithme, comme indiqué précédemment, sont la simplicité et la facilité de la mise en œuvre. Cependant, P & O a des limitations qui réduisent son

efficacité MPPT. Un autre inconvénient est qu'il oscille autour du PPM, comme cette méthode devient instable avec le changement rapide des conditions atmosphériques telles que l'irradiance et la température [21].

## **2.6. Conclusion**

Dans ce chapitre on a étudié quelques types convertisseurs CC-CC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques tels que le hacheur abaisseur (Buck), le hacheur élévateur (Boost) et le hacheur mixte abaisseurs - élévateurs (Buck-Boost).

Dans un système énergétique photovoltaïque, on désire toujours travailler au voisinage du point de puissance maximale MPP, afin de maximiser la production d'énergie. Nous avons donné l'exemple d'une méthode de maximisation de puissance du générateur photovoltaïque, la méthode de perturbation et observation (P&O).

## Chapitre 3

### Systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique

#### 3.1 Classification d'un système photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque convertit la radiation solaire incidente en puissance électrique et en général, on distingue deux types d'installation des systèmes photovoltaïques : les systèmes autonomes et les systèmes connectés au réseau.

##### 3.1.1 Système autonome

Autonomes ou « stand-alone », qui ne sont pas connectés au réseau. Ces installations sont utilisées pour électrifier des circuits isolés, distants du réseau électrique, difficiles à alimenter car ils sont situés dans des zones peu accessibles ou caractérisées par de faibles consommations d'énergie qui rendent presque inutile un quelconque branchement au réseau public. Dans ces installations il est nécessaire de stocker l'énergie produite par les modules photovoltaïques en utilisant des batteries pour garantir une continuité d'énergie, de nuit ou lorsqu'il n'y a pas assez de soleil (figure 3.1 a).

Les performances des systèmes autonomes reposent surtout sur l'état des batteries, c'est l'élément de base dans ces types des systèmes.

##### 3.1.2 Système connecté au réseau

Les systèmes connectés au réseau (figure 3.1 b) ou « grid connected » proposées dans cette étude, c'est-à-dire le système relié en parallèle au réseau électrique public, et conçu pour injecter dans le réseau l'énergie électrique produite par les champs PV. Dans Les systèmes reliés au réseau, les consommateurs standards de puissance sont connectés au générateur via un onduleur (convertisseur CC-CA) [24]. La tâche de l'onduleur est de transformer le courant continu sortant des panneaux en courant alternatif.

Dans les systèmes connectés au réseau, c'est l'onduleur qui remplace les batteries, dans ce cas c'est l'élément de base dans ces types des systèmes.

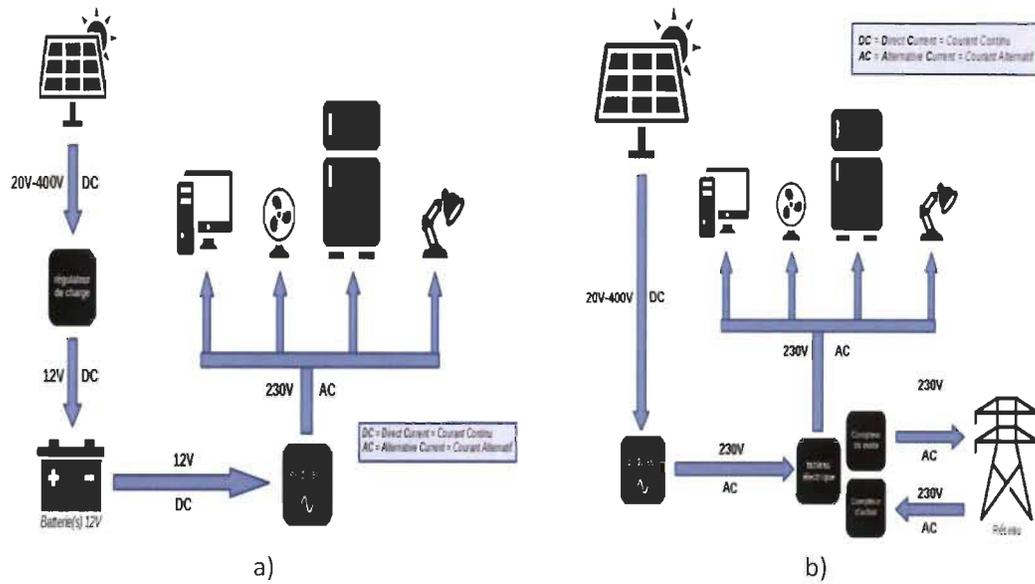


Figure 3.1 Schéma d'un système autonome (a) et d'un système connecté au réseau (b) [37]

Un résumé des systèmes photovoltaïque est présenté ci-après (figure 3.2).

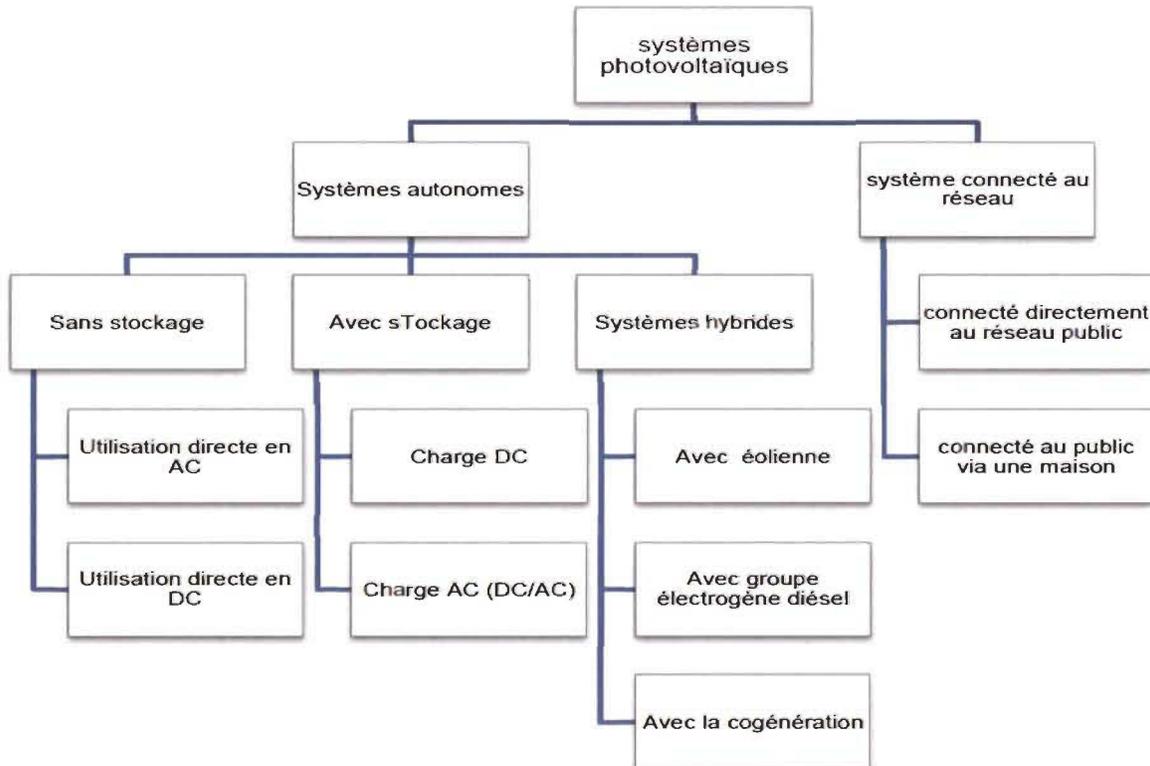


Figure 3.2 Arbre des systèmes photovoltaïques [24]

## 3.2 Avantages et inconvénients des systèmes connectés au réseau

### a- Avantages

- Les systèmes connectés au réseau n'ont pas besoin de stockage d'énergie et éliminent donc le maillon le plus problématique (et plus chère) d'une installation autonome. C'est en fait le réseau dans son ensemble qui sert de réservoir d'énergie.
- Pas de gaspillage - tout excédent est livré au réseau.
- On n'est pas obligé de calculer méticuleusement ses besoins en électricité, et de prévoir des niveaux de demande exceptionnellement très élevées, même si très rares.
- On peut satisfaire à une partie ou à la totalité de ses besoins.

### b- Inconvénients

Les systèmes connectés au réseau permettent aux panneaux ou modules photovoltaïques de faire une percée dans nos vies, cependant...

- La consommation risque de redevenir relativement "invisible", et on pourrait retomber dans le piège de la consommation irréfléchie.
- Les contraintes électriques imposées par les sociétés d'électricité peuvent être rigoureuses, et les onduleurs synchrones doivent répondre aux exigences techniques des compagnies de production et de transport d'énergie.
- Mais le plus important, c'est la question du prix payé pour les kWh livrés au réseau...  
Le coût actuel de la technologie PV est beaucoup plus élevé que celui de l'énergie traditionnelle. Il est difficile de dire combien de temps il faudra pour atteindre un niveau de prix où le kWh photovoltaïque sera compétitif avec le kWh conventionnel, issu de combustibles fossiles (pétrole, gaz ou charbon) ou fissile (nucléaire) [25].

### 3.3 Topologies des systèmes photovoltaïques connectés au réseau

Les systèmes photovoltaïques connectés au réseau ont les différentes topologies selon la connexion du générateur PV avec le réseau électrique. En général, quatre types de système PV connecté au réseau sans batterie de stockage sont identifiés, leurs topologies ont été conçues comme suivent [26][27]:

- Onduleur central
- Onduleur string
- Onduleur multi-string
- Onduleur modulaire

#### 3.3.1 Topologie d'onduleur central (Centralized inverter)

La topologie la plus répandue consiste à utiliser un seul onduleur pour interfacer le générateur PV et le réseau électrique comme la montre en (figure 3.3). Les modules photovoltaïques sont divisés en une chaîne, générant chacune une tension suffisamment élevée pour éviter une amplification supplémentaire. Ces montages en série sont ensuite montés en parallèle pour parvenir à des niveaux de puissance élevés.

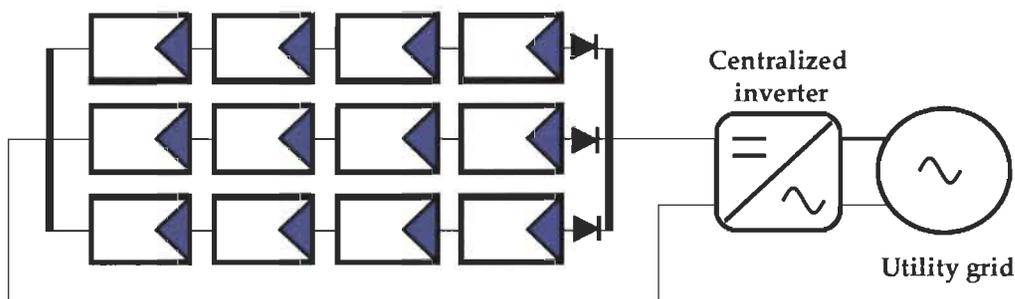


Figure 3.3 Topologie d'onduleur central [26]

Le principal avantage de cette topologie est le haut rendement (faibles pertes dans l'étape de conversion de puissance) et le faible coût en raison de l'utilisation d'un seul onduleur. Par contre, ce montage présente plusieurs défauts :

- pertes de conversion solaire (un seul MPPT pour un ensemble de modules)

- pertes et risques électriques dans le câblage
- aucune évolutivité
- aucune continuité de service en cas de panne de l'onduleur

Malgré les nombreux défauts de cette configuration, cette solution reste très employée dans les centrales PV au sol de forte puissance.

### 3.3.2 Topologie d'onduleur string (String inverter)

La topologie de l'onduleur string consiste à utiliser un onduleur au bout de chaque chaîne de modules PV. Les onduleurs sont ensuite connectés en parallèle au réseau électrique comme indiqué sur la Figure 3.4.

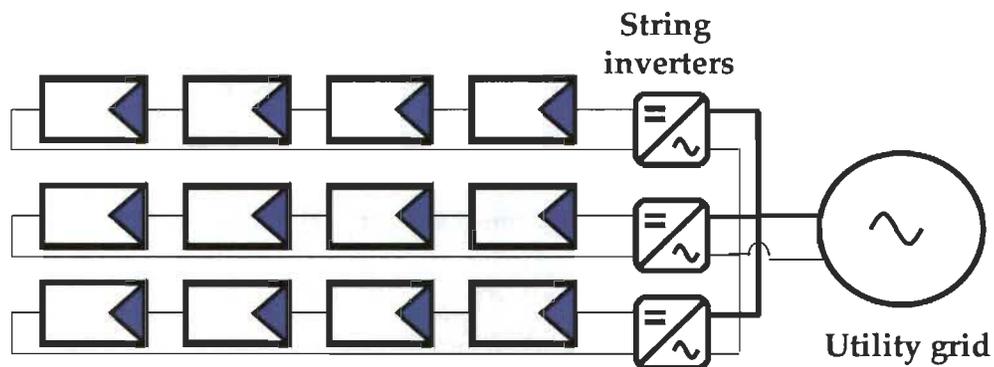


Figure 3.4 Topologie d'onduleur string [26]

La configuration permet un MPPT individuel pour chaque chaîne, d'où la fiabilité du système est améliorée en raison du fait que le système ne dépend plus d'un seul onduleur par rapport à la topologie onduleur central. Si un onduleur string est en panne, les autres onduleurs string peuvent continuer à alimenter le réseau. De plus, la configuration peut évoluer simplement en ajoutant des onduleurs string et les reliant aux bornes d'alimentation du réseau pour augmenter la puissance nominale de l'installation.

Cependant, il subsiste des inconvénients à cette topologie. Tout d'abord, le coût du système est supérieur à l'onduleur central en raison des onduleurs supplémentaires. En outre, la présence d'un onduleur sur chaque string limite les problèmes de couplage entre les modules et les onduleurs de même que la réduction des performances causée

par l'ombrage ou une exposition différente. De plus, lorsque la production d'énergie PV est faible, les onduleurs string sont moins efficaces.

### 3.3.3 Topologie d'onduleur multi-string (Multi-string inverter)

Comme illustré en Figure 3.5, le principe de l'onduleur multi-string mixte est basé sur de nombreux hacheurs CC-CC modulables connectés à un onduleur central via un bus continu. Chaque hacheurs CC-CC dispose de sa propre commande MPPT permettant à chaque string de fonctionner à son PPM.

En effet, cette configuration de l'onduleur multi-string est une version hybride de l'onduleur string et l'onduleur central par la combinaison d'un MPPT à chaque string en utilisant moins de convertisseurs.

Le coût d'un onduleur multi-string est inférieur à celui de l'onduleur string pour une puissance nominale équivalente. En effet, cette topologie a des fonctionnalités similaires à celles de l'onduleur string, tels que l'utilisation d'un hacheur CC-CC au bout de chaque string, mais utilise un seul onduleur pour l'ensemble du réseau. Ceci réduit le coût global du système en conservant un contrôle du flux d'énergie par string.

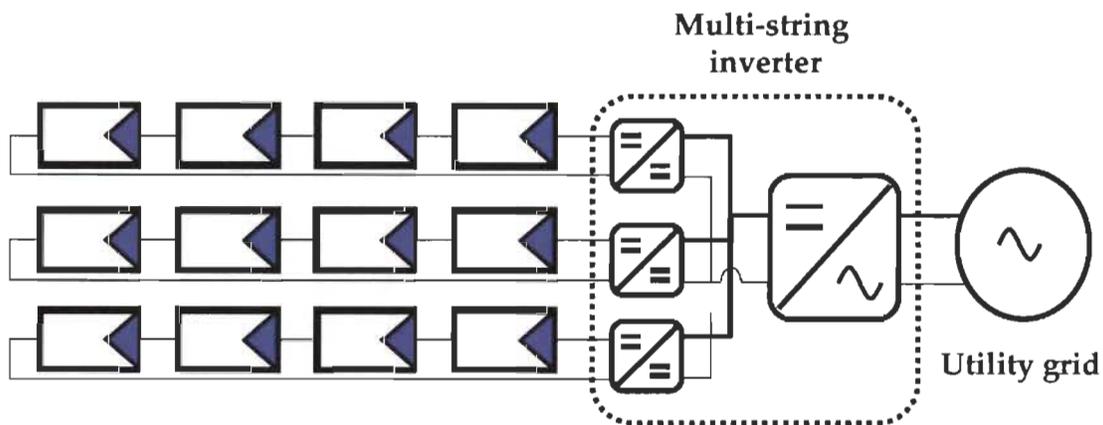


Figure 3.5 Topologie d'onduleur multi-string [26]

Cependant, la fiabilité du système diminue par rapport à la topologie de l'onduleur string et les pertes dues aux hacheur CC-CC sont ajoutées aux pertes du système.

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

Suivant ce concept, chaque module solaire dispose d'un onduleur individuel. Pour les installations importantes, tous les onduleurs sont connectés en parallèle côté courant alternatif comme illustré en figure 3.6. Les onduleurs modulaires sont montés à proximité immédiate du module.

Un meilleur rendement est obtenu par rapport à l'onduleur string car un MPPT est mis en œuvre pour chaque module. Dans cette configuration, les pertes liées aux incohérences entre les modules PV sont éliminées et il est possible d'optimiser l'onduleur pour le module PV et ainsi permette un MPPT individuel pour chaque module PV. Et il présente également l'avantage de réduire les problèmes liés à l'ombrage et à la différence d'exposition des strings mais également ceux liés à l'utilisation de modules différents.

Cependant, cette topologie ne convient qu'aux applications de faible puissance (jusqu'à 500 W) et son coût est relativement élevé.

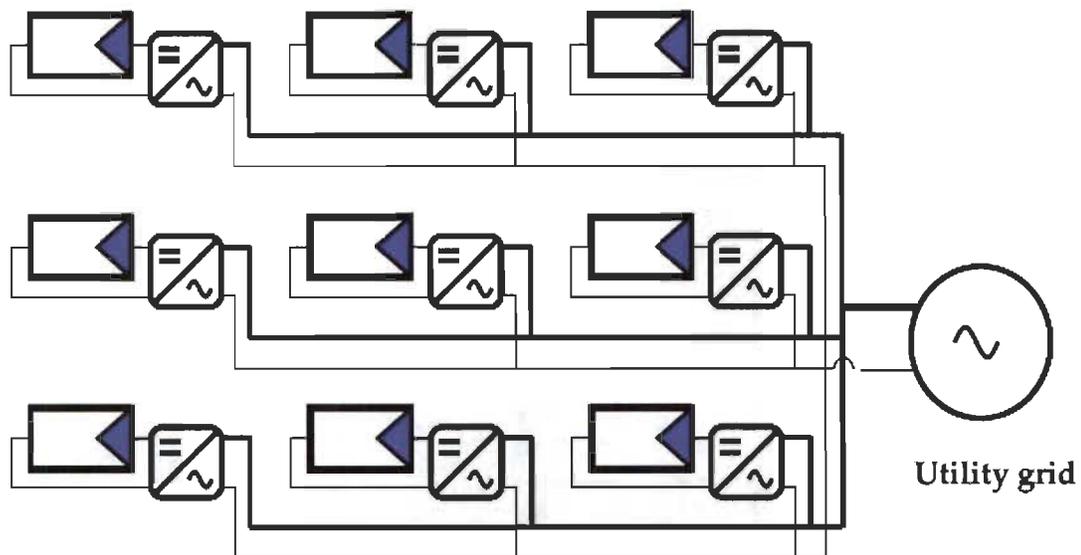


Figure 3.6 Topologie d'onduleur modulaire [26]

Le tableau 3.1 suivant récapitule les avantages et inconvénients de chaque technologie [28] :

Tableau 3.1 : Comparaison entre les différentes topologies

<b>Topologie</b>	<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>	<b>Puissance</b>
Central	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Facile à surveiller</li> <li>- Facile à maintenir</li> <li>- Faible coût en raison de l'onduleur central</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pertes CC dans câbles de haute tension</li> <li>- Pertes de puissance dues à la centralisation MPPT et le décalage dans les modules PV</li> <li>- Faible fiabilité</li> <li>- Configuration pas flexible</li> </ul>	Jusqu'à plusieurs mégawatts
String	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Réduction des pertes d'énergie qui en résultent de l'ombrage partiel</li> <li>- Les pertes dans les diodes de string sont éliminées</li> <li>- Bonne fiabilité</li> <li>- Configuration flexible</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Coût plus élevé par rapport au central</li> <li>- Utilisé pour les faibles puissances</li> </ul>	3-5 kW / string
Multi-String	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Réduction des pertes d'énergie qui en résultent de l'ombrage partiel</li> <li>- Les pertes dans les diodes de string sont éliminées</li> <li>- MPPT et le contrôle de courant sont séparés</li> <li>- L'amplification de tension peut être réalisée par les hacheurs cc-cc</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tous les strings sont connectés à un seul onduleur donc la fiabilité du système diminue</li> <li>- Pertes supplémentaires à l'intérieur du hacheur CC-CC</li> <li>- Le coût est plus élevé par rapport au central</li> </ul>	5 kW
Modulaire	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aucune perte due à l'ombrage partiel</li> <li>- Aucune perte de décalage entre les modules</li> <li>- Facile à détecter le défaut des modules</li> <li>- Configuration flexible et extensible</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Coût élevé</li> <li>- Remplacement de l'onduleur en cas de défaut pas facile</li> <li>- Durée de vie des composants électroniques réduite à cause des thermiques additionnelles</li> </ul>	jusqu'à 500W

### 3.4 Onduleurs multi-niveaux

Un onduleur est un convertisseur statique, assurant la conversion continue alternatif. Ces dernières années, des convertisseurs statiques sont de plus en plus exploités dans des applications diverses. Certaines d'entre eux exigent une alimentation électrique à haute ou moyenne tension, facilement réglable et ayant de bonnes performances spectrales. De nouvelles techniques dites multi-niveaux ainsi que de nouvelles topologies de convertisseurs ont été développées. Elles permettent de générer plusieurs niveaux de tension à la sortie du convertisseur. Le nombre de semi-conducteurs nécessaires à la réalisation de ces topologies augmente avec le nombre de niveaux désirés.

Un onduleur est dit "multi-niveaux" lorsqu'il génère une tension découpée de sortie composée d'au moins trois niveaux.

Pour un réseau moyenne tension, il est difficile de connecter directement un seul commutateur à semi-conducteur de puissance. En conséquence, les onduleurs multi-niveaux ont été introduits comme alternative dans les applications à haute puissance et moyenne tension car ils proposent plusieurs avantages [29].

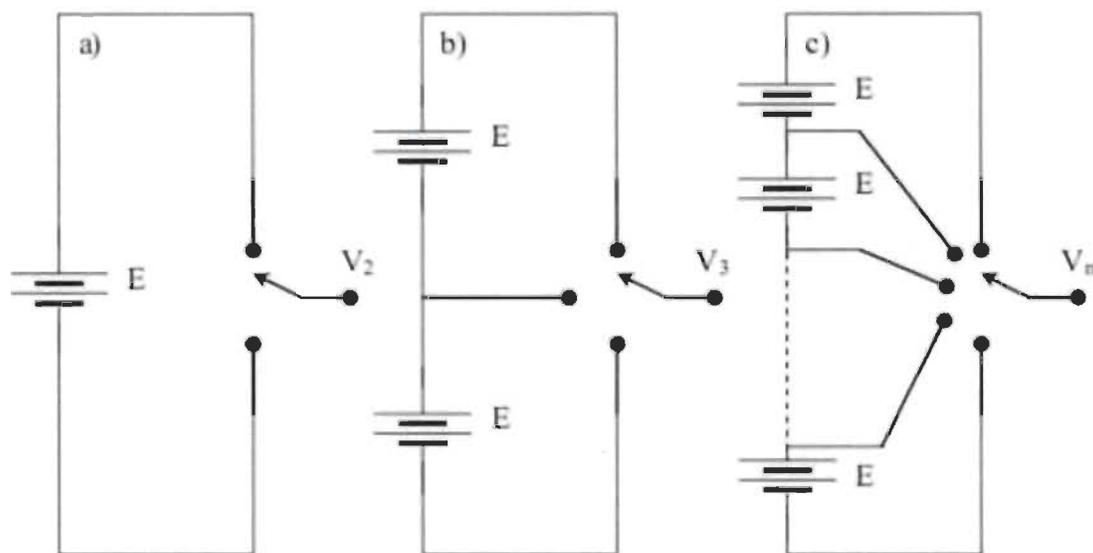


Figure 3.7 Onduleur à niveaux multiples :

a) à deux niveaux. b) à trois niveaux. c) à  $N$  niveaux [30]

La figure 3.7 aide à comprendre comment fonctionne les onduleurs multi-niveaux. Un onduleur à deux niveaux est représenté à la figure 3.7 a), dans laquelle les commutateurs semi-conducteurs ont été remplacés par un interrupteur idéal. La tension de sortie ne peut prendre que deux valeurs: 0 ou E. Sur la figure 3.7 b), la tension de sortie de trois niveaux peut prendre trois valeurs: 0, E ou 2E.

Dans la figure 3.7 c) le cas général de N niveaux est présenté.

L'augmentation de nombre du niveau permet d'améliorer les formes d'ondes en sortie du convertisseur, notamment en termes de contenu harmonique, mais cela nécessite une commande beaucoup plus complexe et un nombre important des semi-conducteurs utilisés. Cela rend le système global plus coûteux et surtout plus complexe [30].

### 3.5 Différentes topologies des onduleurs multi-niveaux

L'objectif de cette partie est de donner un aperçu général des trois topologies de base des onduleurs multi-niveaux :

- ✓ la topologie à diodes de bouclage (en anglais diode clamp);
- ✓ la topologie à condensateurs flottants (en anglais Flying Capacitor);
- ✓ la topologie en pont H cascades (en anglais Cascaded H-bridge);

La figure 3.8 représente les topologies des onduleurs multi-niveaux les plus récentes.

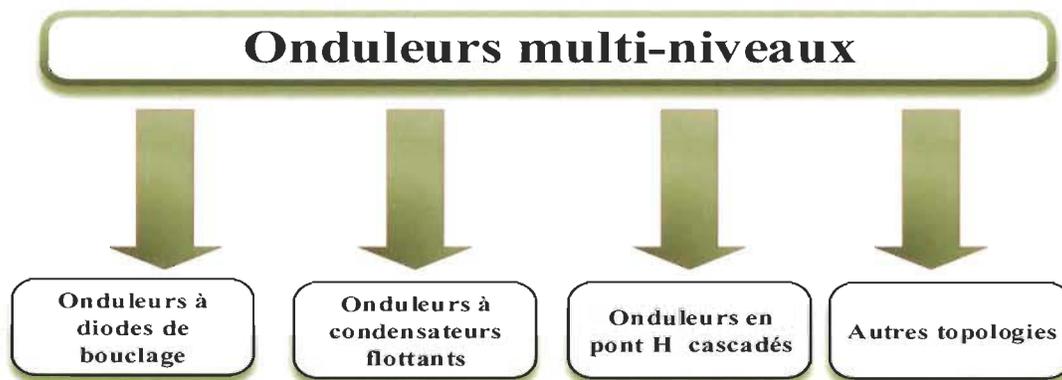


Figure 3.8 Différentes topologies des onduleurs multi-niveaux [31]

### 3.5.1 Onduleur de tension à diodes de bouclage

La première topologie, et la plus pratique, de l'onduleur de tension multiniveaux est la structure NPC (Neutral-Point-Clamped). Elle a été proposée, la première fois, par A. Nabae et H. Akagi en 1981.

Les onduleurs NPC à trois et à cinq niveaux sont donnés par la figure 3.9.

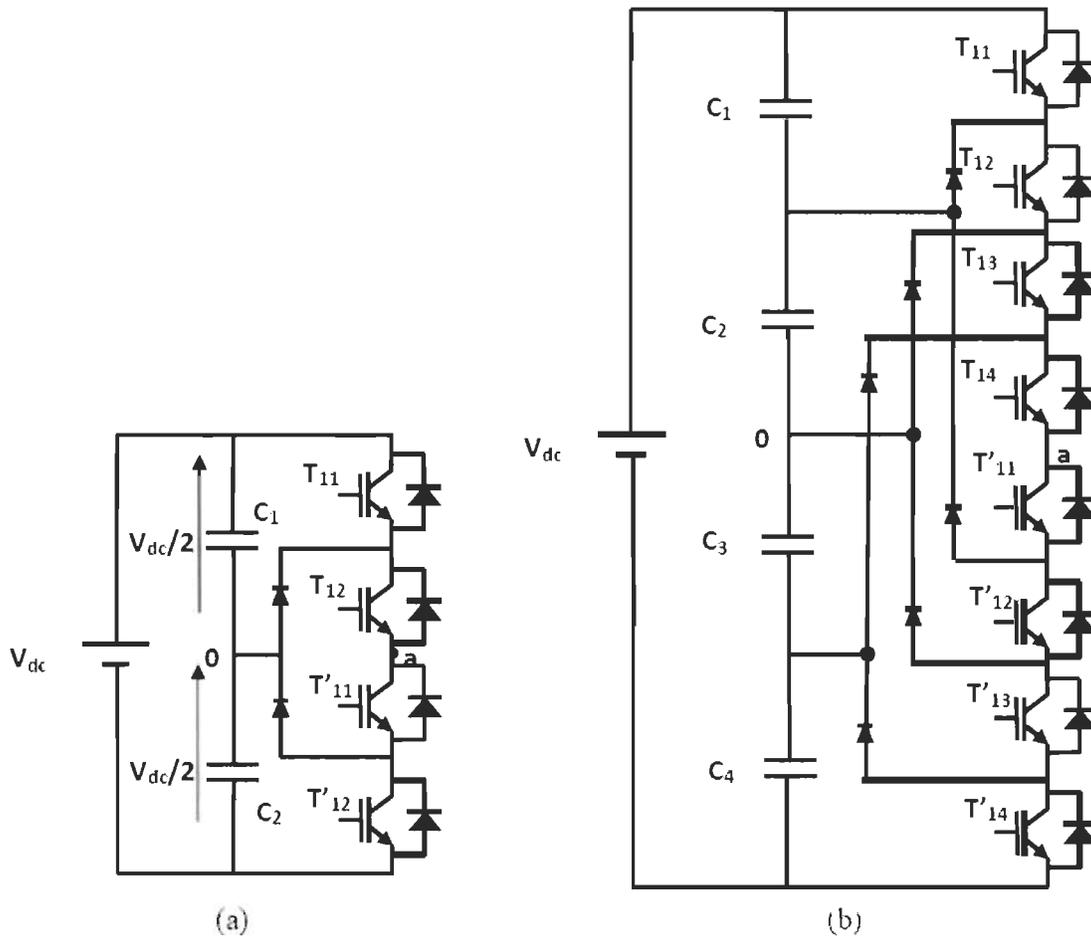


Figure 3.9 Circuit d'une phase d'un onduleur NPC.

a) à trois niveaux. b) à cinq niveaux [30]

Les diodes sont utilisées pour réaliser la connexion avec le point de référence. Pour l'obtention d'une tension de N niveaux, N-1 condensateurs sont nécessaires. Les tensions aux bornes des condensateurs sont toutes égales à  $V_{dc} / (N-1)$ ,  $V_{dc}$  étant la tension d'entrée totale appliquée.

Et en particulier, pour le NPC à trois niveaux, on a trois séquences de fonctionnement :

➤ Séquences 1 : Génération du niveau maximum

Dans ce cas, les interrupteurs T11, T12 sont passants et T'11, T'12 sont bloqués comme la montre dans la figure 3.10(a). La tension de sortie  $V_{ao}$  vaut :  $+V_{dc}/2$ .

La tension appliquée aux interrupteurs T'11, T'12 vaut :  $+V_{dc}/2$ .

➤ Séquences 2 : Génération du niveau intermédiaire

Les interrupteurs T12, T'11 sont passants et T11, T'12 sont bloqués, dans ce cas le point a est relié directement au point 0 à travers l'une des diodes de maintien, comme la montre dans la figure 3.10(b). La tension de sortie  $V_{ao}$  est donc nulle,  $V_{ao} = 0$ .

La tension appliquée aux interrupteurs T11, T'12 vaut :  $+V_{dc}/2$ .

➤ Séquences 3 : Génération du niveau minimum

Dans ce cas, les interrupteurs T11, T12 sont bloqués et T'11, T'12 sont passants comme la montre dans la figure 3.10(c). La tension de sortie  $V_{ao}$  vaut :  $-V_{dc}/2$ .

La tension appliquée aux interrupteurs T11, T12 vaut :  $+V_{dc}/2$  [30].

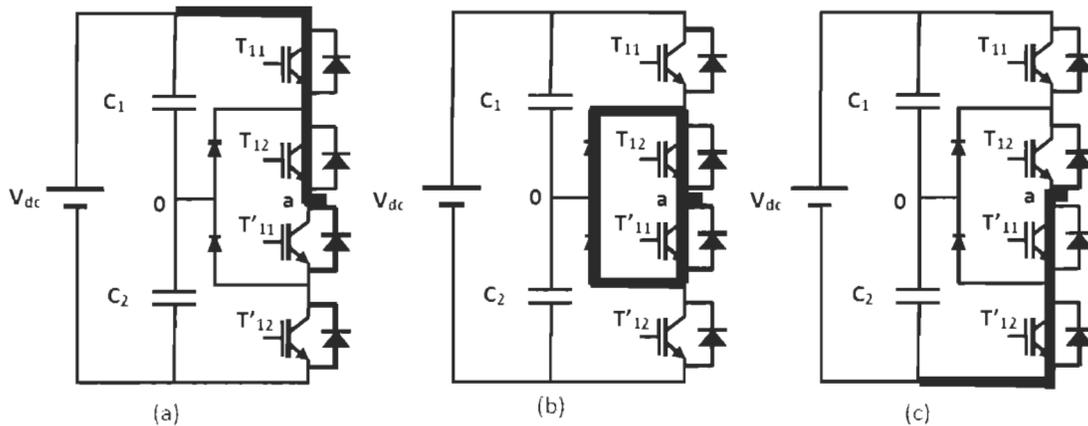


Figure 3.10 : Séquences de fonctionnement d'un bras  
d'onduleur NPC trois niveaux [30]

Les trois états de commutation possibles sont résumés au Tableau 3.2, l'état 1 représente l'interrupteur fermé et l'état 0 représente l'interrupteur ouvert.

Tableau 3.2 États de commutation de l'onduleur NPC à trois niveaux

T11	T12	T'11	T'12	V <sub>ao</sub>
1	1	0	0	V <sub>dc</sub> /2
0	0	1	1	-V <sub>dc</sub> /2
0	1	1	0	0

Pour un onduleur NPC à N-niveaux de tensions, nous avons N séquences de fonctionnement possibles permettant de générer les N niveaux de tensions.

L'onduleur de tension à trois niveaux présente des avantages par rapport à la topologie d'onduleur classique (à deux niveaux).

Ces avantages sont:

- ✓ Les composants de puissance à semi-conducteur bloquent une tension inverse égale seulement à la moitié de la tension de la source continue.
- ✓ Toutes les phases partagent le même bus continu.
- ✓ La méthode de commande est relativement simple.
- ✓ Cette topologie peut être généralisée et les principes employés dans la topologie d'onduleur à trois niveaux peuvent être étendus pour l'utilisation dans des topologies avec n'importe quel nombre de niveaux.

Cependant, en utilisant cette topologie, l'expérience pratique a révélé plusieurs difficultés techniques qui compliquent ses applications dans le cas de grandes puissances. Ce sont :

- ✓ Pour les topologies avec plus de trois niveaux, les diodes de bouclage (diodes clamped) peuvent augmenter les contraintes en tension jusqu'à une valeur égale à  $V_{dc}(N-1)/N$ , où N est le nombre de niveaux. Donc, les connexions des diodes en série pourraient être exigées et cela complique la conception et soulève des questions de fiabilité et du coût de réalisation ;

- ✓ L'exigence des diodes a fréquence de commutations élevée et qui doivent supporter le courant maximale circulent dans le circuit.
- ✓ Lorsque le nombre de niveaux est supérieur à trois, l'équilibre des tensions aux bornes des condensateurs devient très complexe [32].

### 3.5.2 Onduleur de tension à condensateur flottant

L'onduleur à condensateur flottant (Flying Capacitor Multilevel Inverter) est une topologie de conversion d'énergie qui repose sur la mise en série d'interrupteurs commandés. Elle a été proposée par Meynard et Foch en 1992. Dans cette topologie, les capacités remplacent les diodes de blocage, d'où l'appellation « onduleur à condensateur flottant ». Cette structure est proposée pour résoudre d'une part le problème de l'équilibre des tensions, et d'autre part pour réduire le nombre excessif de diodes.

Dans la topologie suivante, on représente l'onduleur à condensateur flottant à trois et cinq niveaux en figure 3.11.

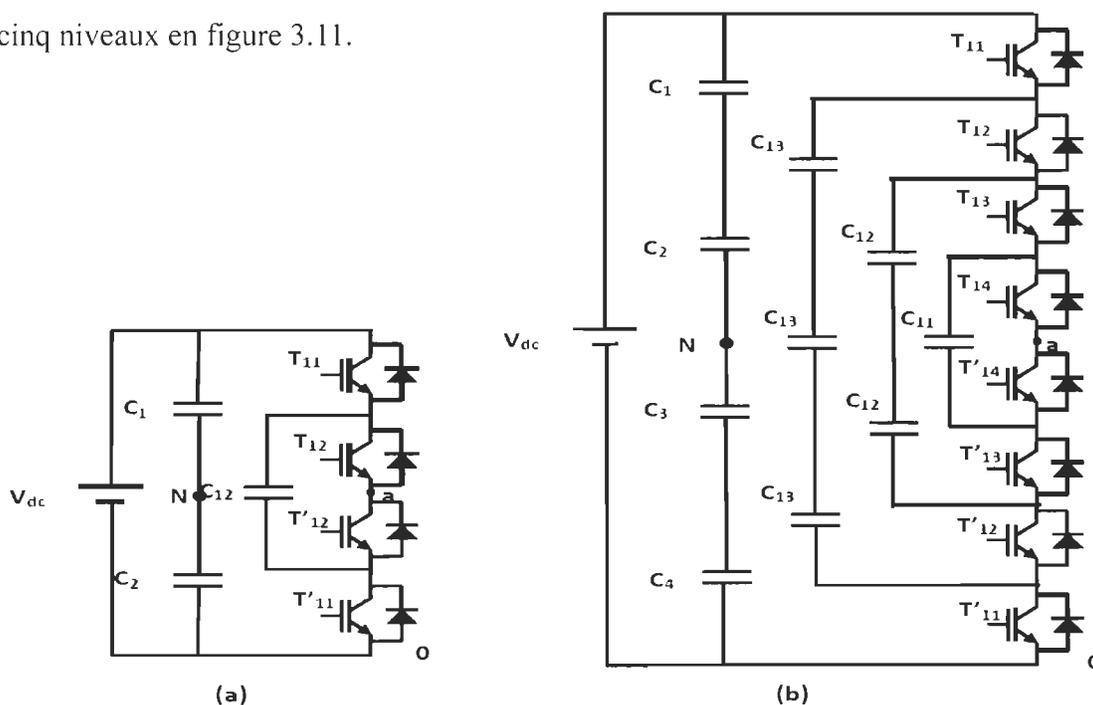


Figure 3.11 Circuit d'une phase d'un onduleur à condensateur flottant

a) à trois niveaux. b) à cinq niveaux [30]

Pour un onduleur à condensateur flottant de  $N$  niveaux, chaque bras doit contenir  $2(N-1)$  interrupteurs et  $N(N-1)/2$  capacités, et nous avons  $2^{N-1}$  séquences de fonctionnement possible permettant de générer les  $n$  niveaux de tensions. Cette topologie élimine quelques inconvénients de la NPC comme l'équilibre des tensions supportées par les interrupteurs.

Le principe de fonctionnement de cette topologie est quasiment identique à celui de la topologie NPC. Elle présente plusieurs avantages, notamment:

- ✓ Elle élimine le problème des diodes de blocage dans la topologie NPC.
- ✓ La tension de blocage des interrupteurs est partout la même ;
- ✓ Les condensateurs n'étant jamais mis en série entre niveaux différents, le problème du déséquilibre de leur tension n'existe plus.
- ✓ Puisqu'elle est modulaire, l'assemblage pour un nombre de niveaux élevé est facile.

Actuellement il semble que cette topologie a quelques inconvénients :

- ✓ Le contrôleur de la charge du condensateur ajoute la complexité au contrôle du circuit entier.
- ✓ La topologie de l'onduleur multi-niveau à cellules imbriquées peut exiger plus de condensateurs que la topologie de l'onduleur NPC.

### **3.5.3 Onduleur multi-niveaux en pont H cascades**

Les onduleurs multi-niveaux en cascade est une structure relativement nouvelle. Un onduleur multi-niveaux en cascade est tout simplement une connexion en série de plusieurs ponts à deux niveaux monophasés, ces ponts étant connectés à des sources de tension continues séparées. Les onduleurs multi-niveaux en cascade on introduit l'idée d'utiliser des sources CC séparées pour produire une onde de tension alternative.

Chaque onduleur monophasé est connecté à sa propre source en courant continu. Les sorties de chaque onduleur monophasé, est une onde de tension alternative.

La figure 3.12 c) montre le schéma de base d'un onduleur à N niveaux en cascade formé par l'association en série de  $(N-1) / 2$  ponts à deux niveaux. La tension de sortie  $V_s$  d'une telle structure est donnée par la somme des  $(N-1) / 2$  tensions en sortie de ces ponts. Chaque onduleur monophasé en pont est connecté à sa propre source en courant continu. Le nombre de niveaux de tension de sortie dans un onduleur en cascade est définie par :  $N = 2s + 1$ , Où  $s$  est le nombre des sources des tensions continues [33].

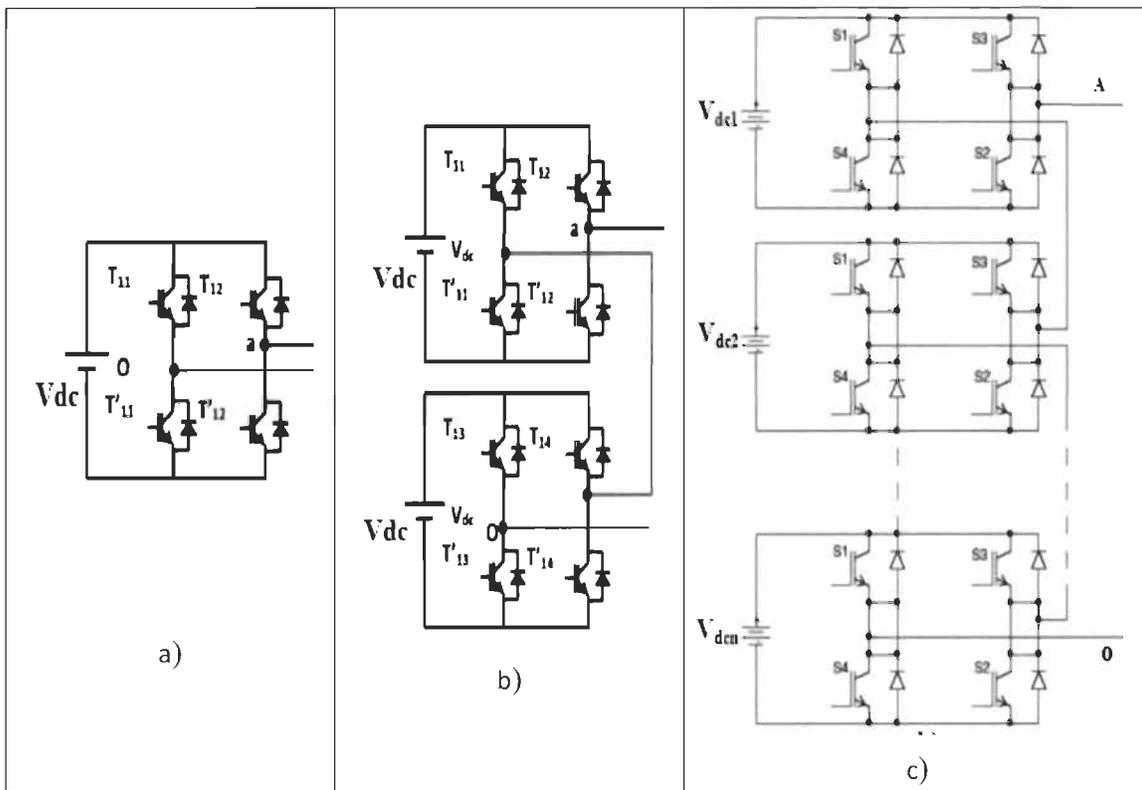


Figure 3.12 : Circuit d'une phase d'un onduleur en pont H cascadié

a) à trois niveaux b) à cinq niveaux et c) à n niveaux [30]

Pour mieux comprendre le fonctionnement de la structure cascade en pont H à trois niveaux de tension, nous allons limiter notre étude à sa structure monophasée, figure 3.12 a).

Comme pour le cas de l'onduleur NPC trois niveaux, nous avons trois séquences de fonctionnement possibles:

◇ Séquences 1 : Génération du niveau maximum

Dans ce cas, les interrupteurs sont bloqués et  $T'_{11}$ ,  $T_{12}$  sont passants comme le montre la figure 3.13(b). La tension de sortie  $V_{ao}$  est:  $V_{ao} = +V_{dc}$ . La tension inverse appliquée aux interrupteurs  $T_{11}$ ,  $T'_{12}$  vaut  $+V_{dc}$

◇ Séquences 2 : Génération du niveau intermédiaire

Dans ce cas, les interrupteurs  $T_{11}$ ,  $T_{12}$  sont bloqués et  $T'_{11}$ ,  $T'_{12}$  sont passants comme le montre la figure 3.13(c). La tension de sortie  $V_{ao}$  est:  $V_{ao} = 0$ . La tension inverse appliquée aux interrupteurs  $T_{11}$ ,  $T_{12}$  vaut  $+V_{dc}$ .

◇ Séquences 3 : Génération du niveau minimum

Dans ce cas, les interrupteurs  $T_{11}$ ,  $T'_{12}$  sont passants et  $T'_{11}$ ,  $T_{12}$  sont bloqués comme le montre la figure 3.13(a). La tension de sortie  $V_{ao}$  est:  $V_{ao} = -V_{dc}$ . La tension inverse appliquée aux interrupteurs  $T'_{11}$ ,  $T_{12}$  vaut  $+V_{dc}$ .

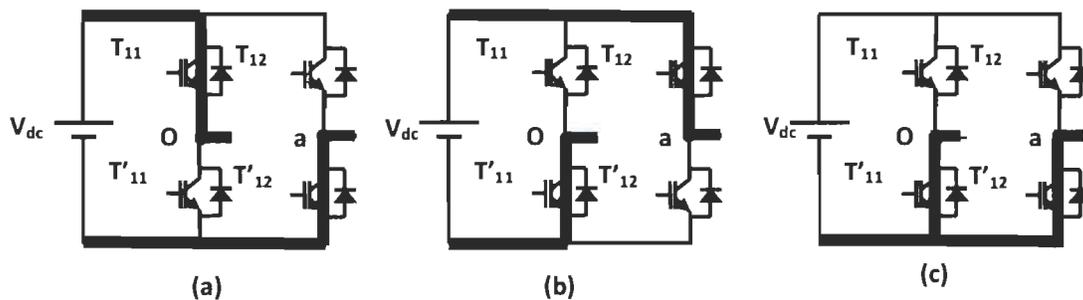


Figure 3.13 : Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur trois niveaux en cascade [30]

Les trois états de commutation possibles sont résumés au tableau 3.3.

Tableau 3.3 : États possibles de l'onduleur cascade à trois niveaux

<b>T<sub>11</sub></b>	<b>T<sub>12</sub></b>	<b>T'<sub>11</sub></b>	<b>T'<sub>12</sub></b>	<b>V<sub>ao</sub></b>
1	0	0	1	$V_{dc}$
0	1	1	0	$-V_{dc}$
0	0	1	1	0

➤ **Avantages de l'onduleur multi-niveaux en cascade**

Les onduleurs multi-niveaux en cascade présentent les avantages suivants :

- ✓ Qualité de forme d'onde d'escalier qui réduit la compatibilité électromagnétique.
- ✓ Le contrôle modulaire peut être réalisé.
- ✓ Nécessiter moins de composants que les autres topologies pour atteindre le même nombre de niveaux de la tension de sortie.
- ✓ Dessiner le courant d'entrée avec une faible distorsion.

➤ **Inconvénients de l'onduleur multi-niveaux en cascade**

Les inconvénients de la configuration de l'onduleur multi-niveaux en cascade sont :

- ✓ La communication entre les ponts complets est nécessaire pour réaliser la synchronisation de la référence et des formes d'ondes porteuses.
- ✓ Les sources continues nécessaires, limitant ainsi leur utilisation dans certains domaines d'application [34].

### 3.6 Comparaison entre les trois principaux onduleurs multi-niveaux

Le tableau 3.4 récapitule, pour le même nombre de niveaux N de la tension simple de sortie, le nombre de composants nécessaires à la conception de chacune des trois structures multi niveaux permettant l'équilibrage de la contrainte en tension exercée sur les interrupteurs les constituant.

Tableau 3.4 : Nombre de composants nécessaires à la réalisation des trois structures d'onduleurs multi-niveaux [30]

<b>Structures</b> <b>Les composants</b>	<b>Diode de bouclage</b> <b>(NPC)</b>	<b>Condensateur flottant</b> <b>(FC)</b>	<b>Pont H cascade</b> <b>(CHB)</b>
Commutateurs principaux	$2(N-1)$	$2(N-1)$	$2(N-1)$
Diodes principaux	$2(N-1)$	$2(N-1)$	$2(N-1)$
Diodes de bouclage	$(N-1)(N-2)$	0	0
Condensateurs continus	$(N-1)$	$(N-1)$	$(N-1)/2$

Condensateurs d'équilibrage	0	$(N-1)(N-2)/2$	0
-----------------------------	---	----------------	---

Du point de vue du nombre de composants, les onduleurs en pont H cascades paraissent la solution multiniveaux la plus avantageuse, surtout lorsque le nombre de niveaux devient important. C'est effectivement le cas pour les applications monophasées telles que le filtrage actif ou la compensation statique, lorsque le convertisseur n'a pas besoin de fournir d'énergie au système. Pour les applications triphasées et pour un petit nombre de niveaux, les onduleurs NPC sont intéressants, car les condensateurs sont partagés par les différentes branches, ce qui permet un équilibrage de la puissance circulant entre les phases. Cet équilibrage permet une réduction notable de la taille des condensateurs intermédiaires.

### 3.7 Modulation de largeur d'impulsion (MLI)

La modulation de largeur d'impulsion (MLI ou PWM : Pulse Width Modulation en anglais), consiste à adopter une fréquence de commutation supérieure à la fréquence des grandeurs de sortie et former chaque alternance de la tension de sortie d'une succession de créneaux de largeur convenable. Son objectif est d'obtenir une tension de sortie qui est proche de la sinusoïdale 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 [33].

#### 3.7.1 La modulation sinus-triangle (MLI sinusoïdale)

La technique MLI sinusoïdale est la plus utilisée pour la commande des onduleurs multi-niveaux. Elle utilise la technique du décalage de phase pour réduire les harmoniques de la tension de charge. La figure 3.14 représente le schéma de principe de la technique MLI sinusoïdale.

Pour générer les impulsions de commande MLI sinusoïdale d'un convertisseur à N-niveaux de tensions, N-1 porteuses triangulaires sont nécessaires. Ces porteuses ont la

même fréquence  $f_p$  et la même amplitude  $V_p$ . Ils sont ensuite comparés au signal de référence d'amplitude  $V_{ref}$  et de fréquence  $f_r$ . Chaque comparaison donne 1 si une porteuse est supérieure ou égale à la référence, et 0 dans le cas contraire. À la sortie du modulateur, la somme des résultats issus des comparaisons est ensuite décodée, et donne la valeur correspondant à chaque niveau de tension.

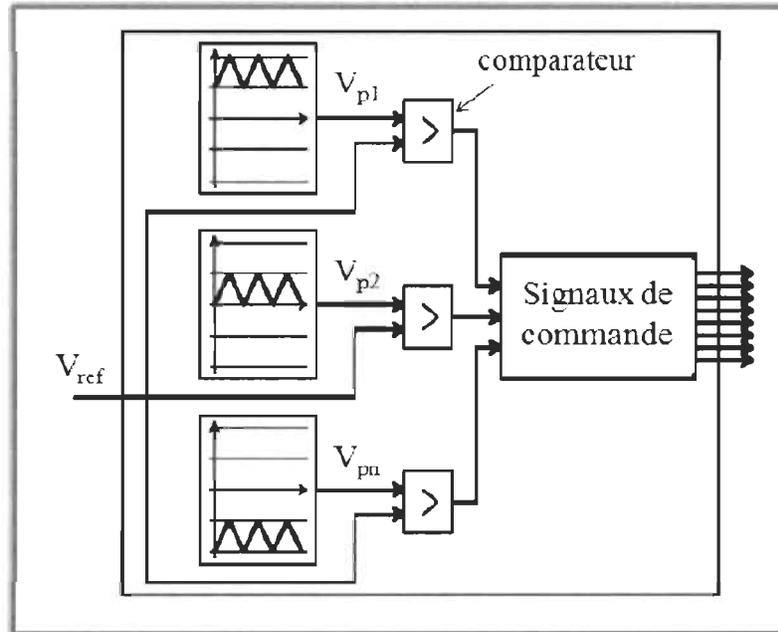


Figure 3.14 : Schéma de principe de la technique MLI sinusoidale [33]

Pour un convertisseur de  $N$  niveaux, l'indice de modulation de fréquence  $m$  et le coefficient de réglage  $r$  sont définies comme suit :

$$m = \frac{\omega_p}{\omega_r} = \frac{f_p}{f_r} \quad (3.1)$$

$$r = \frac{V_{ref}}{(N-1)V_p} \quad (3.2)$$

Les méthodes de MLI sinusoidale sont classées selon la disposition des porteuses triangulaires et les plus utilisées sont :

- Phase Disposition (PD) : Toutes les porteuses sont identiques en amplitude, en fréquence et en phase. C'est la méthode MLI la plus utilisée vue la simplicité de

son implémentation. Pour les valeurs de l'indice de modulation proches de 1, la méthode PD présente le plus faible taux de distorsion harmonique (TDH) comparée aux autres méthodes MLI sinusoïdale

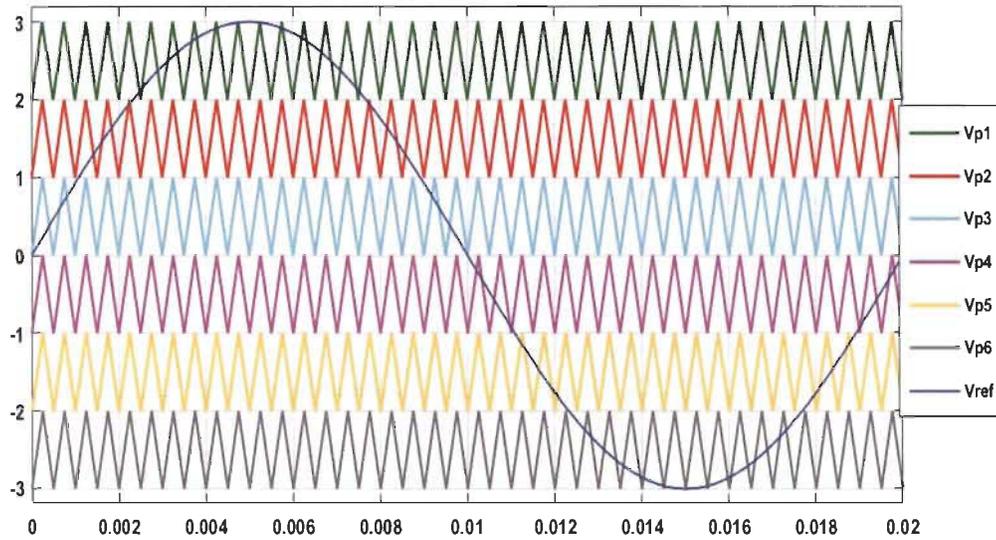


Figure 3.15 Forme d'onde des signaux PD pour 7 niveaux

- Phase Opposition Disposition (POD) : Les porteuses de la partie négative sont en opposition de phase avec ceux de la partie positive. Toutes les porteuses ont les mêmes fréquences et amplitudes. Pour la fréquence porteuse et ses multiples il n'y a pas d'harmoniques et la dispersion des harmoniques se produit autour d'eux.

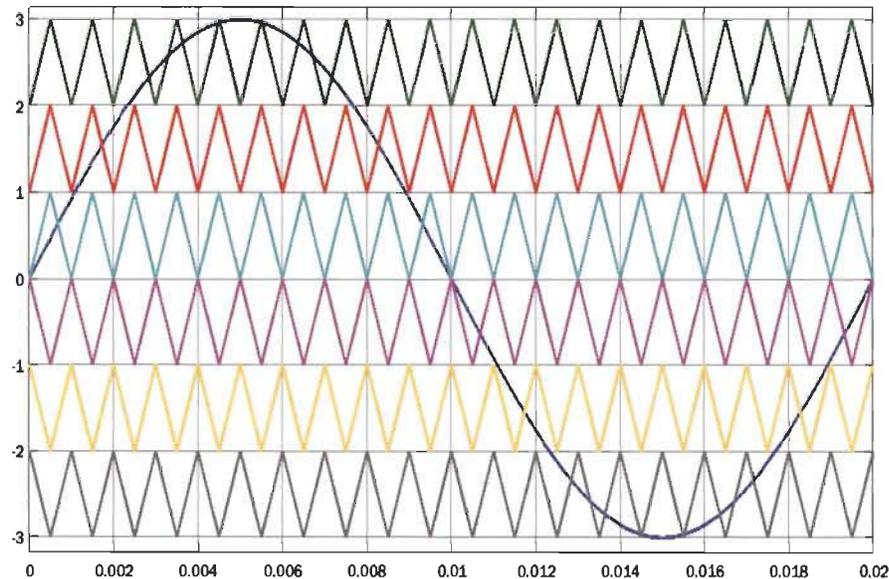


Figure 3.16 Forme d'onde des signaux POD pour 7 niveaux

- Alternate Phase Opposition Disposition (APOD) : Chaque porteuse est déphasée de  $180^\circ$  par rapport à ses adjacentes. Les fréquences et les amplitudes des porteuses sont égales. Les harmoniques significatives, une fois de plus, sont situés autour de la fréquence porteuse pour les formes d'onde de tension de phase et de ligne [35].

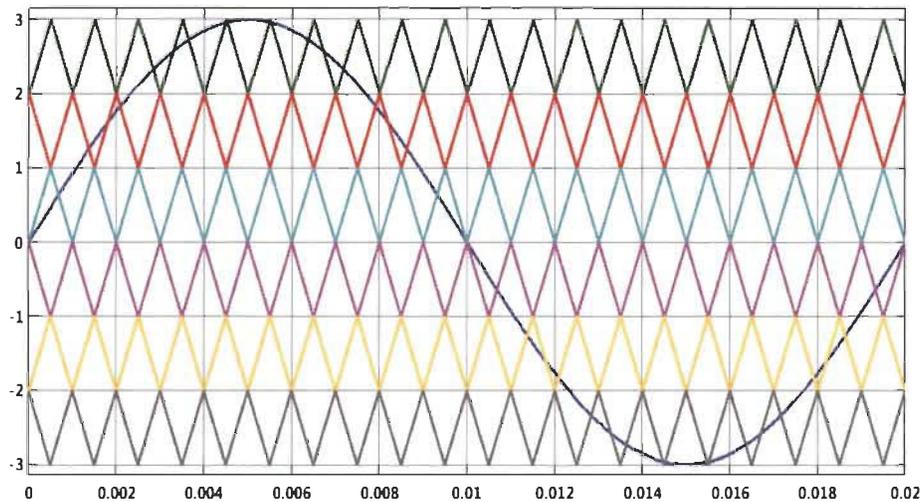


Figure 3.17 Forme d'onde des signaux APOD pour 7 niveaux

### 3.8 Raccordement de l'onduleur PV au réseau électrique

Le raccordement des installations de production aux réseaux publics de distribution est encadré par plusieurs réglementations.

Cette partie présente le développement du contrôle de l'étage CC-CA de l'onduleur PV pour régler la tension à injecter, laquelle comporte :

- Une boucle à verrouillage de phase (PLL : Phase Locked Loop) pour la synchronisation avec la tension du réseau.
- Une boucle de réglage de la tension du bus continu laquelle impose la référence du courant à injecter au réseau.
- Une boucle de poursuite de courant réseau désiré [33].

Le schéma synoptique de connexion au réseau électrique se présente dans la figure 3.18.

La sortie de l'onduleur est connectée au réseau électrique, échantillonnant la tension du réseau ( $e_a$ ,  $e_b$  et  $e_c$ ) 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. Les écarts entre elles passent par le régulateur PI, les sorties de régulateur donnent les composantes de la tension de référence de la MLI dans le repère (dq). En passant par la transformée inverse de Park, nous obtenons les références du signal de commande (MLI).

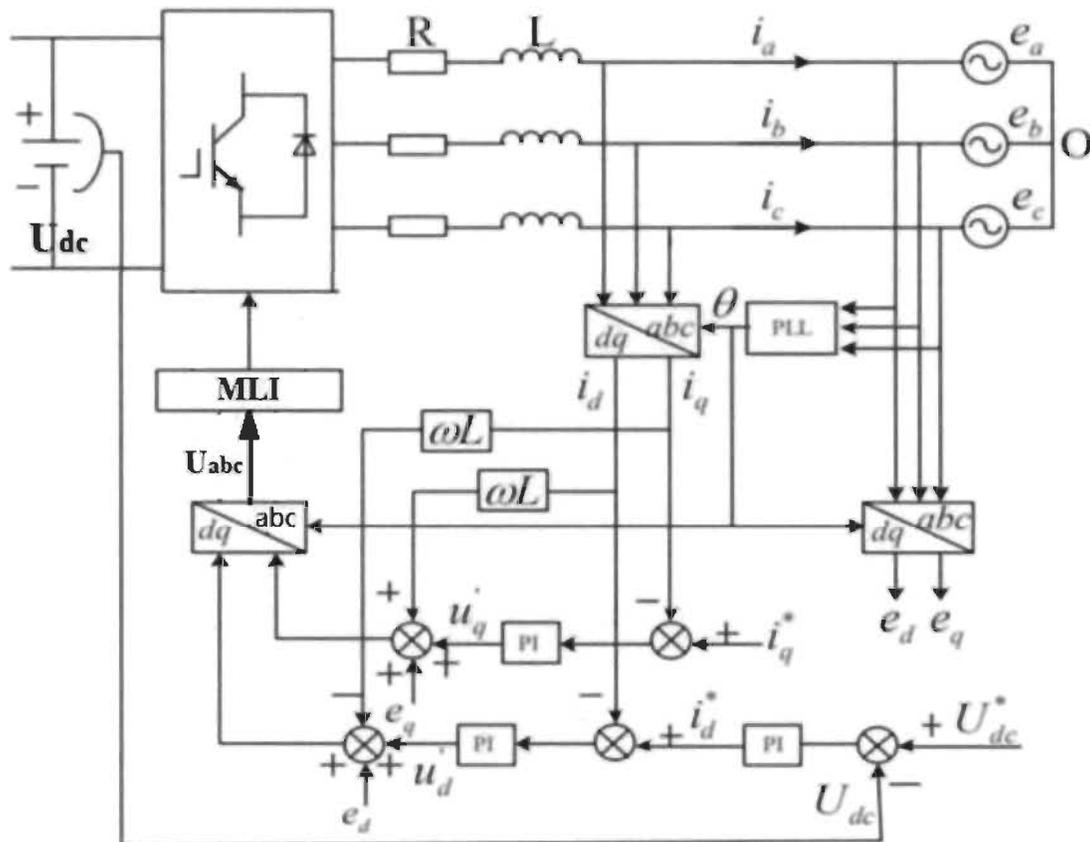


Figure 3.18 Schéma synoptique de commande de la connexion au réseau [39]

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

$i_d$  et  $i_q$  : sont les composantes directe et quadratique du courant à la sortie d'onduleur dans le référentiel de Park.

$U_d^*$  et  $U_q^*$  : sont les composantes directe et quadratique de la tension à la sortie du régulateur PI dans le référentiel de Park.

### 3.8.1 Boucle à verrouillage de phase (PLL : Phase Locked Loop)

Une PLL, ou boucle à phase asservie, ou encore boucle à verrouillage de phase, est un montage électronique permettant d'asservir la phase instantanée de sortie sur la phase instantanée d'entrée, mais elle permet aussi d'asservir une fréquence de sortie sur un multiple de la fréquence d'entrée.

Le principe de base de la PLL triphasée 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 [40].

La figure 3.19 présente le schéma de la PLL, ce qui assure la synchronisation de la commande par rapport à l'évolution des tensions du réseau.

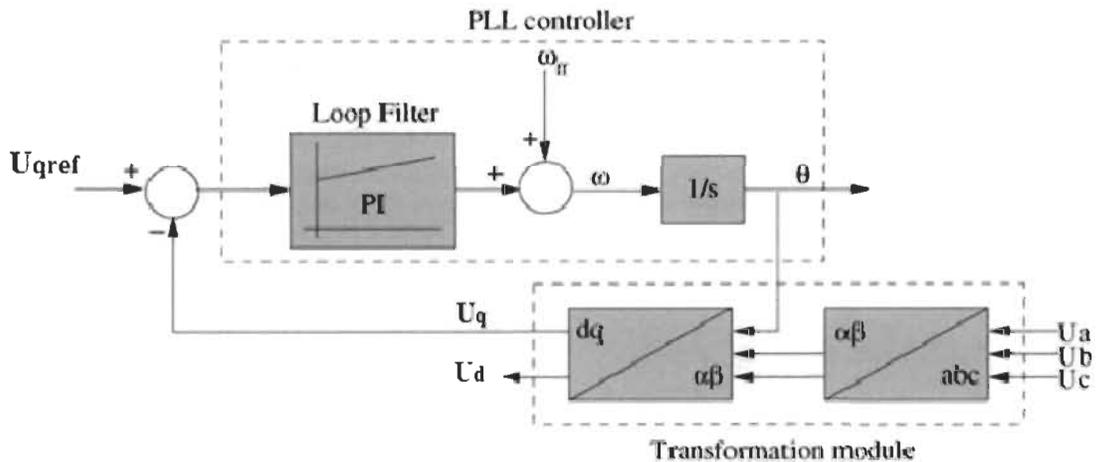


Figure 3.19 Schéma de régulation de la PLL [41]

### 3.8.2 Contrôle des courants envoyés au réseau électrique

Le dispositif de commande des courants ( $i_d$  et  $i_q$ ) a été obtenu à partir de l'inversion du modèle de la liaison au réseau dans le repère de Park. Il comprend trois actions spécifiques :

- Une action de découplage des courants :

$$U_{dref} = U_d + e_d - v_q \quad (3.1)$$

$$U_{qref} = U_q + e_q - v_d \quad (3.2)$$

- Une compensation de la tension :

$$v_q = \omega \cdot L \cdot i_q \quad (3.3)$$

$$v_d = \omega \cdot L \cdot i_d \quad (3.4)$$

- Un contrôle en boucle fermée des courants :

$$U_{dref} = PI \cdot (i_{dref} - i_d) \quad (3.5)$$

$$U_{qref} = PI \cdot (i_{qref} - i_q) \quad (3.6)$$

La figure 3.20 présente un schéma sous forme de bloc des lois de commande obtenues par inversion du modèle de filtre dans le repère de Park.

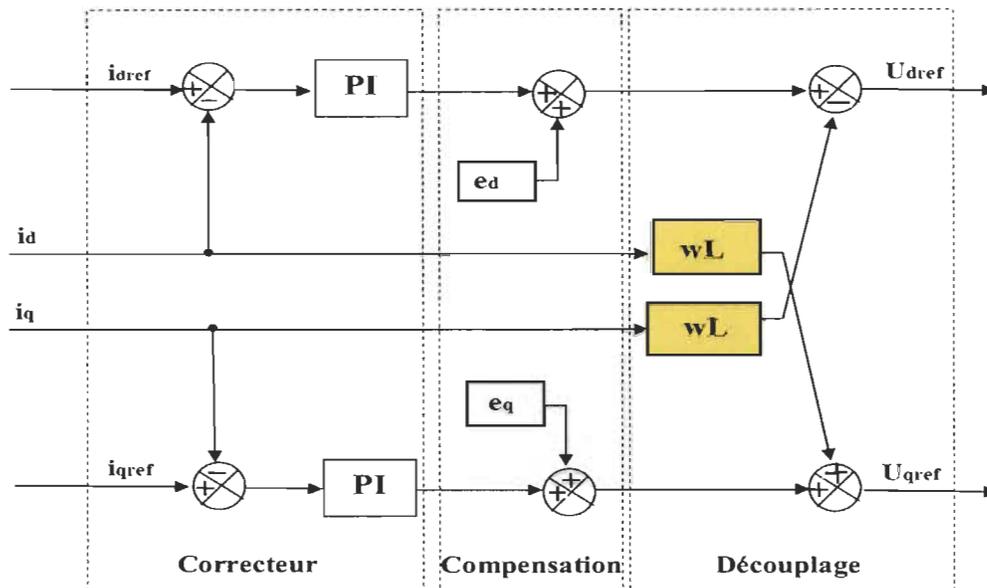


Figure 3.20 Schéma bloc du contrôle des courants transités par le réseau dans le repère de Park [42]

### 3.8.3 Contrôle de la tension du bus continu

La régulation des transits de puissance permet d'imposer le courant capacitif au bus continu. La régulation du bus continu est alors réalisée au moyen d'une boucle de régulation, permettant de maintenir une tension constante du bus continu, avec un correcteur PI générant la référence du courant à injecter dans le condensateur C ( $i_{Cref}$ ):

$$i_{Cref} = PI \cdot (i_{Cref} - i_c) \quad (3.7)$$

### 3.9 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'introduction de quelques notions et définitions (les différentes topologies, les avantages et inconvénients) relatives aux systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique. Nous avons décrit les onduleurs photovoltaïques, les différentes topologies de base sont données tout en exposant leurs avantages et inconvénient à savoir :

- ✓ La topologie NPC permet de réduire le taux de distorsion harmonique, ainsi l'augmentation de niveaux des tensions générées.
- ✓ La topologie FC aussi permet la réduction du taux de distorsion mais elle constitue en un grand nombre de condensateurs.
- ✓ La topologie CHB où le nombre de niveaux possibles de tension de sortie est plus de deux fois le nombre de sources à courant continu.

On a aussi présenté la commande modulation sinus-triangle (MLI sinusoïdale) relative aux onduleurs multi-niveaux et le raccordement de l'onduleur PV au réseau électrique.

## Chapitre 4

### Modélisation et simulation du système photovoltaïque connecté au réseau électrique

#### 4.1 Simulation de module photovoltaïque

Dans ce travail nous avons simulé le module photovoltaïque Poly ELYSUN qui comporte 54 cellules monocristallines connectées en série. Il peut délivrer dans les conditions standards de test (CST : un éclairement de  $1000\text{W}/\text{m}^2$  et une température  $T=25^\circ\text{C}$ ) une puissance de  $200\text{W}$ , un courant de  $7.68\text{A}$  sous une tension optimale de  $26.1\text{V}$ . Les caractéristiques électriques de ce module PV sont données dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1 : Caractéristiques électriques du module photovoltaïque Poly ELYSUN dans les conditions standards de test (CST) [36]

Puissance maximale	200W
Tension à puissance maximale ou tension optimale	26.1V
Courant à puissance maximale ou courant optimal	7.68A
Courant de court-circuit	8.29A
Tension à circuit ouvert	33.35V
Nombre des cellules en séries	54

La figure 4.1 présente le block du module PV dans l'environnement Simulink.

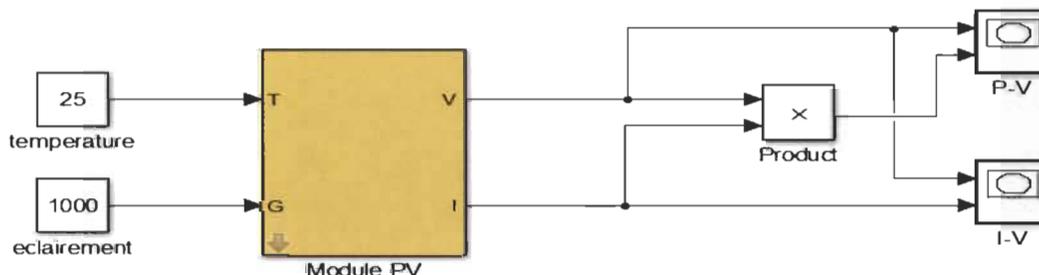


Figure 4.1: Bloc du module Poly ELYSUN dans Simulink

Dans la figure 4.2, nous représentons les résultats concernant les caractéristiques I(V) et P(V) du panneau à 25° obtenues pour diverses valeurs de l'éclairement.

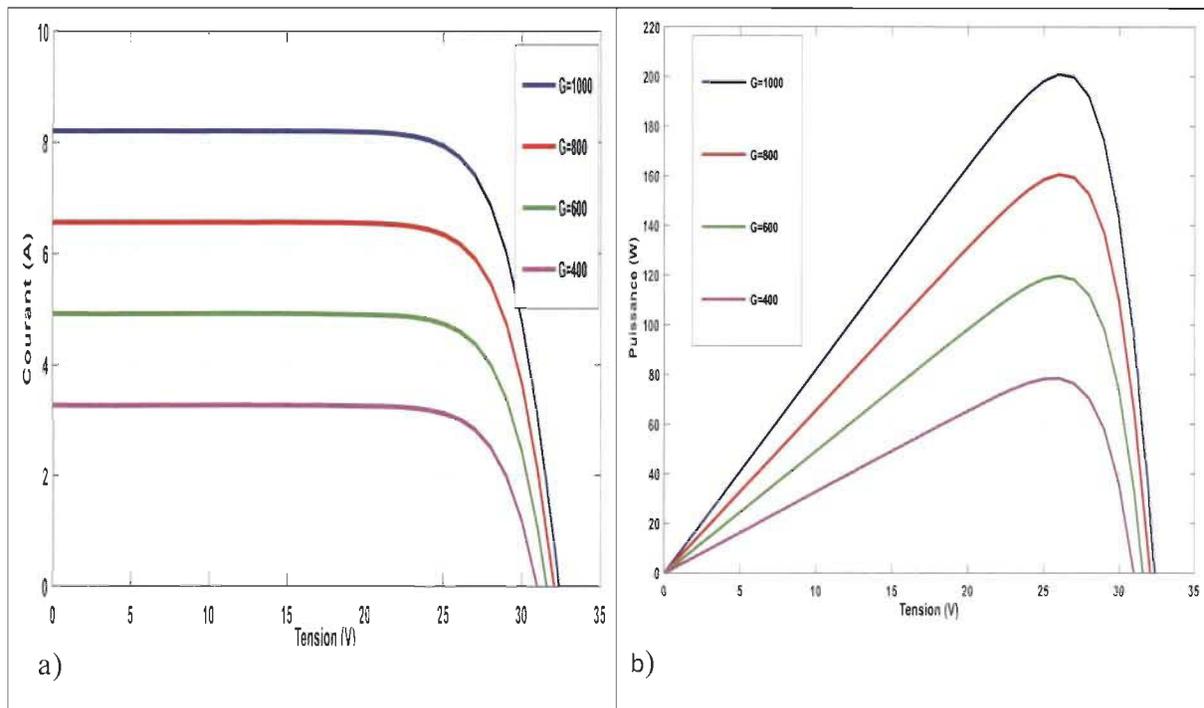


Figure 4.2 a) Caractéristique I (V) et b) caractéristique P (V) d'un module PV pour différentes valeurs de l'éclairement

Comme nous le voyons, les résultats de simulation montrent bien que la caractéristique I (V) de module PV est non linéaire.

Comparant avec les caractéristiques données par le constructeur, nous déduisons un bon accord entre les caractéristiques déduites par simulation sous Simulink. Pour chacune de différentes caractéristiques, correspond une puissance que pourrait fournir le panneau. Notons aussi la légère diminution de la tension du circuit ouvert suite à la diminution du flux lumineux. Aussi nous remarquons que le courant est directement proportionnel à l'irradiation à ces niveaux d'éclairement.

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules PV. La figure 4.3 décrit le comportement du module sous un éclairement fixe de 100W/m<sup>2</sup>, et à des températures comprises entre 15°C et 55°C. Nous remarquons que le courant augmente avec la température; par contre la tension de circuit-ouvert diminue. Ceci entraîne une diminution de la puissance maximale disponible.

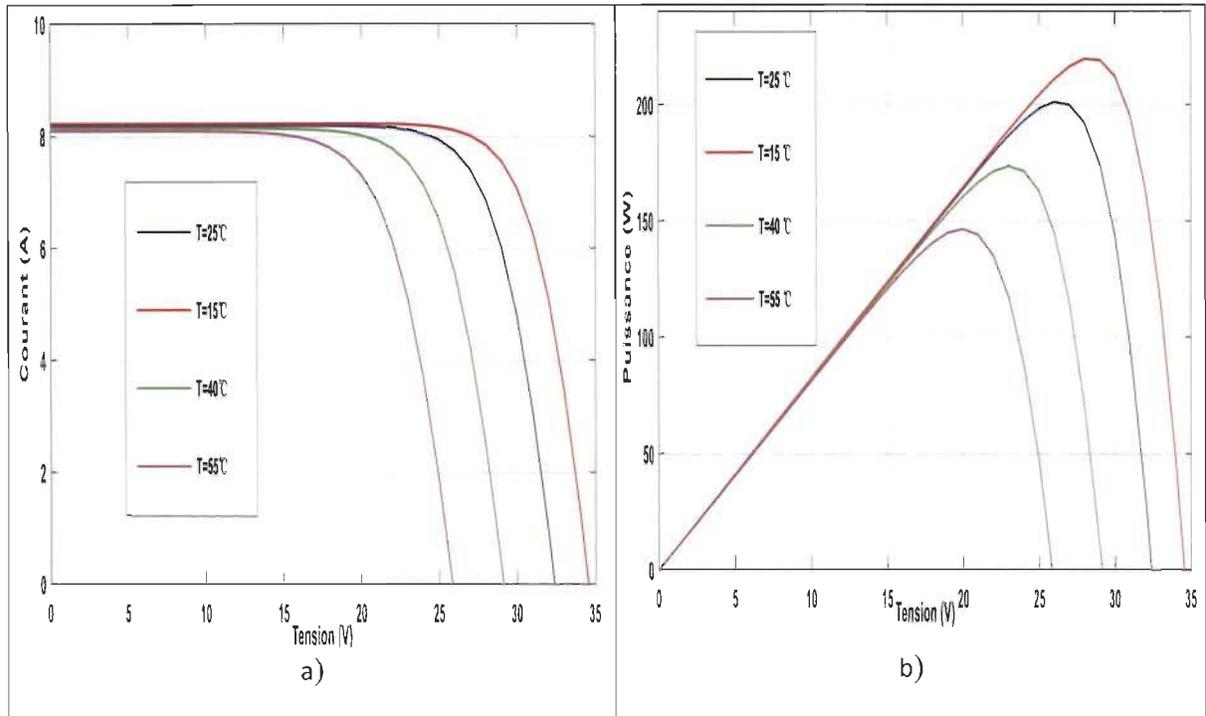


Figure 4.3 a) Caractéristique  $I(V)$  et b) caractéristique  $P(V)$  d'un module PV pour différentes valeurs de température

## 4.2 Modélisation et simulation de structures d'onduleurs triphasés

### 4.2.1 Modèle d'onduleur NPC 3-niveaux développé

Nous avons développé un modèle d'onduleur NPC à trois niveaux dans l'environnement Matlab/Simulink/SimPowerSystems comme le montre la figure 4.4.

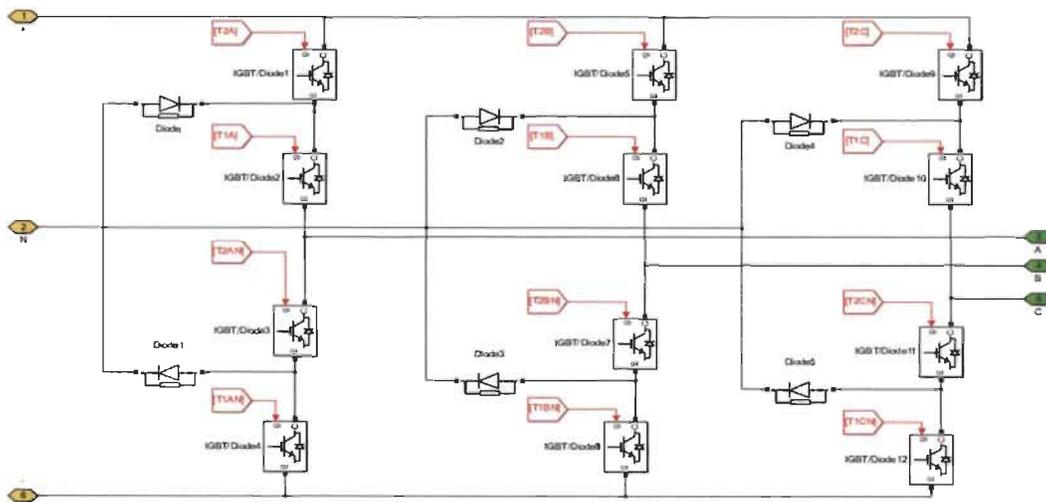


Figure 4.4 Modèle développé d'onduleur NPC 3-niveaux

### 4.2.2 Modèle d'onduleur FC 3-niveaux développé

Nous avons développé un modèle d'onduleur FC à trois niveaux dans l'environnement Matlab/Simulink/SimPowerSystems comme le montre la figure 4.5.

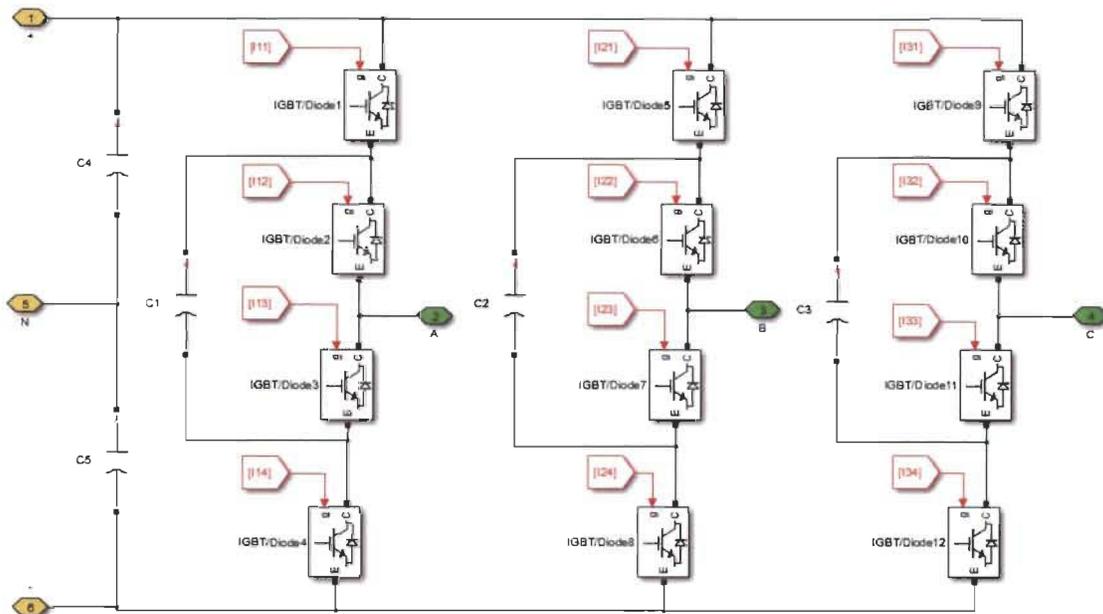


Figure 4.5 Modèle développé d'onduleur FC à trois niveaux

#### 4.2.3 Modèle d'onduleur CHB 3-niveaux développé

Nous avons développé un modèle d'onduleur FC à trois niveaux dans l'environnement Matlab/Simulink/SimPowerSystems comme le montre la figure 4.6.

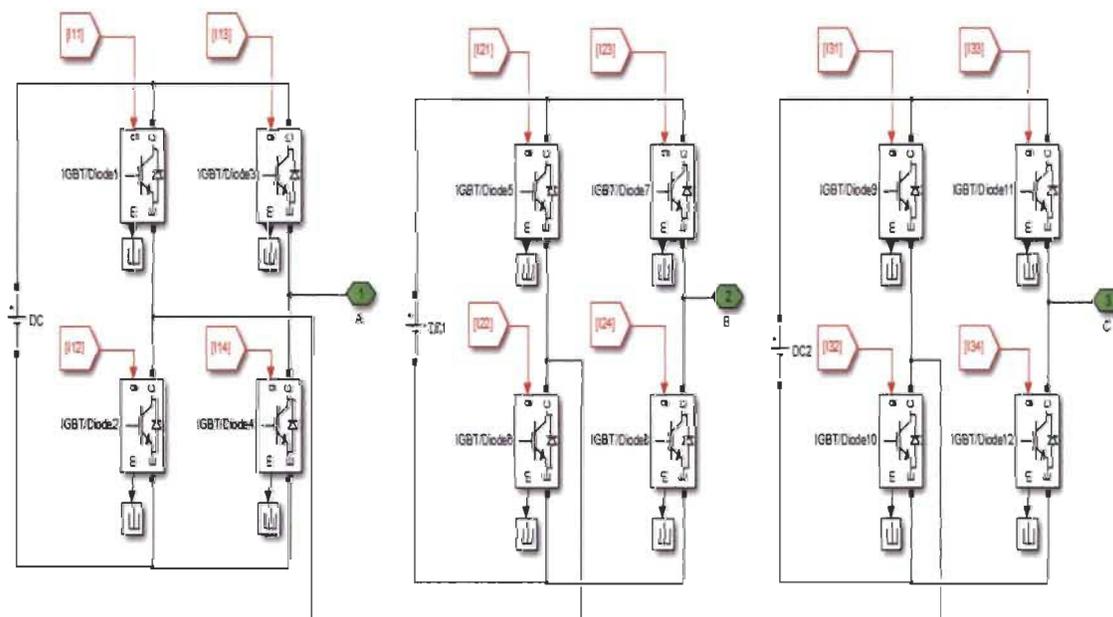


Figure 4.6 Modèle développé d'onduleur CHB à trois niveaux

#### 4.2.4 Analyse comparative des formes d'ondes obtenues en simulation pour les trois modèles d'onduleur à 3-niveaux

Nous proposons dans cette partie, une analyse comparative des résultats de simulation obtenues des trois modèles d'onduleur étudiés.

La méthode de commande MLI sinusoïdale de type PD sera utilisée pour la commande des interrupteurs. La commande sera en boucle ouverte, pour un indice de modulation de 1 et 2000 Hz comme fréquence de porteuse.

Les sources continues utilisées valent pour les trois modèles 200V, nous avons aussi pris comme charge, une résistance en série avec une inductance de valeurs respectives  $R = 10\Omega$  et  $L = 50\text{mH}$ .

##### a) L'onduleur NPC triphasé à trois niveaux

La figure 4.7 montre les signaux de la tension entre la phase a et le neutre n ( $V_{an}$ ), des courants de ligne ( $I_a$ ,  $I_b$  et  $I_c$ ) et de la tension entre la phase a et la phase b ( $V_{ab}$ ) obtenus à la sortie de l'onduleur NPC triphasé à trois niveaux.

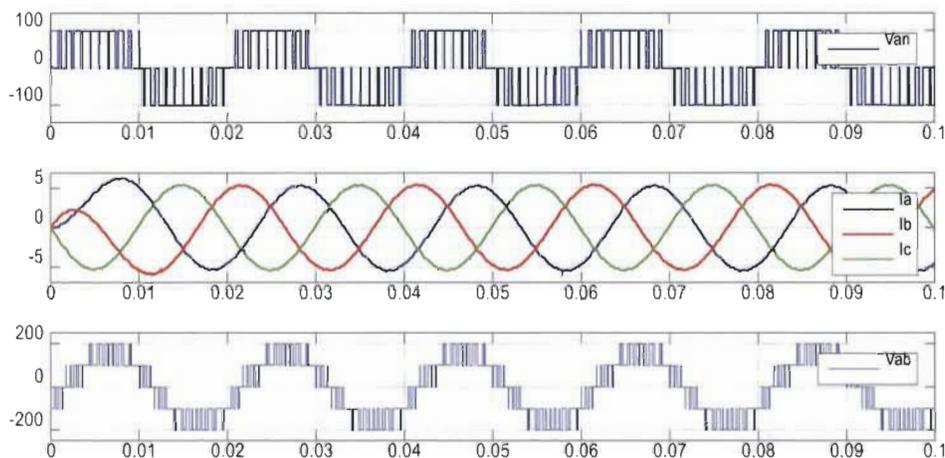


Figure 4.7 Forme des signaux de l'onduleur NPC 3-niveaux

Les figures 4.8, 4.9 et 4.10 montrent respectivement les spectres harmoniques des signaux des tensions  $V_{an}$  et  $V_{ab}$  et du courant  $I_a$ . Le spectre harmonique des signaux obtenus montre que les harmoniques sont repoussées aux hautes fréquences. Ce qui facilitera le filtrage au besoin.

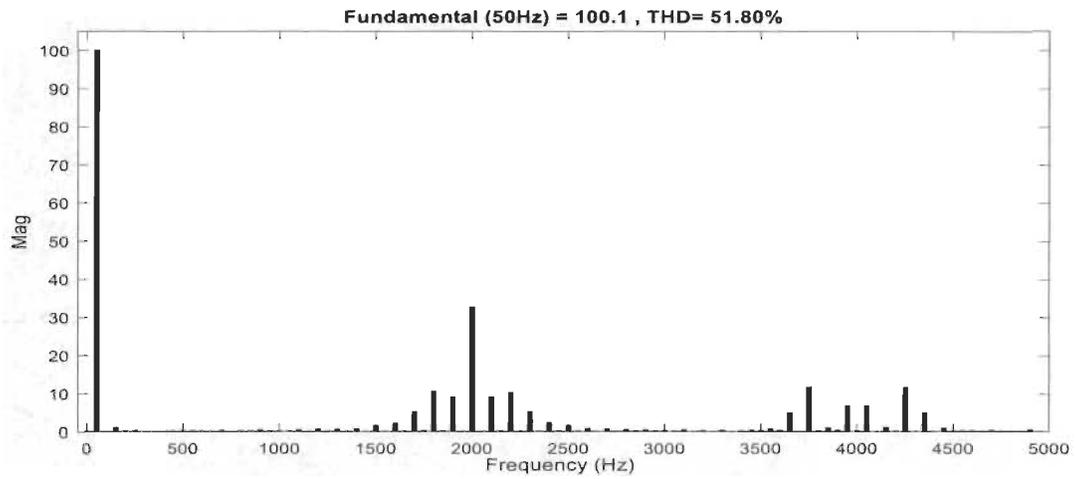


Figure 4.8 Spectre harmonique de la tension  $V_{ua}$  de NPC 3-niveaux

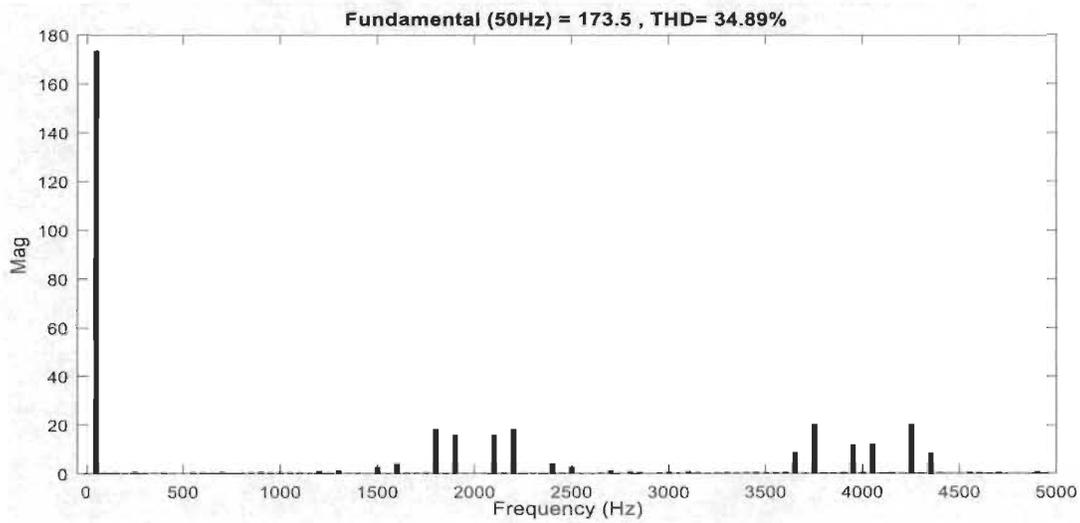


Figure 4.9 Spectre harmonique de la tension  $V_{ub}$  de NPC 3-niveaux

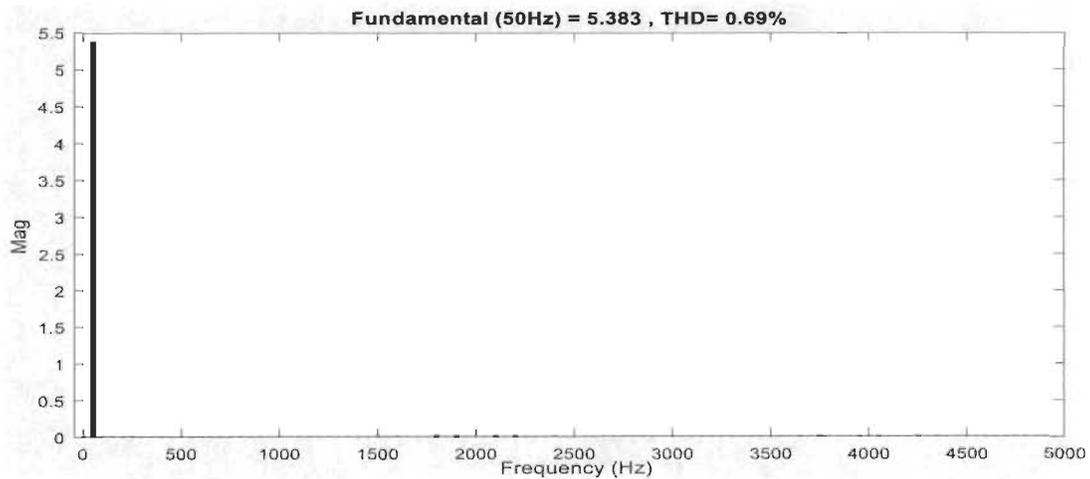


Figure 4.10 Spectre harmonique du courant de charge NPC 3-niveaux

b) Onduleur CHB triphasé à trois niveaux

La figure 4.11 présente les signaux de la tension entre la phase a et le neutre n ( $V_{an}$ ), des courants de ligne ( $I_a$ ,  $I_b$  et  $I_c$ ) et de la tension entre la phase a et la phase b ( $V_{ab}$ ) obtenus à la sortie de l'onduleur cascade en pont H triphasé à trois niveaux.

Les figures 4.12, 4.13 et 4.14 montrent respectivement les spectres harmoniques des signaux des tensions  $V_{an}$  et  $V_{ab}$  et du courant  $I_a$ .

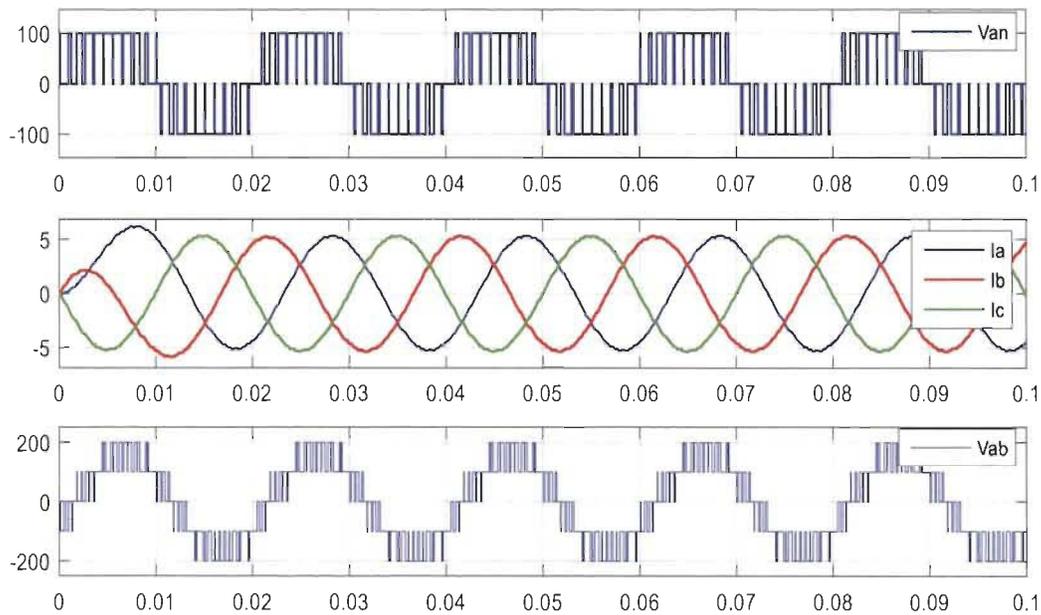


Figure 4.11 Forme des signaux de l'onduleur CHB 3-niveaux

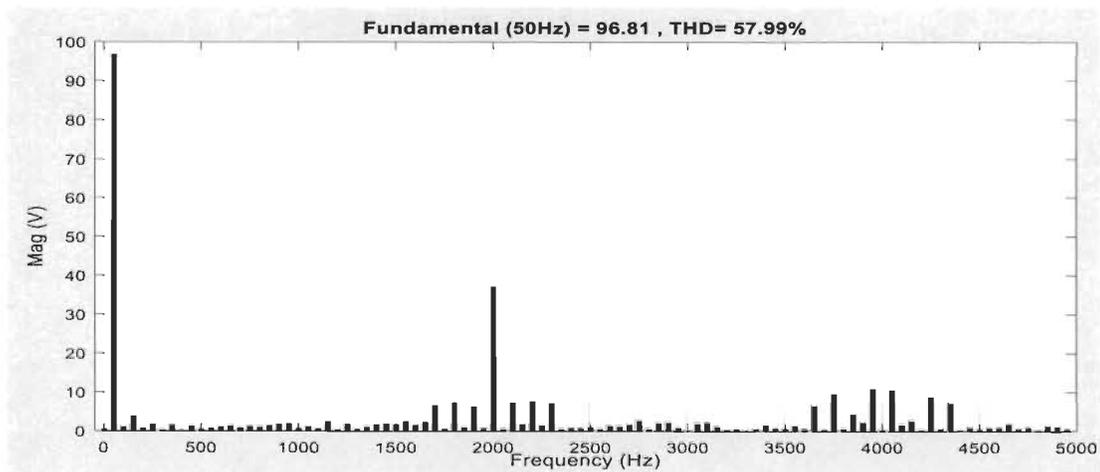


Figure 4.12 : Spectre harmonique du la tension  $V_{an}$  de CHB 3-niveaux

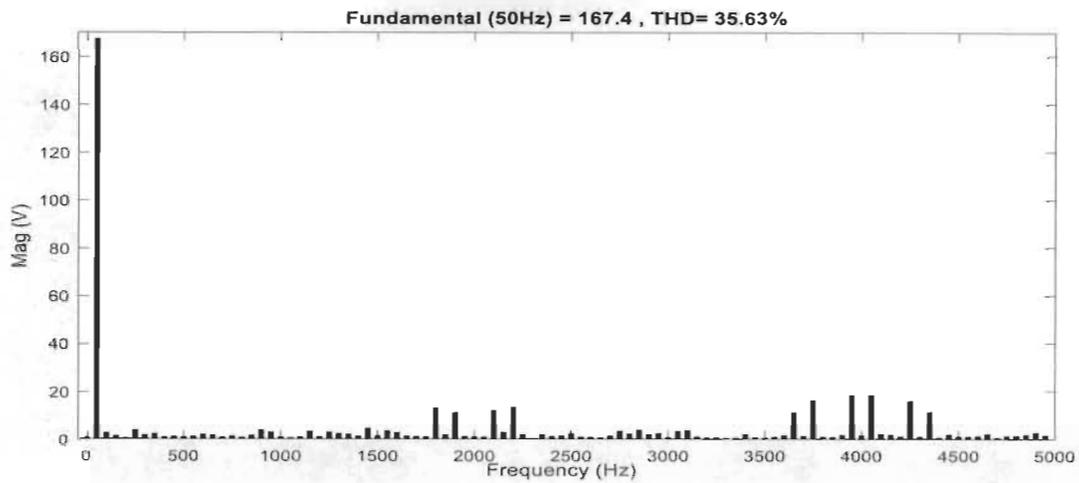


Figure 4.13 : Spectre harmonique de la tension  $V_{ab}$  de CHB 3-niveaux

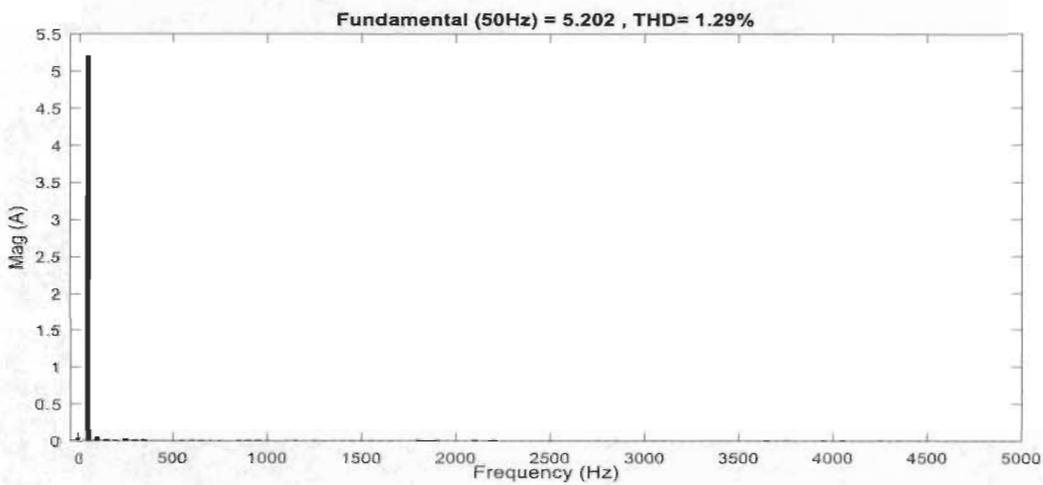


Figure 4.14 : Spectre harmonique du courant de charge de CHB 3-niveaux

c) L'onduleur FC triphasé à trois niveaux

La figure 4.15 présente les signaux de la tension entre la phase a et le neutre n ( $V_{an}$ ), des courants de ligne ( $I_a$ ,  $I_b$  et  $I_c$ ) et de la tension entre la phase a et la phase b ( $V_{ab}$ ) obtenus à la sortie de l'onduleur FC triphasé à trois niveaux.

Les figures 4.16, 4.17 et 4.18 montrent respectivement les spectres harmoniques des signaux des tensions  $V_{an}$  et  $V_{ab}$  et du courant  $I_a$ .

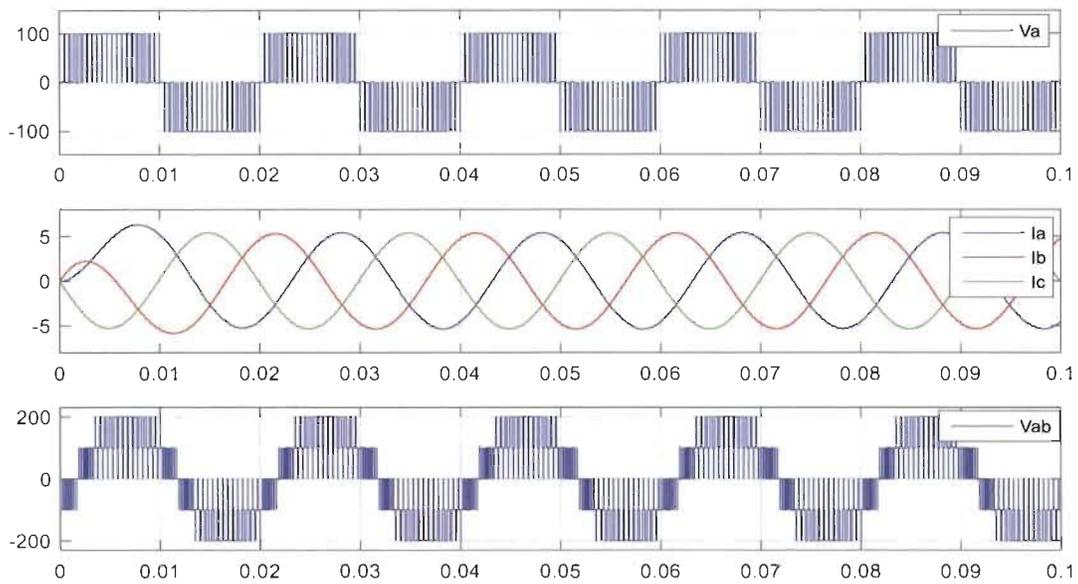


Figure 4.15 Forme des signaux de l'onduleur FC 3-niveaux

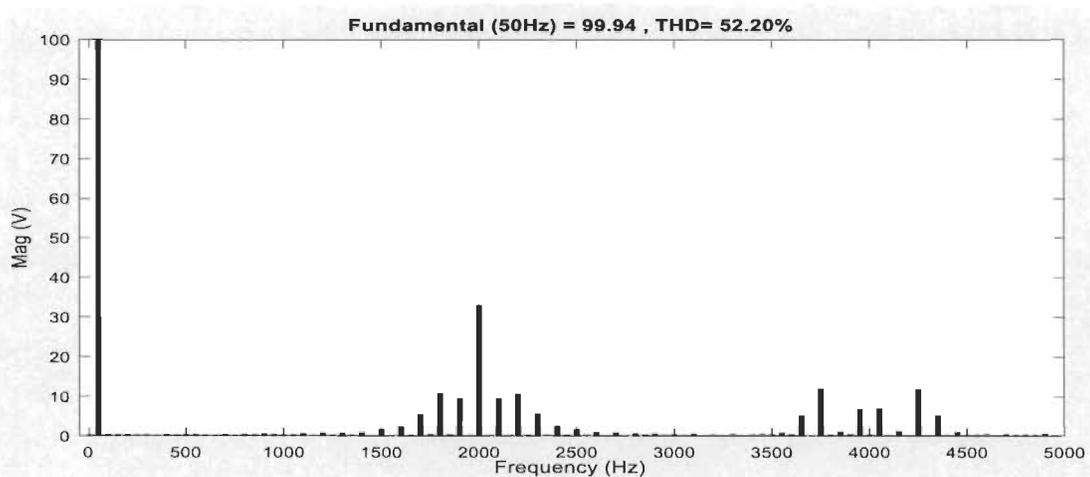


Figure 4.16 : Spectre harmonique de la tension  $V_{an}$  de FC 3-niveaux

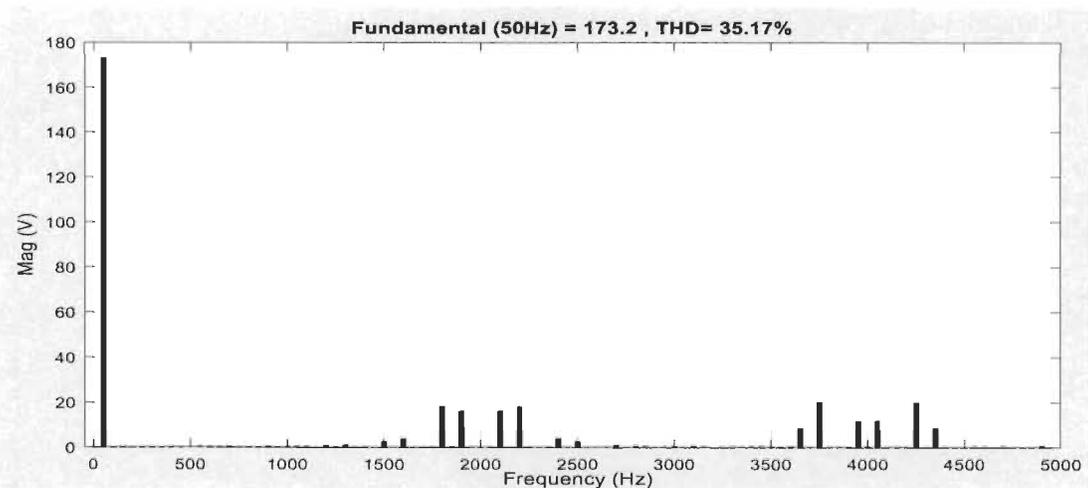


Figure 4.17 : Spectre harmonique la tension  $V_{ab}$  de FC 3-niveaux

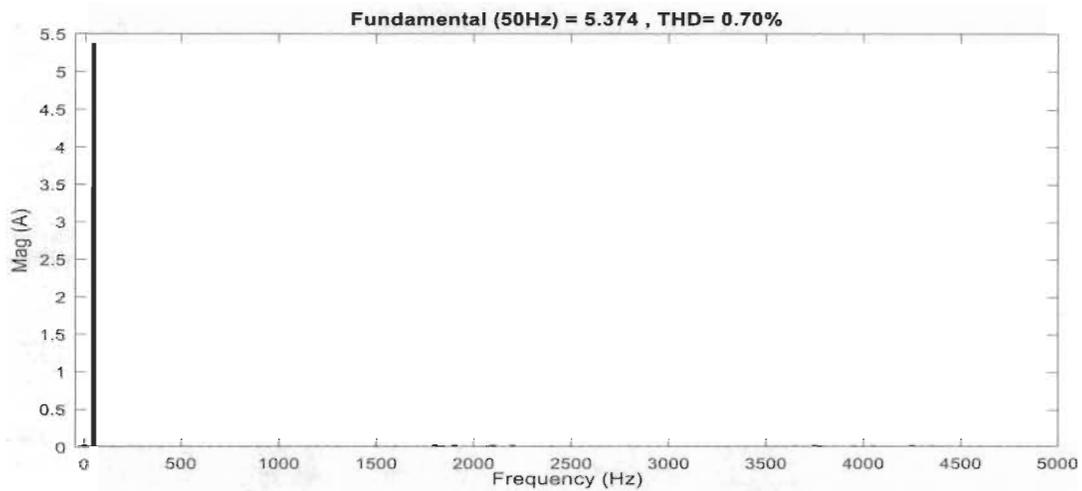


Figure 4.18 : Spectre harmonique du courant  $I_a$  de FC 3-niveaux

**Commentaire:** Nous remarquons, dans les trois cas d'onduleur, que les courbes obtenues correspondent bien à celles théoriques. Pour la tension simple  $V_{an}$ , nous avons les trois niveaux de tensions  $+E$ ,  $0$  et  $-E$  comme mentionné dans la partie théorique. Le spectre harmonique des signaux montre que les harmoniques sont repoussées aux hautes fréquences et les harmoniques d'ordre la fréquence et multiple de la fréquence de la modulante sont nulles. Ce qui facilitera le filtrage au besoin.

Les résultats de simulation sont présentés dans le tableau 4.2, et les formes d'onde et spectres des signaux, obtenus de la figure 4.7 à la figure 4.18.

**Commentaires :** Nous remarquons à partir du tableau 4.2, que les trois onduleurs donnent des valeurs de tension de sortie presque identiques, aussi les valeurs des courants de ligne sont identiques. Mais le TDH de la tension (34.89%) est meilleur pour le cas NPC. Mais par contre du point de vue composants utilisés, l'onduleur cascade en pont H est plus intéressant.

Tableau 4.2: Comparaison des résultats de simulation des trois types d'onduleurs 3  
niveau

<b>Topologies</b>	<b>NPC</b>	<b>FC</b>	<b>CHB</b>
Nombre d'interrupteurs	4 par phase	4 par phase	4 par phase
Diodes de maintien	2 par phase	0 par phase	0 par phase
Condensateurs d'équilibrage	0 par phase	1 par phase	0 par phase
Valeur crête de la composante fondamentale de la tension simple $V_{an}$ (V)	100.1	99.94	96.81
TDH de tension $V_{an}$ (%)	51.8	52	57.99
Valeur crête de la composante fondamentale de la tension composée $V_{ab}$ (V)	173.5	173.2	167.4
TDH du courant (%)	34.89	35.17	35.63
Valeur crête de la composante fondamentale du courant (A)	5.383	5.374	5.202
TDH du courant (%)	0.69	0.7	1.29

#### **4.2.5 Analyse comparative des formes d'ondes obtenues en simulation pour les trois modèles d'onduleur à 5-niveaux**

Nous allons faire la même étude que pour les onduleurs à trois niveaux de tension.

Les mêmes conditions sont utilisées pour faciliter la comparaison des différentes structures étudiées.

La méthode de commande MLI de type PD sera utilisée pour la commande des interrupteurs. La commande sera en boucle ouverte, pour un indice de modulation de 1 et 2000 Hz comme fréquence de porteuse.

Les sources continues utilisées valent pour les trois modèles 200V, nous avons aussi pris comme charge, une résistance en série avec une inductance de valeurs respectives  $R = 10\Omega$  et  $L = 50\text{mH}$ .

a) L'onduleur NPC triphasé à cinq niveaux

La figure 4.19 montre les signaux de la tension entre la phase a et le neutre n ( $V_{an}$ ), des courants de ligne ( $I_a$ ,  $I_b$  et  $I_c$ ) et de la tension entre la phase a et la phase b ( $V_{ab}$ ) obtenus à la sortie de l'onduleur NPC triphasé à cinq niveaux.

Les figures 4.19, 4.20 et 4.21 montrent respectivement les spectres harmoniques des signaux des tensions  $V_{an}$  et  $V_{ab}$  et du courant  $I_a$ .

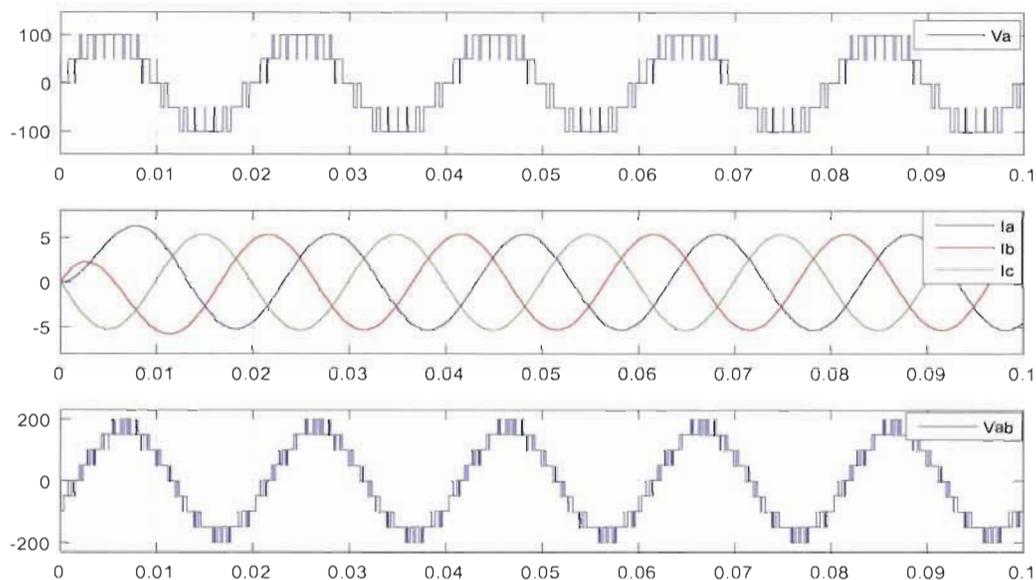


Figure 4.19 Forme des signaux de l'onduleur NPC 5-niveaux

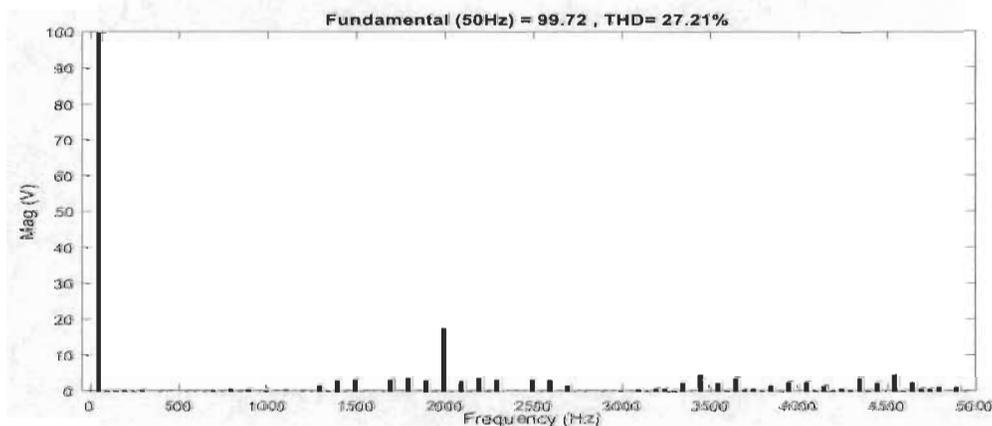


Figure 4.20 Spectre harmonique de la tension  $V_{an}$  de NPC 5-niveaux

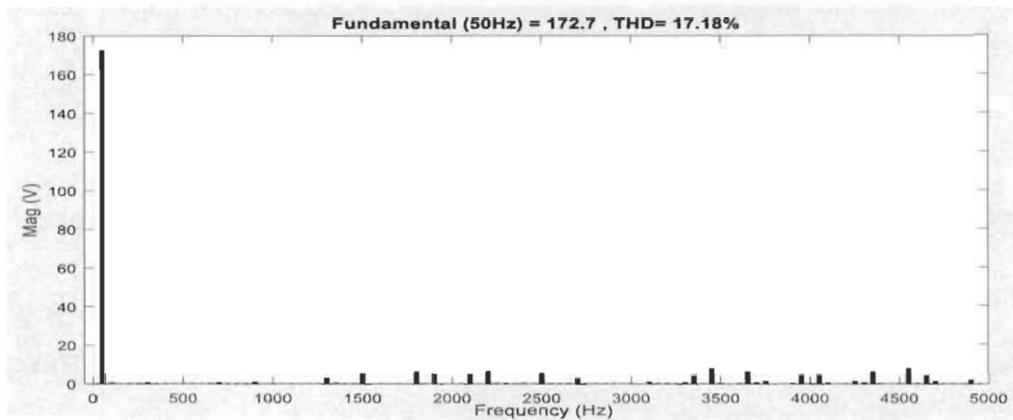


Figure 4.21 Spectre harmonique de la tension  $V_{ub}$  de NPC 5-niveaux

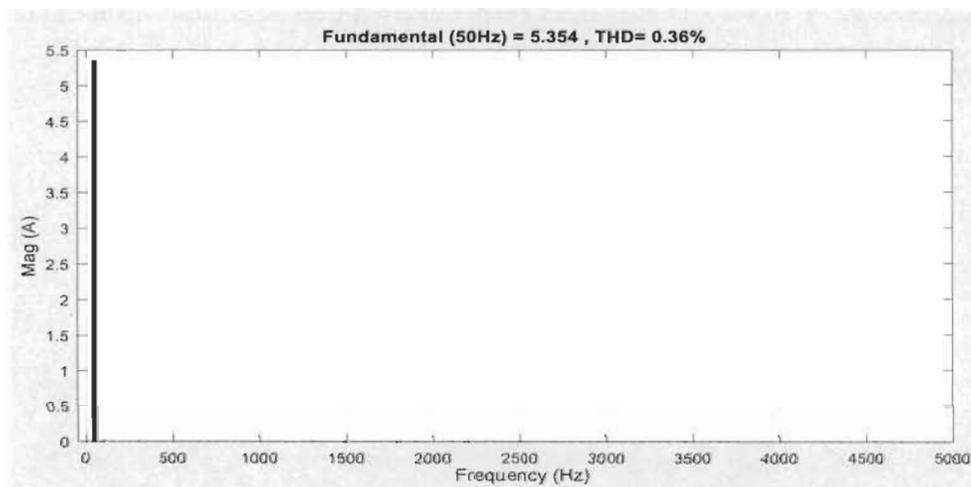


Figure 4.22 Spectre harmonique du courant  $I_a$  de NPC 5-niveaux

b) L'onduleur cascade en pont H triphasé à cinq niveaux

La figure 4.23 présente les signaux de la tension entre la phase a et le neutre n ( $V_{an}$ ), des courants de ligne ( $I_a$ ,  $I_b$  et  $I_c$ ) et de la tension entre la phase a et la phase b ( $V_{ab}$ ) obtenus à la sortie de l'onduleur cascade en pont H triphasé à cinq niveaux.

Les figures 4.24, 4.25 et 4.26 montrent respectivement les spectres harmoniques des signaux des tensions  $V_{an}$  et  $V_{ab}$  et du courant  $I_a$ .

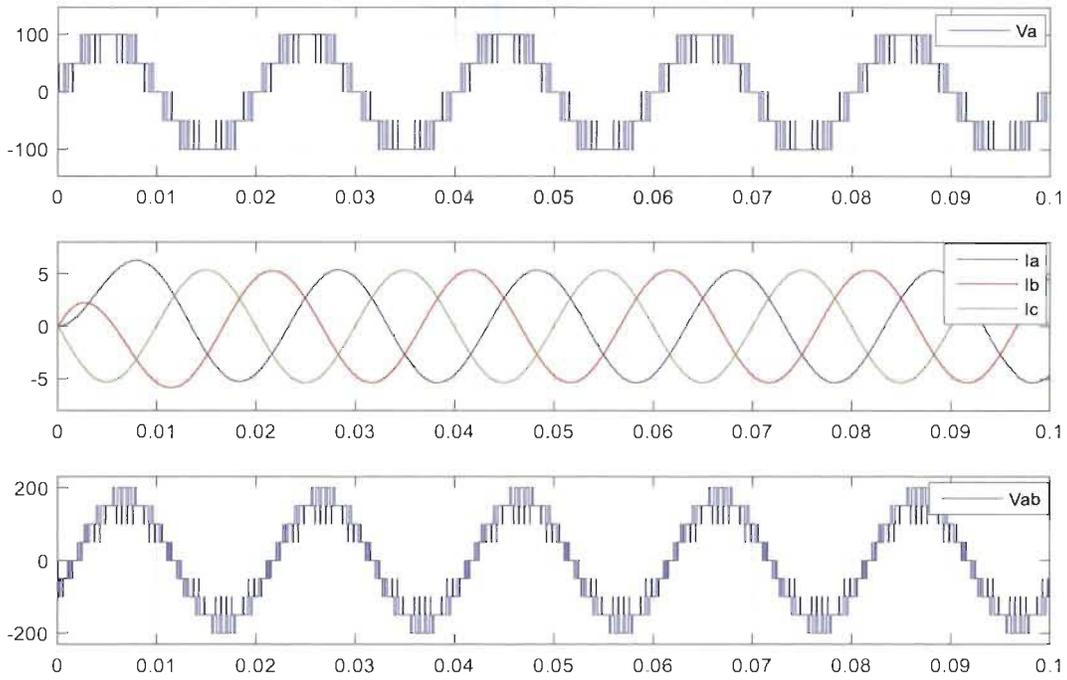


Figure 4.23 Forme des signaux de l'onduleur CHB 5-niveaux

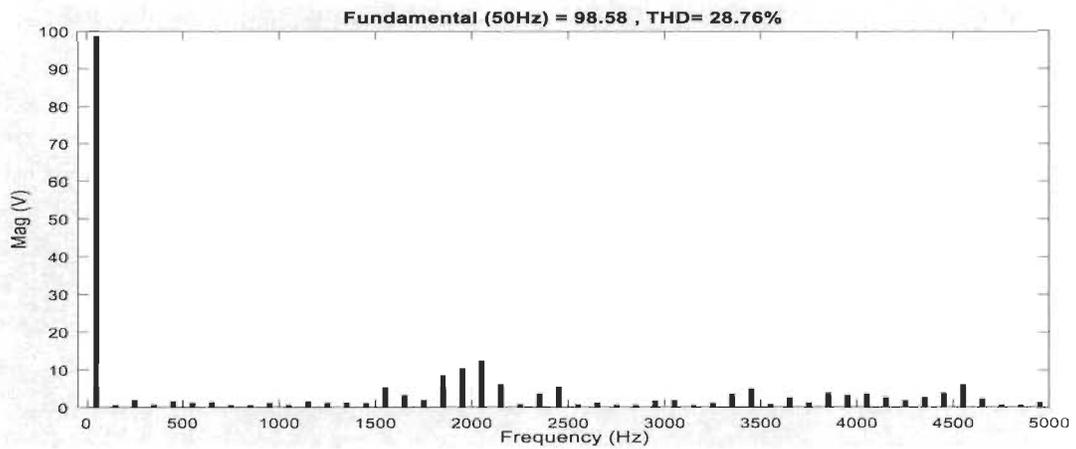


Figure 4.24 : Spectre harmonique de la tension  $V_{an}$  de CHB 3-niveaux

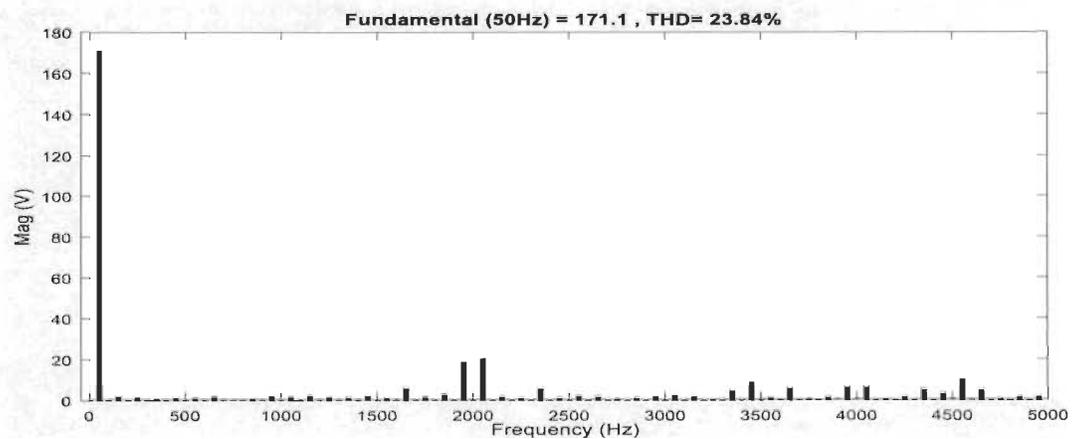


Figure 4.25 : Spectre harmonique de la tension  $V_{ab}$  de CHB 5-niveaux

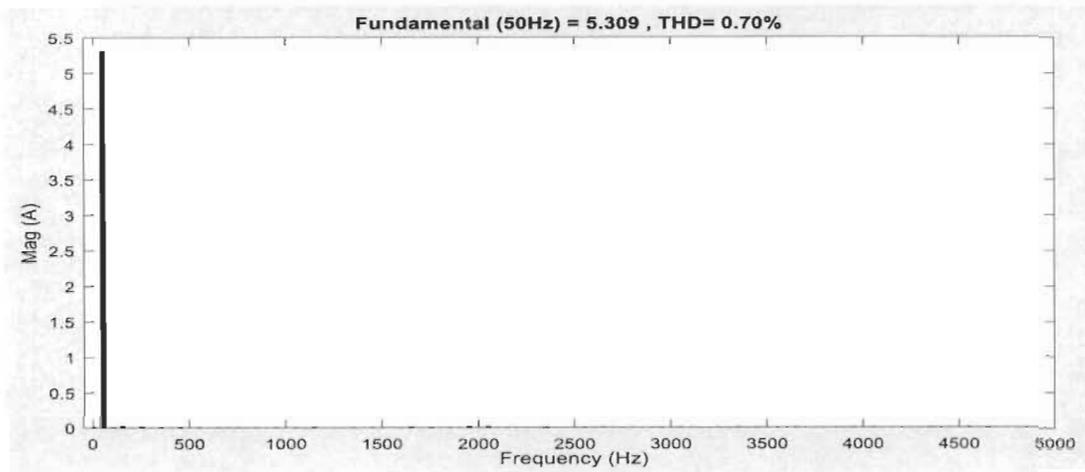


Figure 4.26 : Spectre harmonique du courant de charge de CHB 5-niveaux

c) L'onduleur FC triphasé à cinq niveaux

La figure 4.27 présente les signaux de la tension entre la phase a et le neutre n ( $V_{an}$ ), des courants de ligne ( $I_a$ ,  $I_b$  et  $I_c$ ) et de la tension entre la phase a et la phase b ( $V_{ab}$ ) obtenus à la sortie de l'onduleur FC triphasé à cinq niveaux.

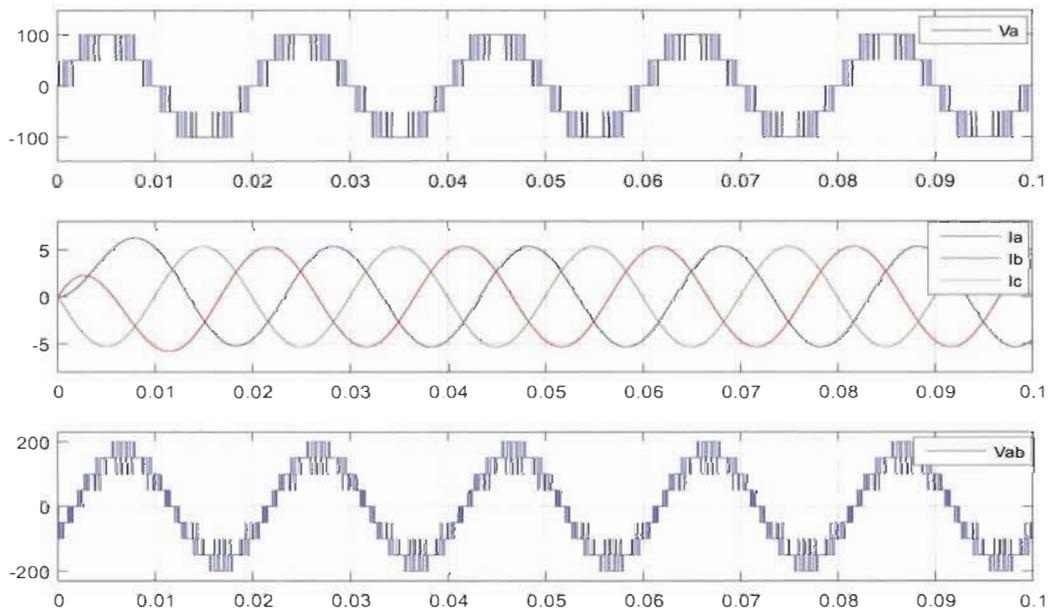


Figure 4.27 : Forme des signaux de l'onduleur FC 5-niveaux

Les figures 4.28, 4.29 et 4.30 montrent respectivement les spectres harmoniques des signaux des tensions  $V_{an}$  et  $V_{ab}$  et du courant  $I_a$ .

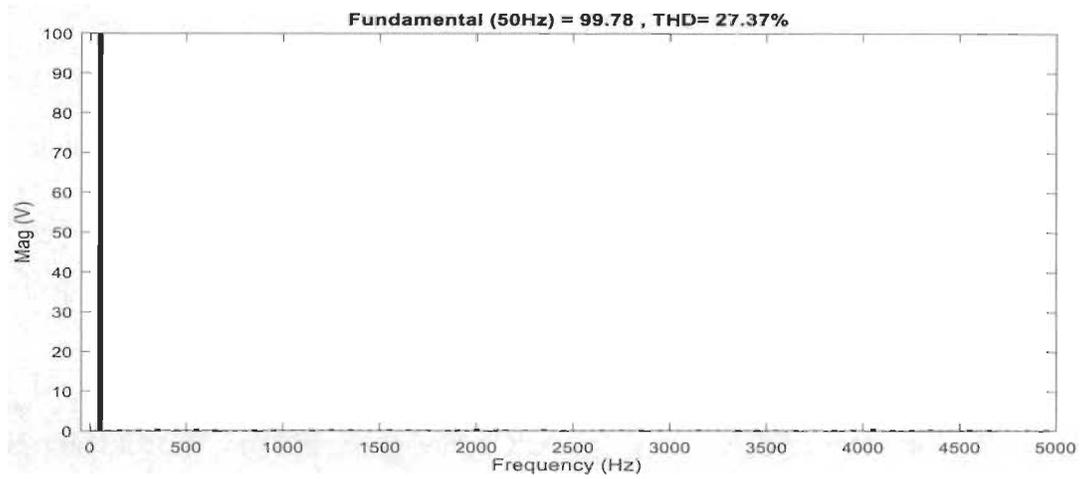


Figure 4.28 : Spectre harmonique de la tension  $V_{an}$  de FC 5-niveaux

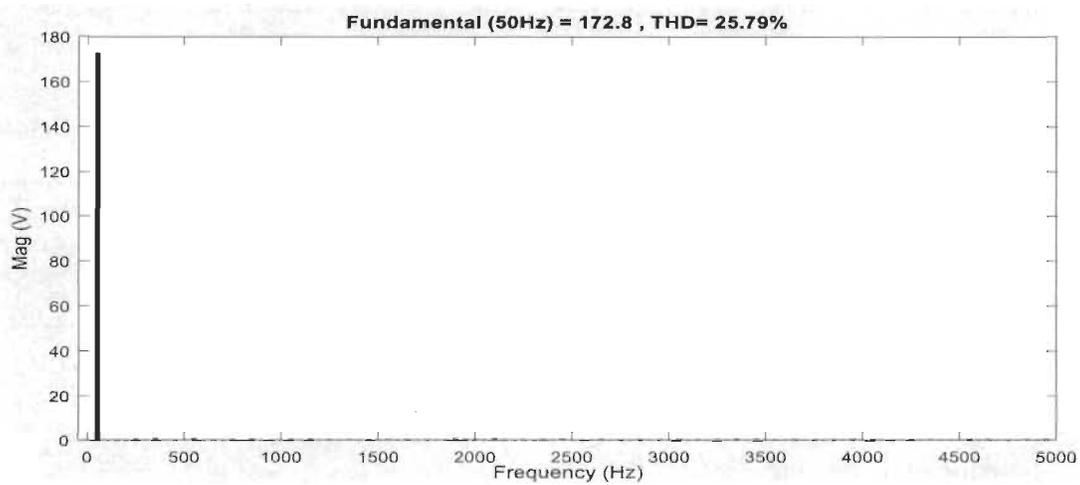


Figure 4.29 : Spectre harmonique la tension  $V_{ab}$  de FC 5-niveaux

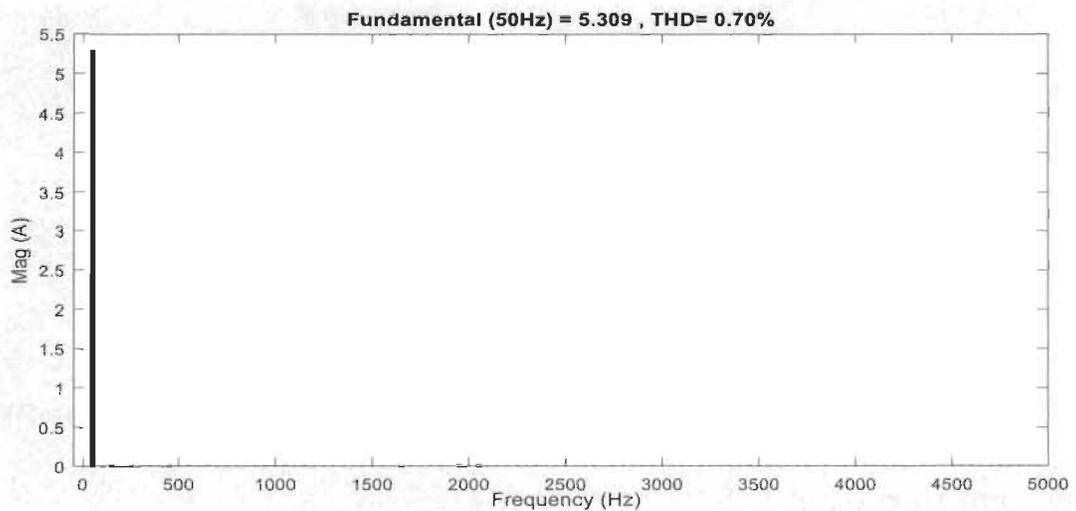


Figure 4.30 : Spectre harmonique du courant  $I_a$  de FC 5-niveaux

**Commentaire:** Pour la tension simple  $V_{an}$ , nous avons les cinq niveaux de tensions  $+2E$ ,  $+E$ ,  $0$ ,  $-E$  et  $-2E$ . Pour la tension composée  $V_{ab}$  qui a neuf niveaux de tensions. Les onduleurs 5-niveaux ont le meilleur TDH et performance par rapport aux celles 3-niveaux.

Les résultats de simulation sont présentés dans le tableau 4.3, et les formes d'onde et spectres des signaux, obtenus à la figure 4.19 et à la figure 4.30.

Tableau 4.3 Comparaison des résultats de simulation des trois types d'onduleur 5-niveaux

<b>Topologies</b>	<b>NPC</b>	<b>FC</b>	<b>Cascade H</b>
Nombre d'interrupteurs	8 par phase	8 par phase	8 par phase
Diodes de maintien	6 par phase	0 par phase	0 par phase
Condensateurs d'équilibrage	0 par phase	6 par phase	0 par phase
Valeur crête de la composante fondamentale de la tension simple $V_{an}$ (V)	99.72	99.78	98.58
TDH de la tension $V_{an}$ (%)	27.21	27.37	28.76
Valeur crête de la composante fondamentale de la tension composée $V_{ab}$ (V)	172.7	172.8	171.1
TDH de la tension $V_{ab}$ (%)	17.18	25.79	23.84
Valeur crête de la composante fondamentale du courant (A)	5.354	5.369	5.309
TDH du courant (%)	0.36	0.32	0.7

### 4.3 Simulation de l'onduleur multi-niveaux dans un système PV connecté au réseau

Dans cette partie on va entamer la simulation du système global constitué de la source PV, le hacheur survolteur et le convertisseur CC/CA et bien sûr une boucle de régulation pour assurer un fonctionnement adapté aux conditions du réseau. Dans cette étude on utilise un régulateur classique PI. Le schéma global de simulation sous MATLAB/Simulink est donné par la figure 4.31.

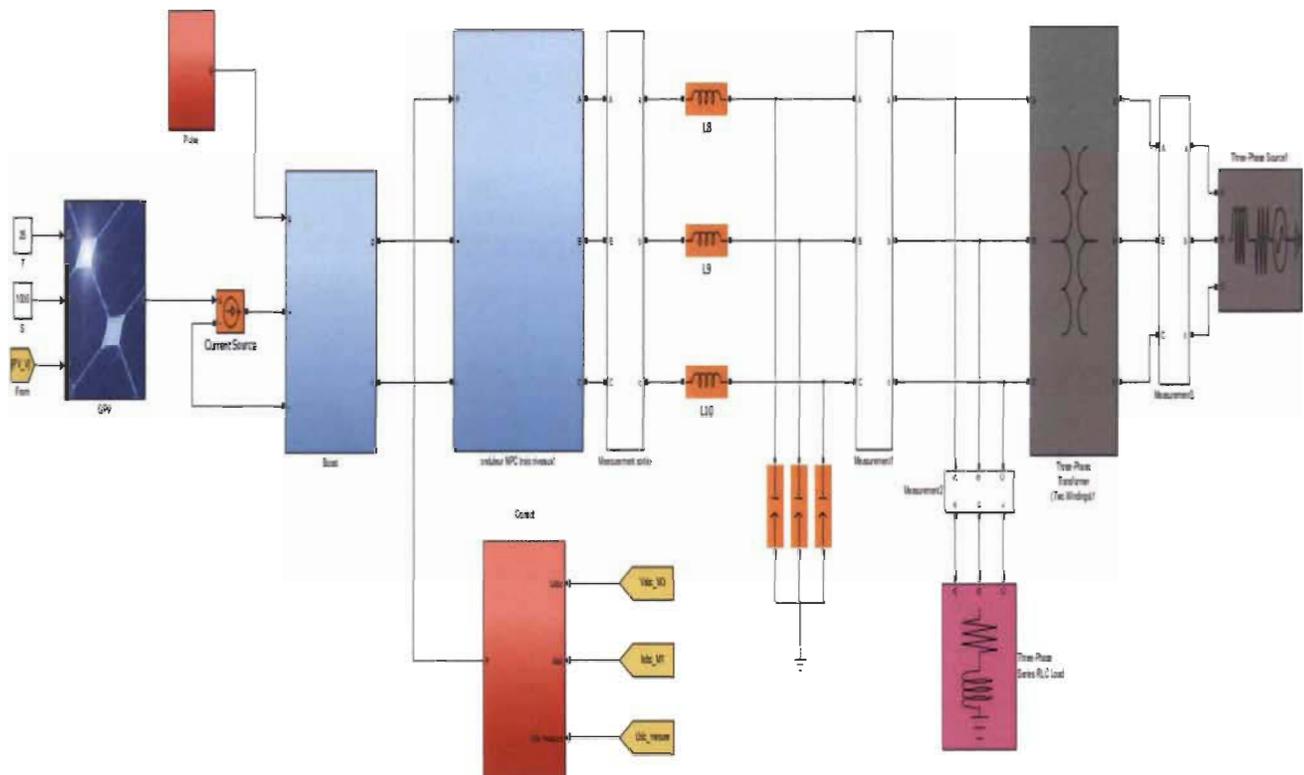


Figure 4.31 : Schéma de simulation global système PV connecté au réseau

### 4.3.1. Générateur photovoltaïque

Notre générateur est constitué de 750 modules PV, comme suit : 10 modules connectés en série, 75 modules connectés en parallèle dont on a étudié les performances précédemment (4.1). La puissance globale est de 150kW.

### 4.3.2 Convertisseur élévateur (Boost)

Le hacheur utilisé dans cette étude est celui élévateur (figure 4.32). Sous sa forme de base, il est constitué de composants clés qui sont l'inductance ( $L = 5\text{mH}$ ), le commutateur (transistor), la diode (D) et le condensateur ( $C = 50\text{mF}$ ).

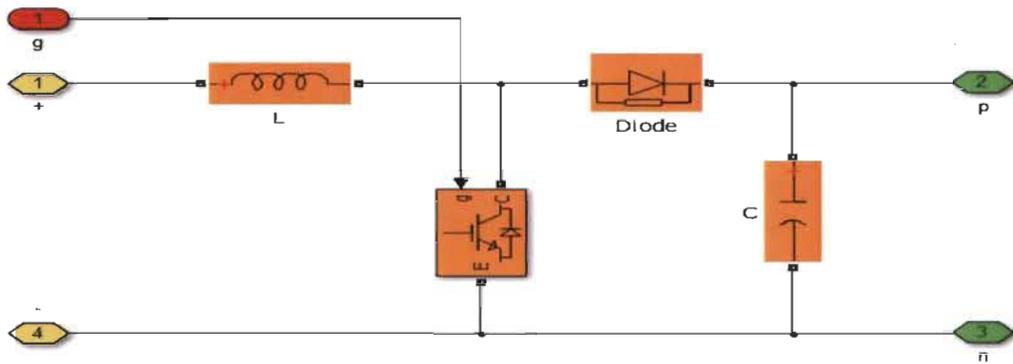


Figure 4.32 : Schéma du hacheur élévateur (Boost)

### 4.3.3 Convertisseur (CC-CA)

Le convertisseur utilisé dans ce cas est l'onduleur multi-niveaux de type NPC, FC et CHB à 3-niveaux et 5-niveaux, et la commande appliquée est celle sinusoïdale multi-triangulaire.

### 4.3.4 Filtre LC

Pour améliorer la qualité d'énergie injectée au réseau, un filtre basse pass s'avère nécessaire pour éliminer les harmoniques de découpage.

- $L = 5 \text{ mH}$
- $C = 200 \text{ } \mu\text{F}$

### 4.3.5 Réseau électrique en moyenne tension

On va utiliser un réseau moyenne tension de 20kV avec une fréquence de 50Hz raccordé à un transformateur (380V/20kV).

## 4.4 Résultats de simulation

Pour notre simulation, on fixe un ensoleillement à  $G = 1000 \text{ W/m}^2$  et une température à  $T = 25^\circ\text{C}$ .

### 4.4.1 Onduleur à 3-niveaux

#### a) Topologie NPC

La figure 4.33 présente les signaux de la tension composée entre la phase a et la phase b ( $V_{ab}$ ), des tensions composées ( $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$  et  $V_{ca}$ ) après le filtre et des courants de ligne

( $I_a$ ,  $I_b$  et  $I_c$ ) obtenus à la sortie de l'onduleur NPC triphasé à 3 niveaux.

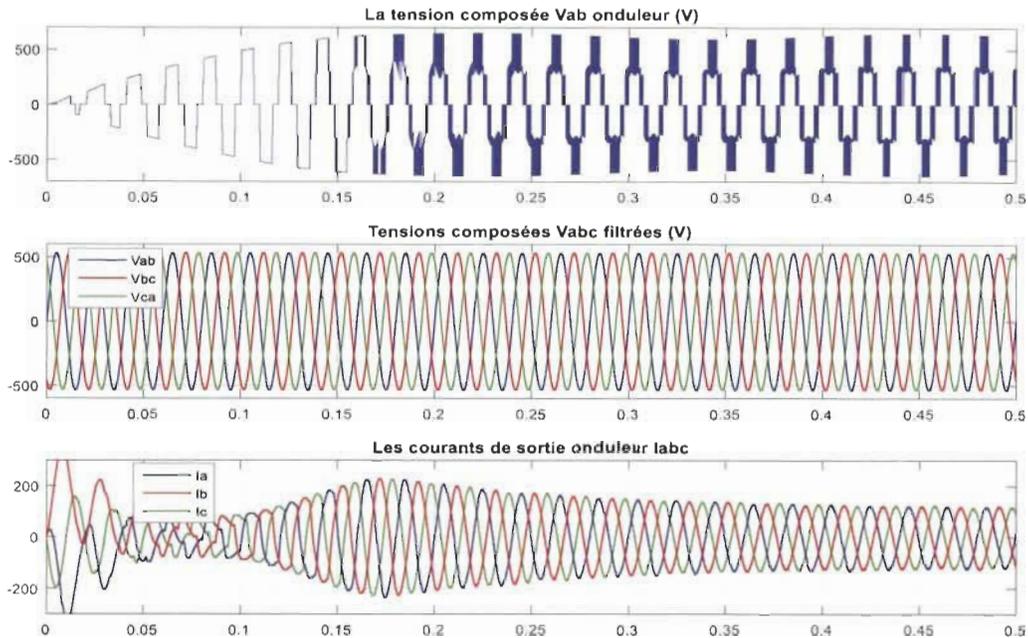


Figure 4.33 Forme des signaux de l'onduleur NPC 3-niveaux connecté au réseau

La figure 4.34 montre le courant du réseau (courbe bleue), le courant de sortie d'onduleur après le filtre (courbe rouge) et le courant de la charge (courbe verte) de phase a en régime stable qui commence à  $t=0.5s$ .

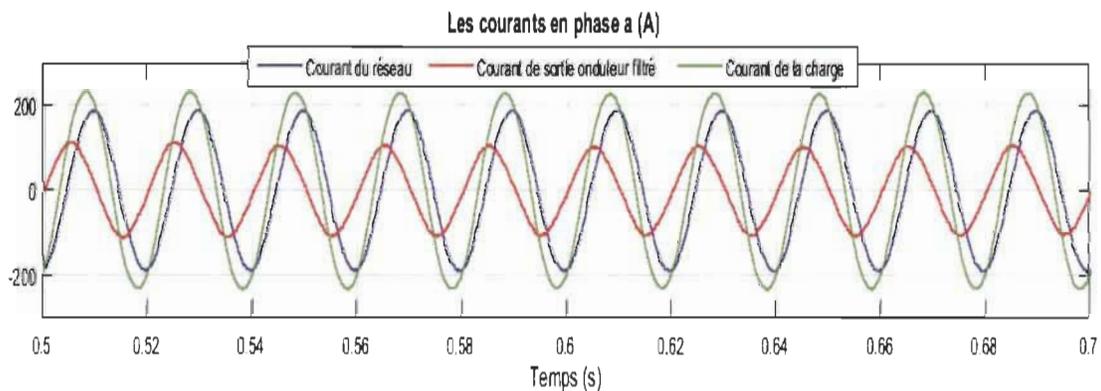


Figure 4.34 Forme des courants de NPC 3-niveaux

Les figures 4.35 a), b), c), d) montrent respectivement les spectres harmoniques des signaux de la tension composée  $V_{ab}$  de sortie d'onduleur, du courant de réseau, du courant de sortie d'onduleur et le courant de la charge (courbe verte) de phase a.

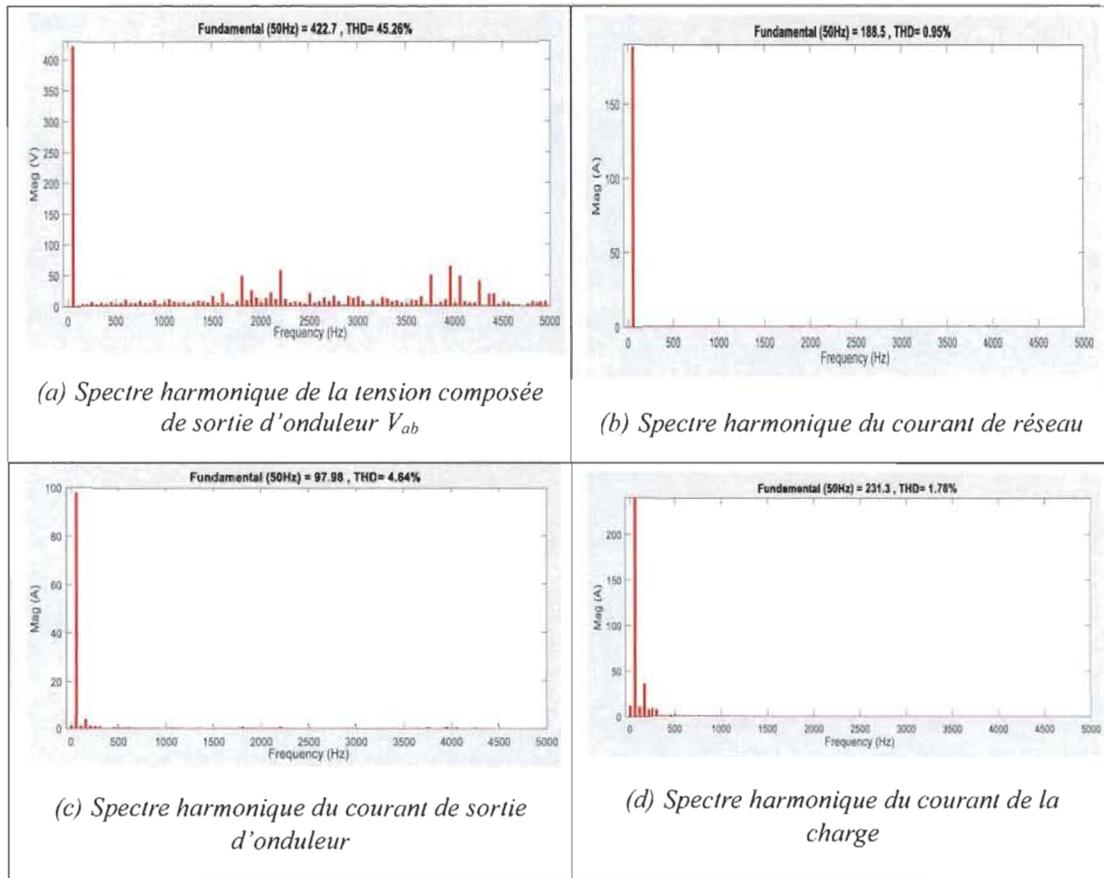


Figure 4.35 Spectres harmoniques des signaux de NPC 3-niveaux

## b) Topologie FC

La figure 4.36 présente les signaux de la tension composée entre la phase a et la phase b ( $V_{ab}$ ), des tensions composées ( $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$  et  $V_{ca}$ ) après le filtre et des courants de ligne ( $I_a$ ,  $I_b$  et  $I_c$ ) obtenus à la sortie de l'onduleur FC triphasé à 3 niveaux.

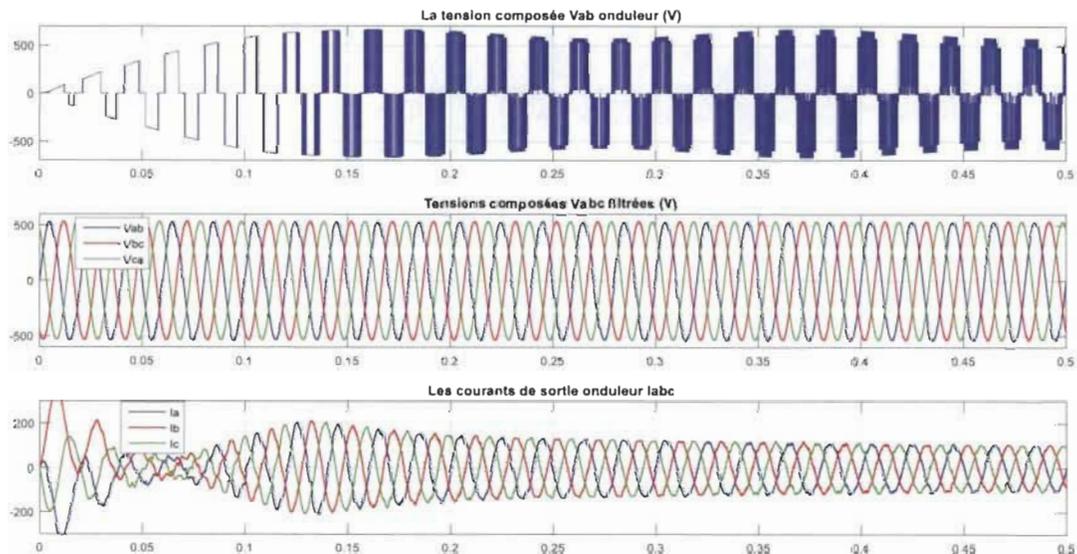


Figure 4.36 Forme des signaux de l'onduleur FC 3-niveaux connecté au réseau

La figure 4.37 montre le courant du réseau (courbe bleue), le courant de sortie d'onduleur après le filtre (courbe rouge) et le courant de la charge (courbe verte) de phase a en régime stable qui commence à  $t=0.7s$ .

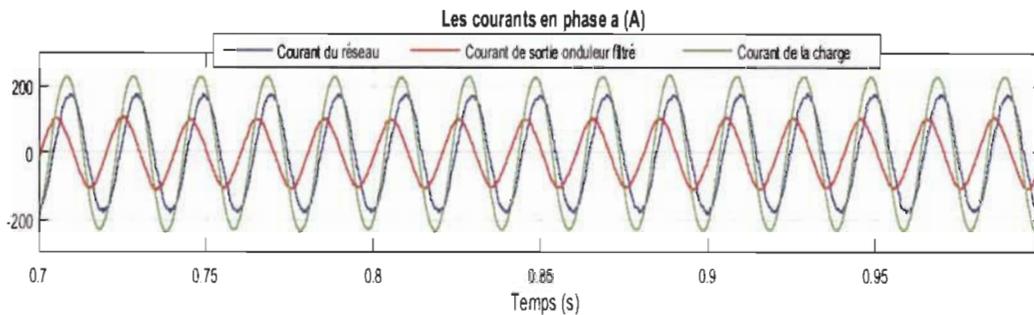


Figure 4.37 Forme des courants de FC 3-niveaux

Les figures 4.38 a), b), c), d) montrent respectivement les spectres harmoniques des signaux de la tension composée  $V_{ab}$  de sortie d'onduleur, du courant de réseau, du courant de sortie d'onduleur et le courant de la charge (courbe verte) de phase a.

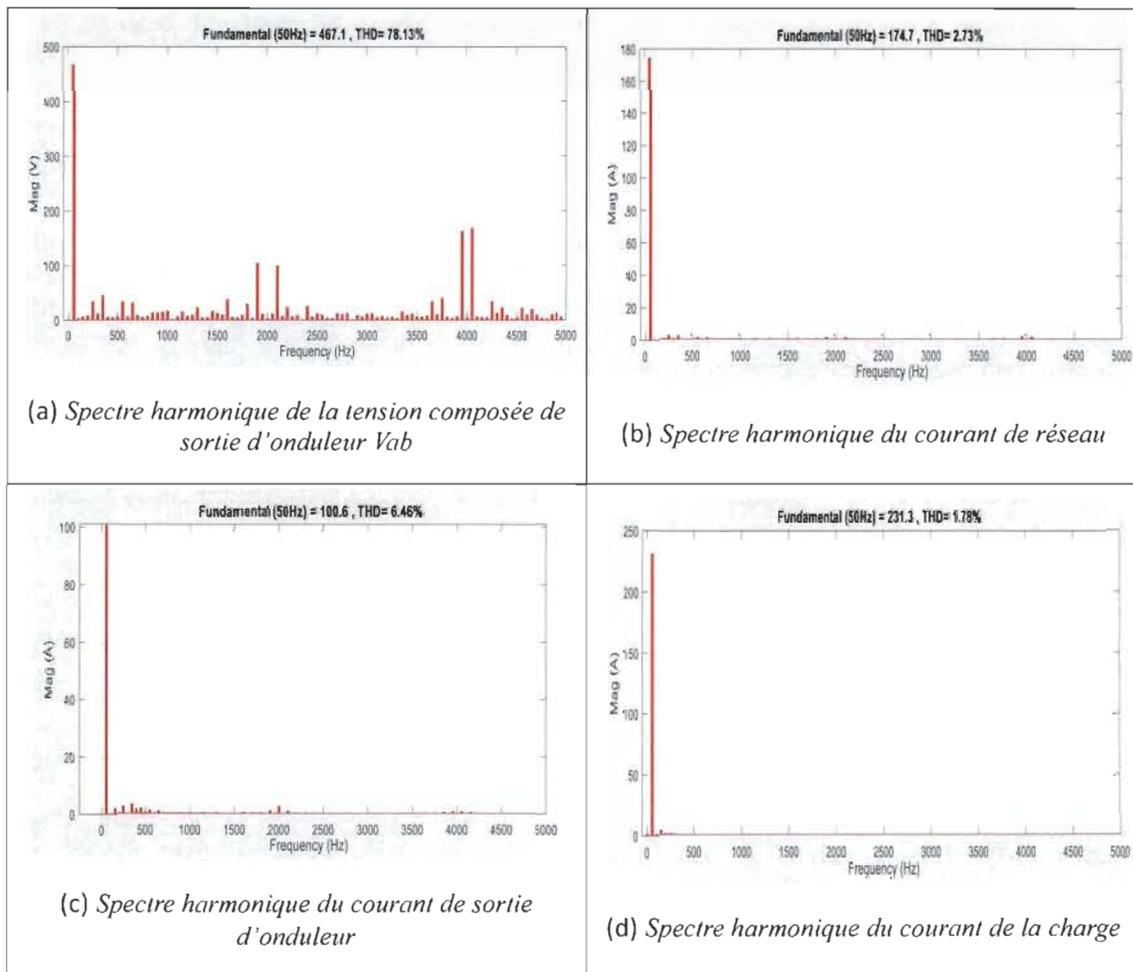


Figure 4.38 Spectres harmoniques des signaux de FC 3-niveaux

### c) Topologie CHB

La figure 4.39 présente les signaux de la tension composée entre la phase a et la phase b ( $V_{ab}$ ), des tensions composées ( $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$  et  $V_{ca}$ ) après le filtre et des courants de ligne ( $I_a$ ,  $I_b$  et  $I_c$ ) obtenus à la sortie de l'onduleur CHB triphasé à 3 niveaux.

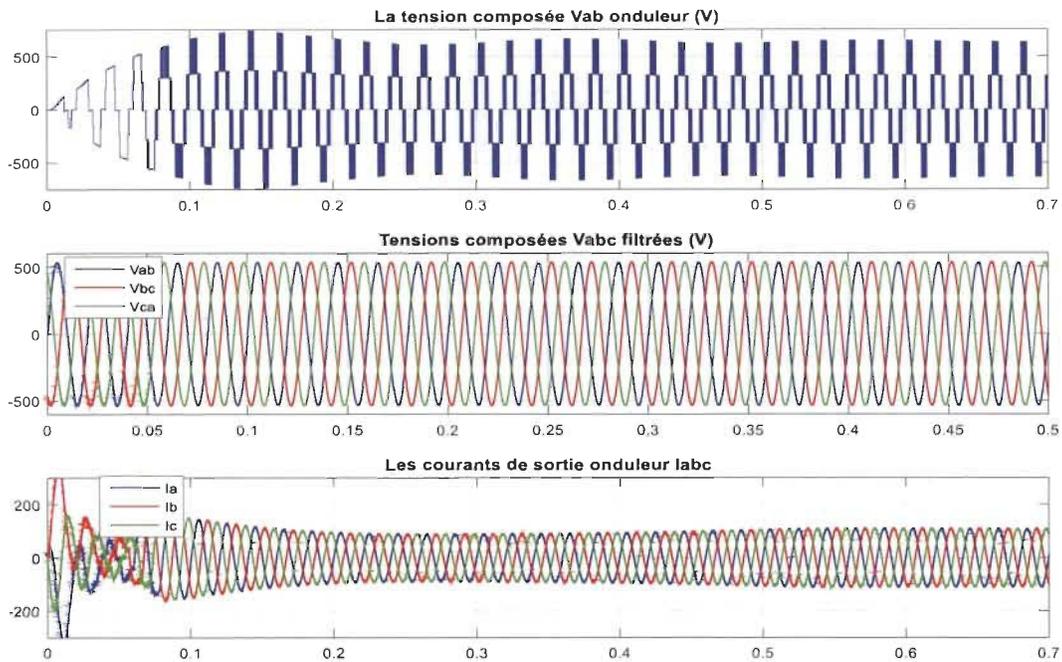


Figure 4.39 Forme des signaux de l'onduleur CHB 3-niveaux connecté au réseau

La figure 4.40 montre le courant du réseau (courbe bleue), le courant de sortie d'onduleur après le filtre (courbe rouge) et le courant de la charge (courbe verte) de phase a en régime stable qui commence à  $t=0.7s$ .

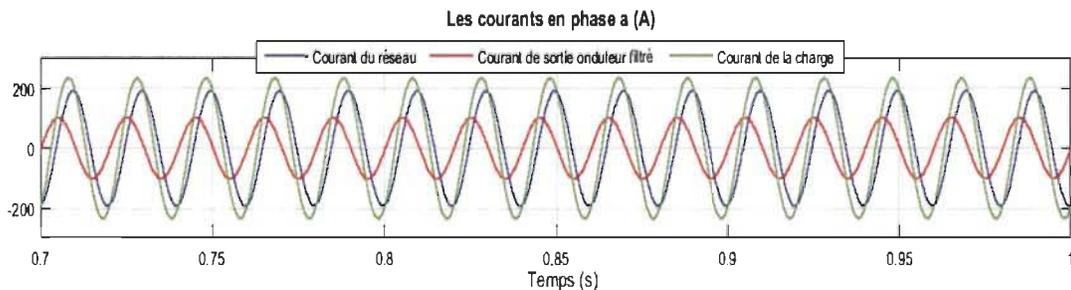


Figure 4.40 Forme des courants de CHB 3-niveaux

Les figures 4.41 a), b), c), d) montrent respectivement les spectres harmoniques des signaux de la tension composée  $V_{ab}$  de sortie d'onduleur, du courant de réseau, du courant de sortie d'onduleur et le courant de la charge (courbe verte) de phase a.

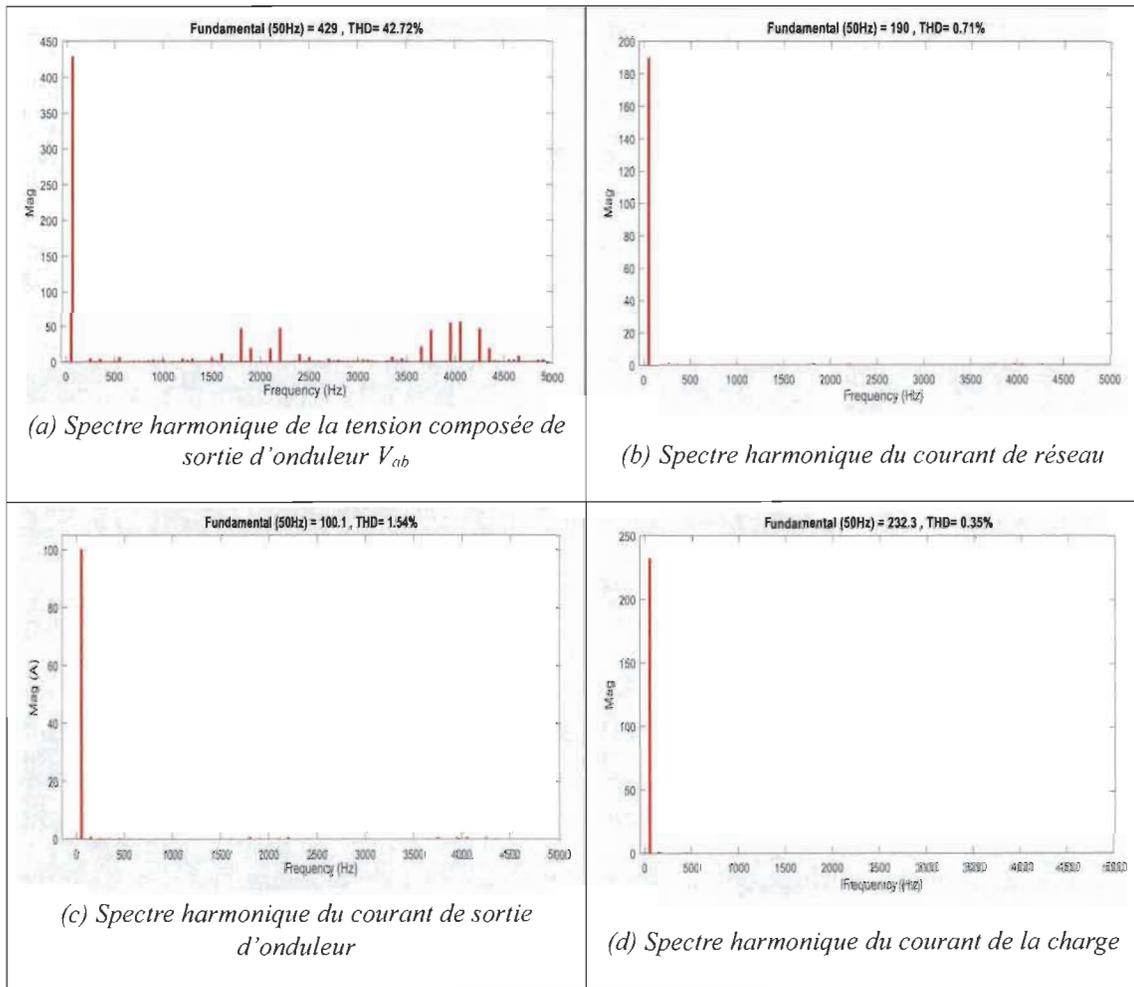


Figure 4.41 Spectres harmoniques des signaux de CHB 3-niveaux

#### 4.4.2 Onduleur à 5-niveaux

##### a) Topologie NPC

La figure 4.42 présente les signaux de la tension composée entre la phase a et la phase b ( $V_{ab}$ ), des tensions composées ( $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$  et  $V_{ca}$ ) après le filtre et des courants de ligne ( $I_a$ ,  $I_b$  et  $I_c$ ) obtenus à la sortie de l'onduleur NPC triphasé à 5 niveaux.

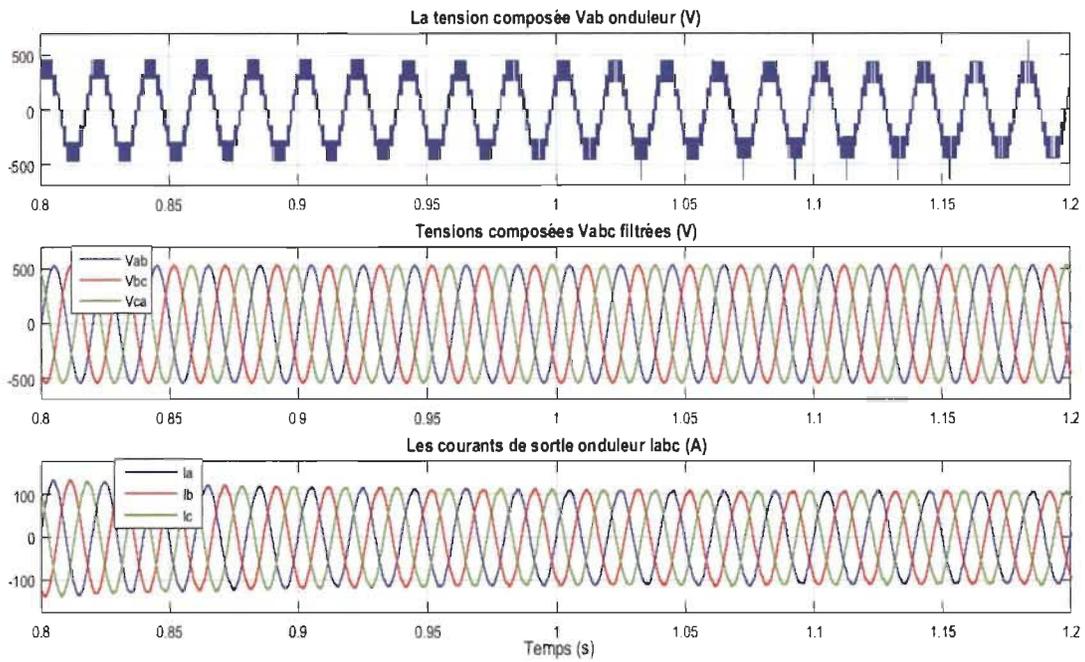


Figure 4.42 Forme des signaux de l'onduleur NPC 5-niveaux connecté au réseau

La figure 4.43 montre le courant du réseau (courbe bleue), le courant de sortie d'onduleur après le filtre (courbe rouge) et le courant de la charge (courbe verte) de phase a en régime stable qui commence à  $t=0.8s$ .

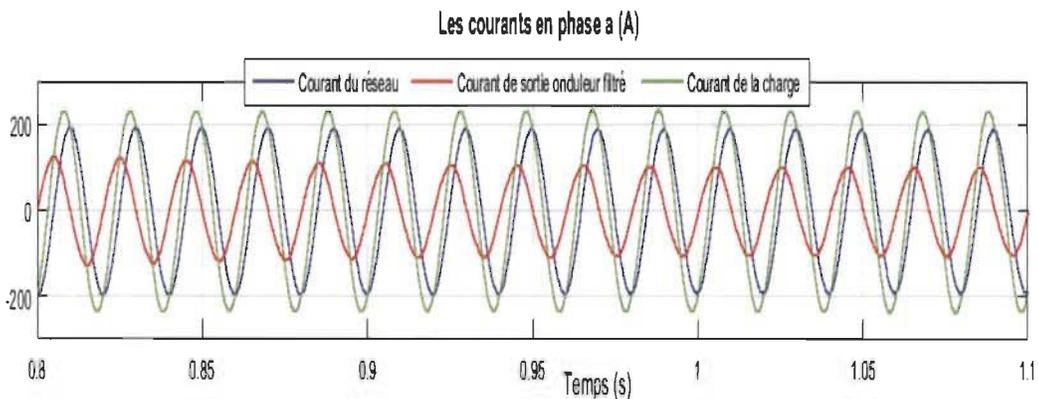


Figure 4.43 Forme des courants de NPC 5-niveaux

Les figures 4.44 a), b), c), d) montrent respectivement les spectres harmoniques des signaux de la tension composée  $V_{ab}$  de sortie d'onduleur, du courant de réseau, du courant de sortie d'onduleur et le courant de la charge (courbe verte) de phase a.

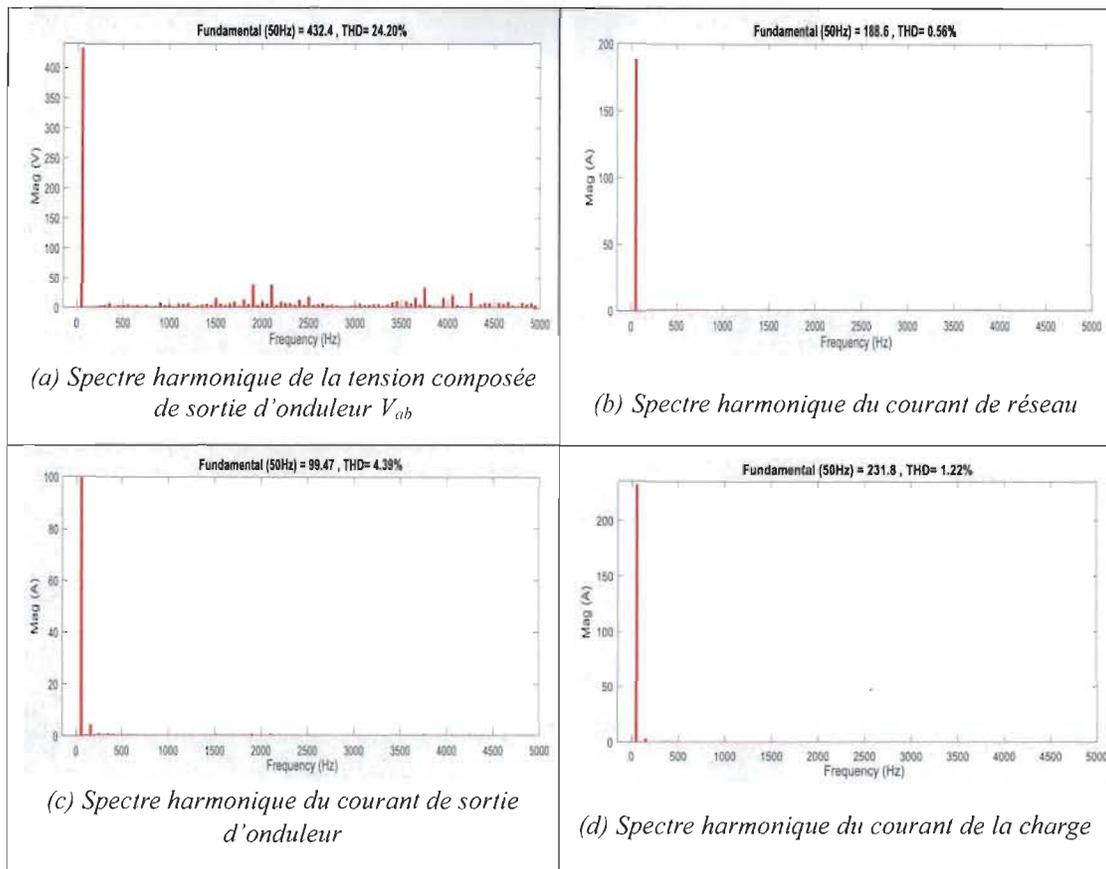


Figure 4.44 Spectres harmoniques des signaux de NPC 5-niveaux

## b) Topologie FC

La figure 4.45 présente les signaux de la tension composée entre la phase a et la phase b ( $V_{ab}$ ), des tensions composées ( $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$  et  $V_{ca}$ ) après le filtre et des courants de ligne ( $I_a$ ,  $I_b$  et  $I_c$ ) obtenus à la sortie de l'onduleur FC triphasé à 5 niveaux.

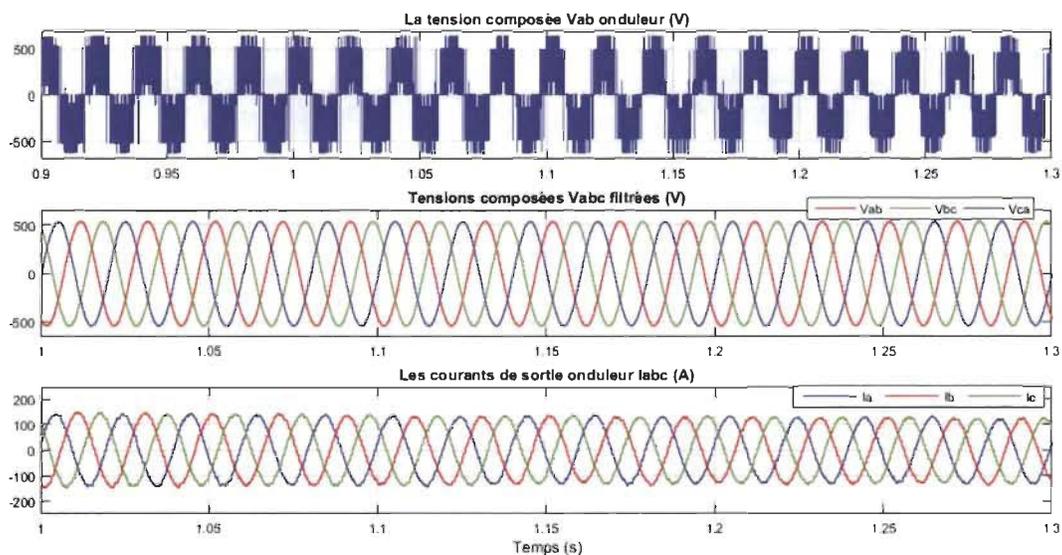


Figure 4.45 Forme des signaux de l'onduleur FC 5-niveaux connecté au réseau

La figure 4.46 montre le courant du réseau (courbe bleue), le courant de sortie d'onduleur après le filtre (courbe rouge) et le courant de la charge (courbe verte) de phase a en régime stable qui commence à  $t=1s$ .

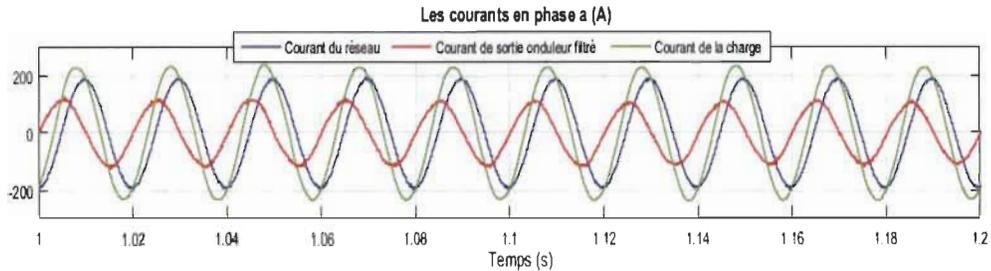


Figure 4.46 Forme des courants de FC 5-niveaux

Les figures 4.47 a), b), c), d) montrent respectivement les spectres harmoniques des signaux de la tension composée  $V_{ab}$  de sortie d'onduleur, du courant de réseau, du courant de sortie d'onduleur et le courant de la charge (courbe verte) de phase a.

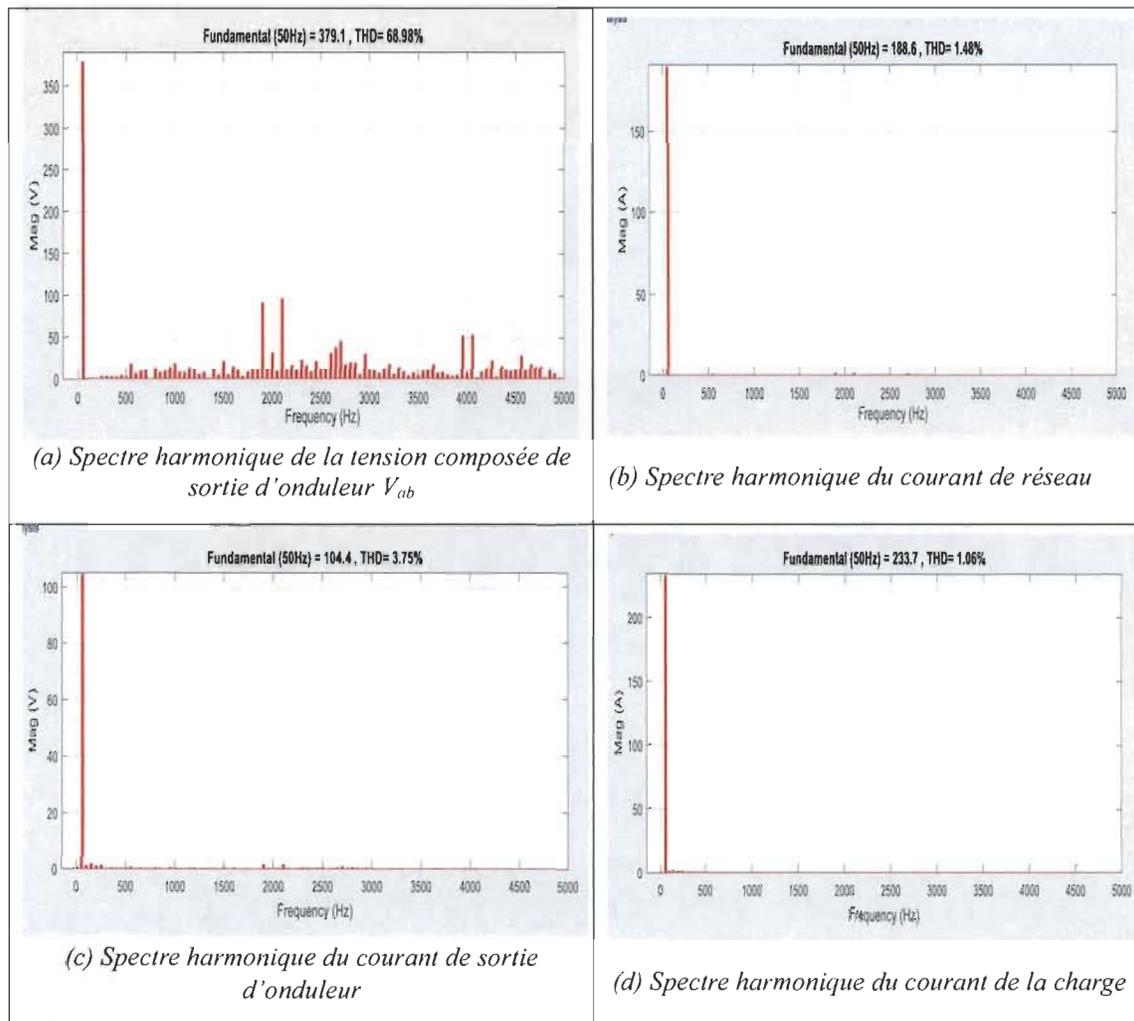


Figure 4.47 Spectres harmoniques des signaux de FC 5-niveaux

## b) Topologie CHB

La figure 4.48 présente les signaux de la tension composée entre la phase a et la phase b ( $V_{ab}$ ), des tensions composées ( $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$  et  $V_{ca}$ ) après le filtre et des courants de ligne ( $I_a$ ,  $I_b$  et  $I_c$ ) obtenus à la sortie de l'onduleur FC triphasé à 5 niveaux.

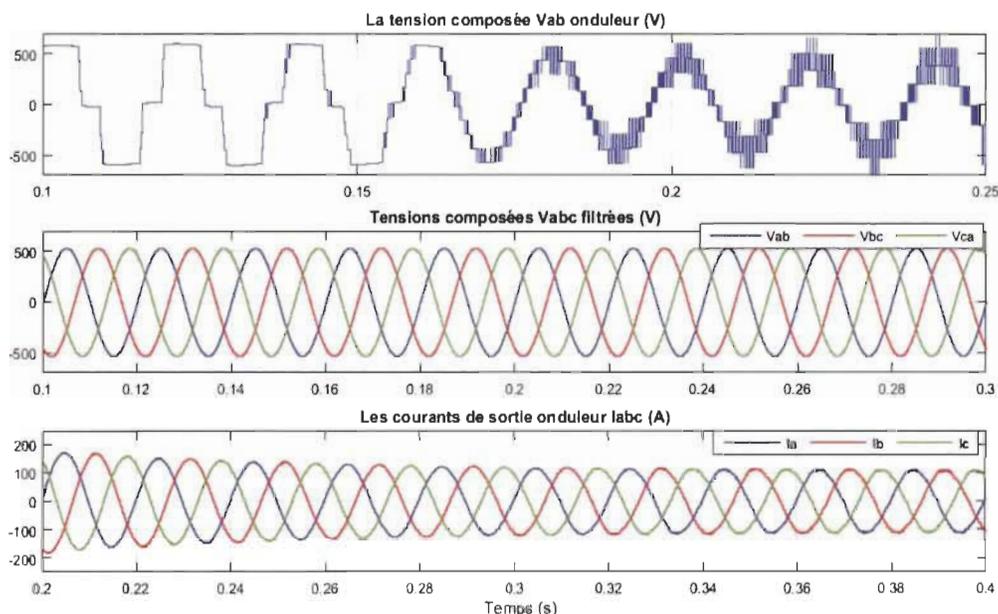


Figure 4.48 Forme des signaux de l'onduleur CHB 5-niveaux connecté au réseau

La figure 4.49 montre le courant du réseau (courbe bleue), le courant de sortie d'onduleur après le filtre (courbe rouge) et le courant de la charge (courbe verte) de phase a en régime stable qui commence à  $t=0.3$ s.

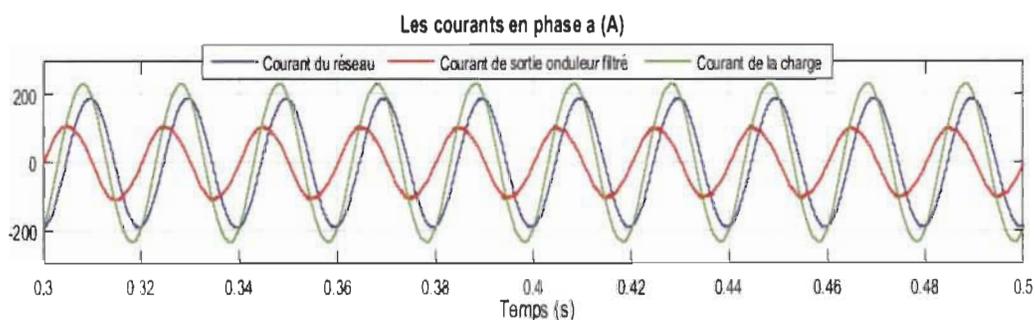


Figure 4.49 Forme des courants de CHB 5-niveaux

Les figures 4.50 a), b), c), d) montrent respectivement les spectres harmoniques des signaux de la tension composée  $V_{ab}$  de sortie d'onduleur, du courant de réseau, du courant de sortie d'onduleur et le courant de la charge (courbe verte) de phase a.

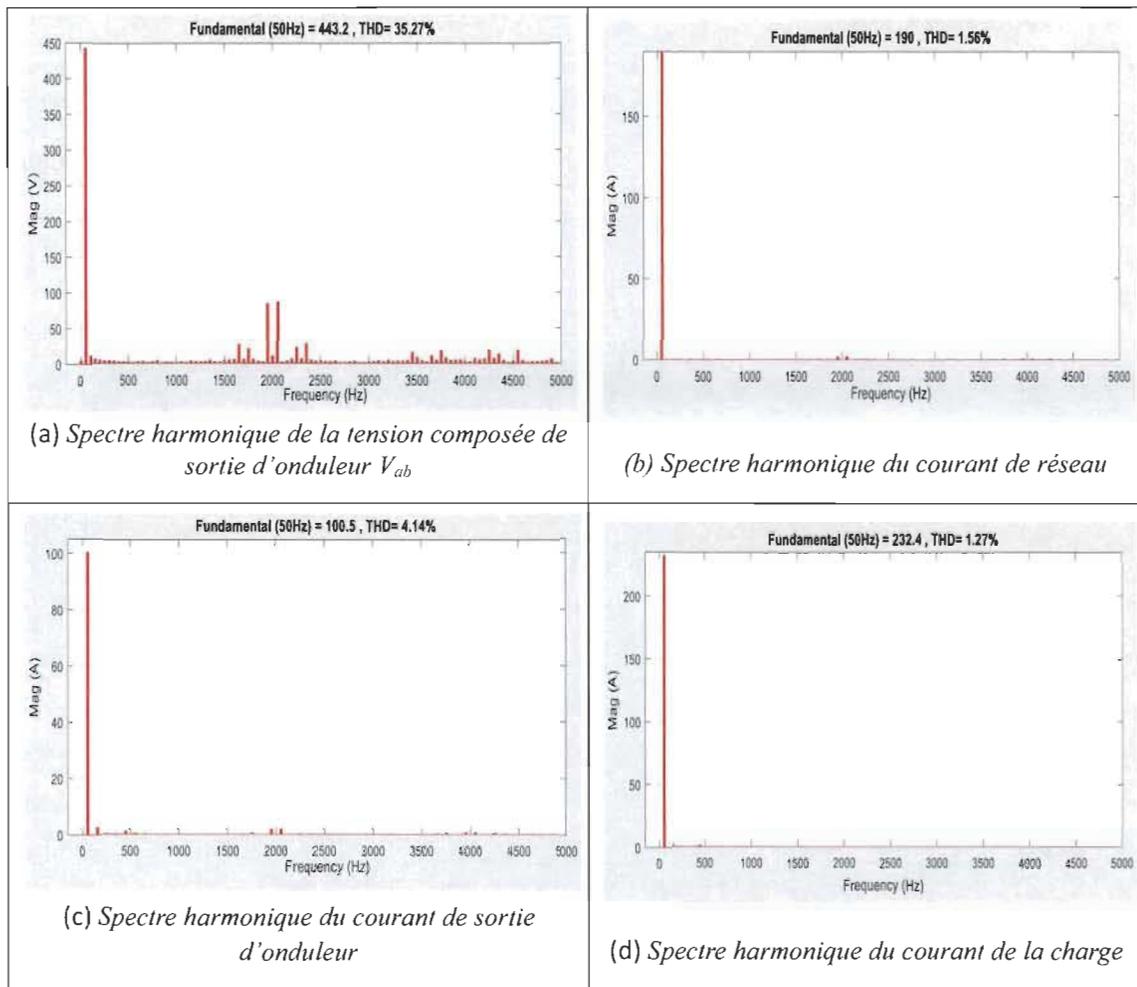


Figure 4.50 Spectres harmoniques des signaux de NPC 5-niveaux

Les résultats de simulation sont présentés dans le tableau 4.4, et les formes d'onde et spectres des signaux, obtenus de la figure 4.33 à la figure 4.50.

### Interprétations des résultats

- D'après les figures (4.33, 4.36, 4.39, 4.42, 4.45 et 4.48), on observe que l'ajout du filtre améliore bien la forme de la tension fournie au réseau électrique. La tension fournie au réseau par le générateur PV est bien sinusoïdale et équilibrée.
- D'après les figures (4.34, 4.37, 4.40, 4.43, 4.46 et 4.49), on observe que le courant de charge est la somme du courant de réseau et du courant de sortie d'onduleur. Le générateur PV et le réseau électrique alimentent bien la charge.

- À travers le tableau 4.4, on constate que les trois onduleurs donnent des valeurs de tension composée de sortie presque identiques, aussi les valeurs des courants de lignes sont identiques. Lorsque le nombre de niveaux augmente le TDH de la tension de sortie est diminué.
- On remarque que les courants, selon leurs allures et leur analyses spectrales, sont de bonne qualité et le TDH des courants est faible, les harmoniques sont tous pratiquement négligeables par rapport à la fondamentale.

Tableau 4.4 : Comparaison des résultats de simulation des trois types d'onduleur

Topologies	NPC		FC		Cascade H	
	3	5	3	5	3	5
Valeur fondamentale de la tension de sortie d'onduleur (V)	422.7	432.4	467.1	379.1	429	443.2
TDH de tension (%)	45.26	24.2	78.13	69.98	42.72	35.27
Valeur fondamentale du courant de réseau(A)	188.5	188.6	174.7	188.6	190	190
TDH de courant de réseau (%)	0.95	0.56	2.73	1.48	0.71	1.56
Valeur fondamentale du courant de sortie d'onduleur (A)	97.98	99.47	100.6	104.4	100.1	100.5
TDH du courant de sortie d'onduleur (%)	4.64	4.39	6.46	3.75	1.54	4.14
Valeur fondamentale du courant de la charge (A)	231.8	231.8	231.3	233.7	232.3	232.4
TDH du courant de charge (%)	1.77	1.22	1.78	1.06	0.35	1.27

## 4.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons modélisé et simulé tous les équipements représentant le système photovoltaïque connecté au réseau électrique, tels que, le générateur photovoltaïque, le hacheur élévateur, l'onduleur à 3-niveaux et 5-niveaux, le filtre LC, la charge et le réseau électrique.

Les résultats de simulation ont montré l'efficacité de l'ajout d'un filtre à la sortie de l'onduleur pour améliorer la qualité de la tension et du courant injectés au réseau. Et on a fait une analyse de comparaison sur les trois types d'onduleur à 3-niveaux et 5-niveaux.

Les résultats obtenus des tensions et courants par simulations se rapprochent de ceux obtenus dans la littérature ce qui nous permet de valider notre travail.

# Chapitre 5

## Conclusion générale et recommandations

### 5.1 Conclusion générale

Le travail effectué dans ce mémoire avait comme objectif de faire une analyse comparative des structures d'onduleurs multi-niveaux pour les systèmes photovoltaïques connectés à un réseau électrique moyenne tension.

En première partie, on a donné des généralités sur les systèmes PV, le principe de l'effet PV, la cellule PV ainsi que le générateur photovoltaïque, un modèle mathématique du circuit électrique équivalent, en tenant compte de la température et ses performances. On a établi les équations régissant le GPV en choisissant le modèle électrique équivalent à une diode qui est un compromis entre la précision et la simplicité.

Dans la deuxième partie, on a étudié le convertisseur CC-CC (hacheur élévateur) utilisé dans les systèmes photovoltaïques, qui permet d'élever la tension issue des modules PV à un niveau de tension adaptable à l'entrée du convertisseur CC-CA. Ensuite, on a présenté les méthodes MPPT en générale et on a détaillé sur la méthode de perturbation et observation.

Dans la troisième partie, on a mené une recherche bibliographique sur les topologies des systèmes photovoltaïques connectés au réseau et les topologies des onduleurs multi-niveaux (NPC, FC et CHB) utilisées dans les systèmes PV. Ensuite on a représenté le principe de fonctionnement des trois structures de l'onduleurs à 3-niveaux associé à la commande triangle sinus à n porteuses.

Dans la dernière partie, on a effectué une simulation sous l'environnement Matlab/Simulink d'une centrale photovoltaïque raccordée au réseau électrique. Notre travail de l'étude du système PV connecté au réseau électrique se résume comme suit :

Un générateur PV de 150kW, un hacheur élévateur (Boost) qui fournit une tension continue réglable, les onduleurs multi-niveaux, le filtre LC qui améliore la qualité

d'énergie injectée au réseau électrique, un transformateur 380V/20kV et un réseau électrique de moyenne tension de 20kV. On a fait une étude comparative entre la qualité d'onde issue des trois types de l'onduleur à 3 et 5 niveaux. L'étude spectrale a montré la supériorité de l'onduleur à 5 niveaux. Bien sûr, le compromis doit être joué entre la complexité de la configuration du convertisseur de puissance et la commande qui lui est associée.

D'après les résultats de simulation obtenus, on peut dire que :

- Les performances du générateur se dégradent avec l'augmentation de la température et la diminution de l'intensité de l'éclairement. Les performances du générateur PV sont évaluées à partir des conditions standards de test (CST) : éclairement  $1000\text{W/m}^2$  et température  $25^\circ\text{C}$ .
- La tension composée (ligne - ligne) peut avoir plus de niveaux par rapport à la tension simple (phase - phase), donc sa forme d'onde ressemble ainsi à une sinusoïdale plus souhaitable. Lorsque le nombre de niveaux augmente, le TDH est diminué.
- Quant à la qualité des signaux obtenus, nous avons obtenus les mêmes formes d'onde pour les trois onduleurs étudiés, le TDH de la tension est meilleur pour le cas NPC, mais par contre du point de vue composants utilisés, l'onduleur cascade en pont H est plus intéressant. À cause de la complexité et le déséquilibre, le type FC ne s'applique pas au système PV connecté au réseau électrique.

## 5.2 Recommandation

Au terme de cette recherche quelques suggestions peuvent être émises en vue de son amélioration :

- Il serait intéressant de procéder à l'implémentation des techniques MPPT dans notre système PV connecté au réseau pour la poursuite du point de puissance

maximale dans des conditions variables d'éclairement, afin de valider les résultats de simulation et confirmer les performances obtenues.

- Il est recommandé d'approfondir l'étude vers d'autres topologies d'onduleur multi-niveaux qui utilisent moins de composants tout en évitant le filtre, ce qui amène à mieux exploiter l'énergie solaire et à adopter des techniques MLI avancées.
- L'emploi d'un onduleur à un niveau élevé est le meilleur choix pour les systèmes PV connectés au réseau haute tension.

## Références

- [1] Kjaer S B, Pedersen J K, Blaabjerg F, "A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules," *IEEE transactions on industry applications*, 2005, 41(5): 1292-1306.
- [2] Petibon S, "Nouvelles architectures distribuées de gestion et conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques," *Université Paul Sabatier-Toulouse III*, 2009
- [3] Belakehal Soltane, "Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Énergies Renouvelables," *Thèse de Doctorat, université de Constantine*, 10/06/2010
- [4] Helali K, "Modélisation d'une cellule photovoltaïque: étude comparative," *Master in Electrotechnique, Université Mouloud Mammri de Tizi-Ouzou*, 2012.
- [5] A. labouret et M. villoz, "Energie solaire photovoltaïque," *livre 4 édition*, 2008.
- [6] Antonio Luque and Steven Hegedus, "Handbook of Photovoltaic Science and Engineering," *John Wiley & Sons Ltd*, 2003.
- [7] Mechalikh M N et Hamada C E, "Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau," *Université Kasdi Merbah de Ouargla*, 2013.
- [8] Chebana A, "Contrôle d'un système photovoltaïque connecté au réseau," *Université Mohamed Khider Biskra*, 2014
- [9] Zerhouni F Z, Zegrar M, Brahim S K, et Stambouli A B, "Optimisation d'un système à énergie verte avec validation pratique," *Revue des énergies renouvelables*, 2008
- [10] Benseddik O et Djaloud F, "Étude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque," *Université Kasdi Merbah de Ouargla*, 2012.
- [11] Benkhelil E, Gherbi A, "Modeling and simulation of grid-connected photovoltaic generation system," *Revue des Énergies Renouvelables SIENR*, 2012, 12: 295-306.
- [12] Maher Chaabene, "Gestion énergétique des panneaux photovoltaïques," *Université de Sfax école nationale d'ingénieurs de Sfax*, 2008-2009.

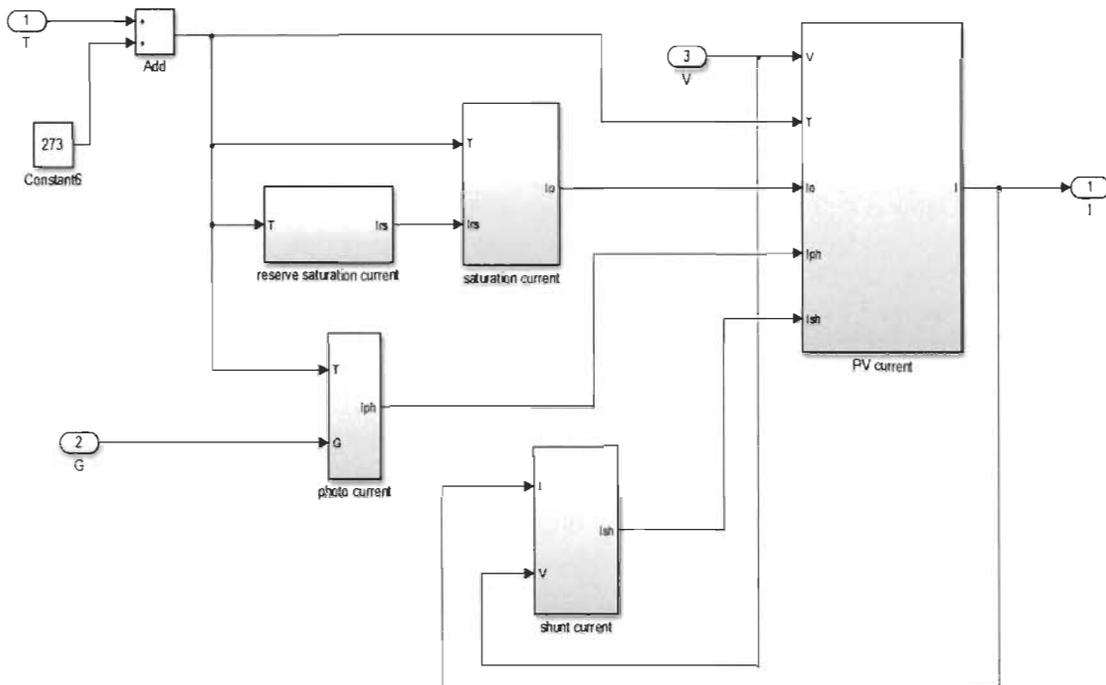
- [13] Djeriou Salim, "Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone," *Université Ferhat Abbas de Sétif*, 2011
- [14] Belkaid Abdelhakim, "Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaîne de conversion photovoltaïque autonome," *Université de Sétif 1*, 2015
- [15] Hart D W, "Power electronics," *Tata McGraw-Hill Education*, 2011.
- [16] Tafticht T, "Analyse et commande d'un système hybride photovoltaïque éolien," *Université du Québec à Trois-Rivières*, 2006.
- [17] <http://www.aros-solar.com/fr/l%E2%80%99importance-du-mppt-maximum-power-point-tracker>.
- [18] Sahraoui H, "Modélisation Et Commande Des Convertisseurs DC-DC Utilisés Dans Les Systèmes Photovoltaïques (Théorie et Expérimentation)," *Université de Batna 2*, 2017.
- [19] Abbes H, Abid H, Loukil K, Toumi A et Abid M, "Étude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque," *Revue des Énergies Renouvelables*, 2014, 17(3): 435-445.
- [20] Esram T, Chapman P L, "Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques," *IEEE Transactions on Energy conversion*, 2007.
- [21] Sengar S, "Maximum power point tracking algorithms for photovoltaic system: a review," *International Review of Applied Engineering Research*, 2014.
- [22] 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*, 2007.
- [23] Aouchiche N, Cheikh M S A et Malek A, "Poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque par les méthodes de l'incrémental de conductance et la perturbation & observation," *Revue des Énergies Renouvelables*, 2013, 16(13): 485-498.
- [24] B N Yannick, "Modélisation des injections de puissance d'un système PV sur un réseau public," *Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'environnement*, 2012.

- [25] Tkouti N, "Optimisation des Systèmes Photovoltaïques Connectés au Réseau par la Logique Floue," *Université Mohamed Khider-Biskra, 2004.*
- [26] Picault D, "Reduction of mismatch losses in grid-connected photovoltaic systems using alternative topologies," *Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2010.*
- [27] Vighetti S, "Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau: Choix et dimensionnement des étages de conversion," *Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2010.*
- [28] Omran W, "Performance analysis of grid-connected photovoltaic systems," *University of Waterloo, 2010.*
- [29] Zergoune M A et Hideb A, "Commande d'onduleur multiniveaux à structure en cascade par stratégie d'élimination d'harmonique sélective," *Université Kasdi Merbah de Ouargla, 2017.*
- [30] Brahim R, "Étude du déséquilibre de l'alimentation d'un onduleur multi niveaux," *Université Mohamed Boudiaf des sciences et de la technologie d'Oran, 2014.*
- [31] Youssouf D et Djamel B A, "Modélisation et commande d'un onduleur triphasé piloté par MLI à structure multi-niveaux," *Diplôme de master en Génie Électrique, 2012.*
- [32] Fares Z, "Étude et analyse de la commande des onduleurs multiniveaux par MLI vectorielles," *Université Badji Mokhtar de Annaba, 2009.*
- [33] Mohammed MCHICHOU, "Étude et conception d'un onduleur photovoltaïque," *Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, 2015.*
- [34] Teryima K D, David A O, Awuhe S T, "THD Analysis of an Overlapping Carrier Based SPWM for a 5-Level Cascaded H-bridge Multilevel Inverter," *International Journal of Advanced Science and Technology, 2016.*
- [35] Baldé M, "Étude d'un compensateur statique pour éoliennes à vitesse fixe à base de génératrice asynchrone à cage," *Université du Québec à Trois-Rivières, 2010.*
- [36] <http://www.elysun.fr/module-photovoltaique-polycristallin-200w.htm> l
- [37] <https://info-solaire.fr/blog/culture-renouvelable/systeme-photovoltaique-classique-raccorde-au-reseau.html>

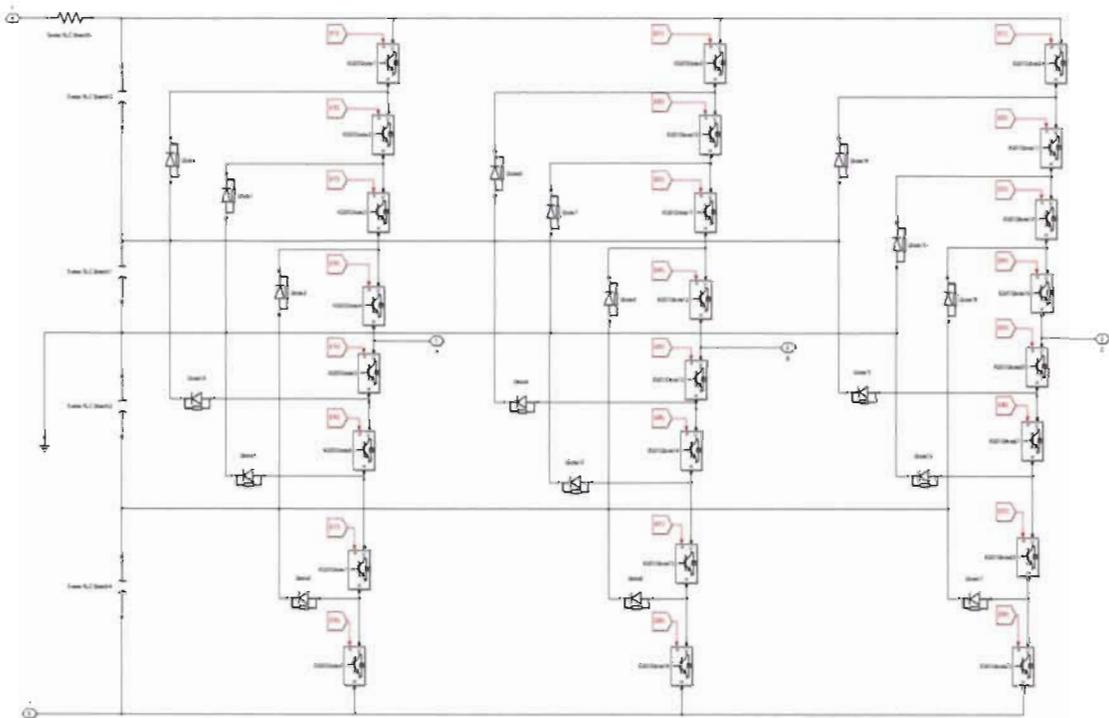
- [38] Belaid Lalouni Sofia, "Cours Energie Solaire Photovoltaïque," *Université A. MIRA de BEJAIA, Année universitaire 2014/2015*.
- [39] Han Q, Li B, Li Z, et Ke Q, "Research of grid-connected photovoltaic inverter grid-connected system based on dual closed-loop of grid voltage vector orientation," *2017 Chinese Automation Congress (CAC). IEEE, 2017*.
- [40] Asma M, Ali H, Oualid K, "Modélisation et Simulation d'un Système PV Intégré à un Réseau BT par la Méthode Du Watt-Var découplé," *International journal of Control Energy and Electrical Engineering (CEEE), 2014*.
- [41] Blaabjerg F, Teodorescu R, Liserre M, et al, "Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems," *IEEE Transactions on industrial electronics. 2006*.
- [42] Yazid M, Aouzellag D, "Étude des onduleurs multi-niveaux dans les chaînes de production d'énergie éolienne," *Universite de Bejaia, 2009*.

# Annexes

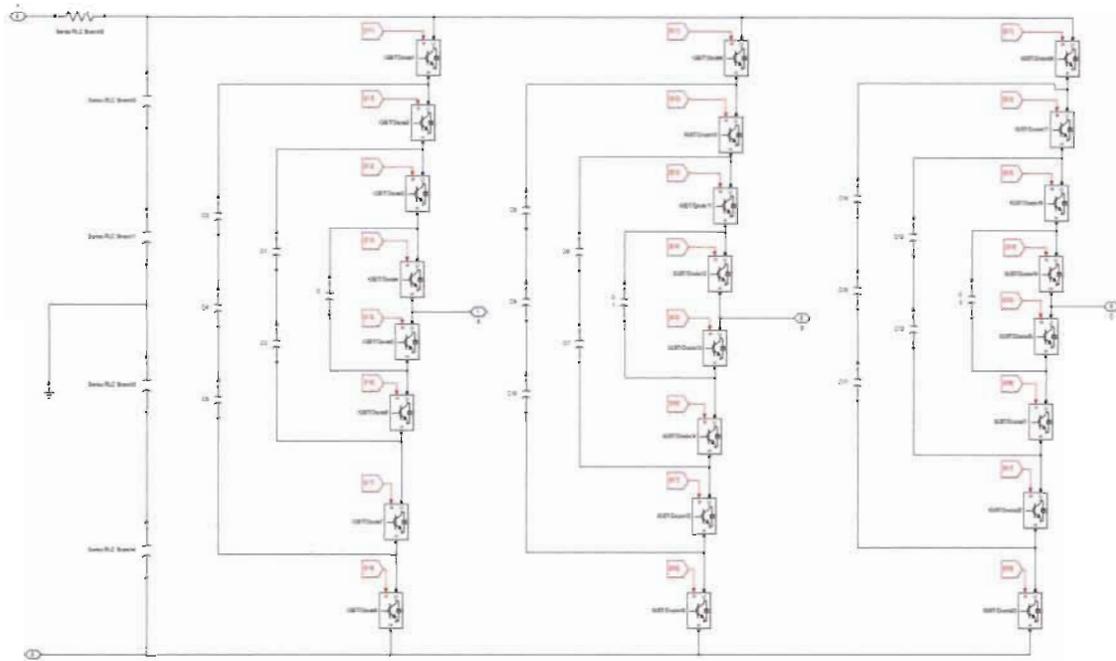
## 1. Modèle du GPV sous Matlab/Simulink



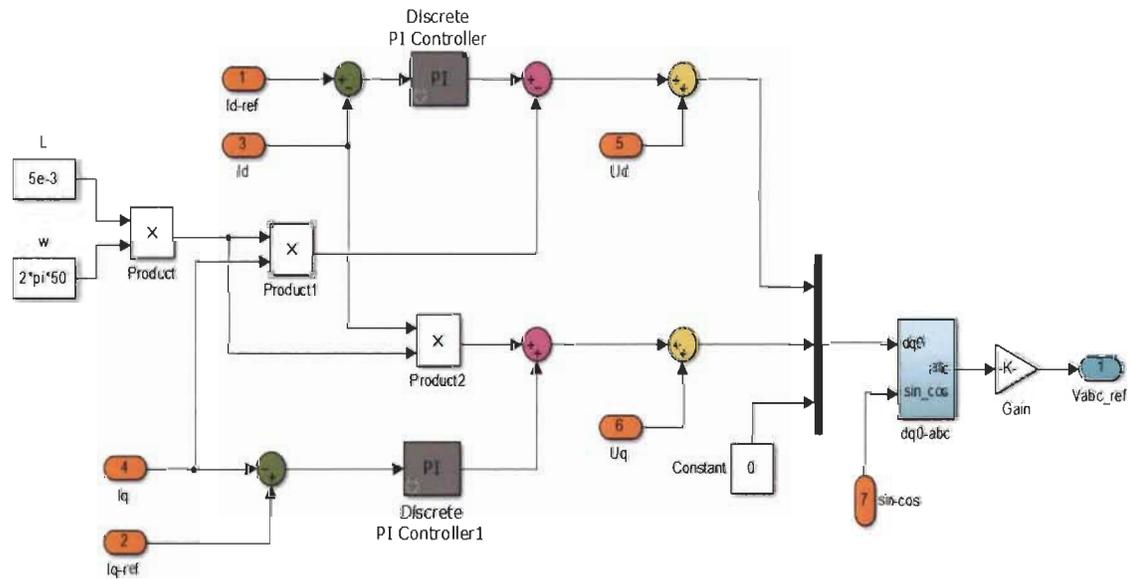
## 2. Modèle d'onduleur NPC 5-niveaux développé



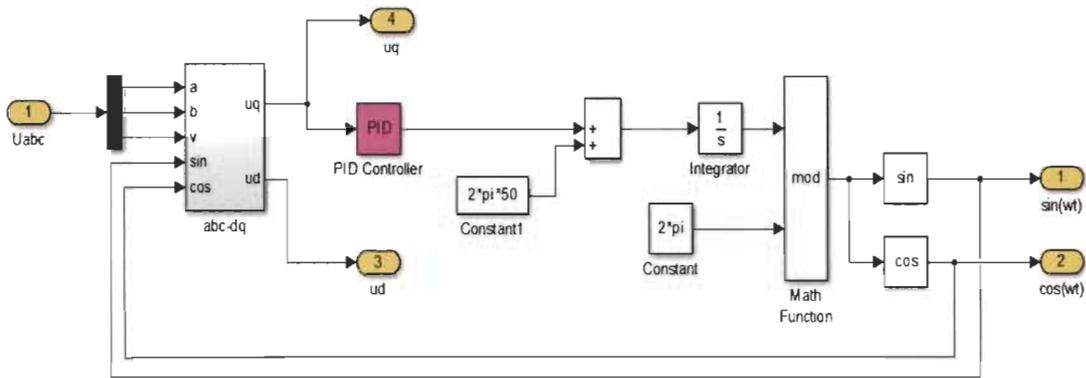
### 3. Modèle d'onduleur FC 5-niveaux développé



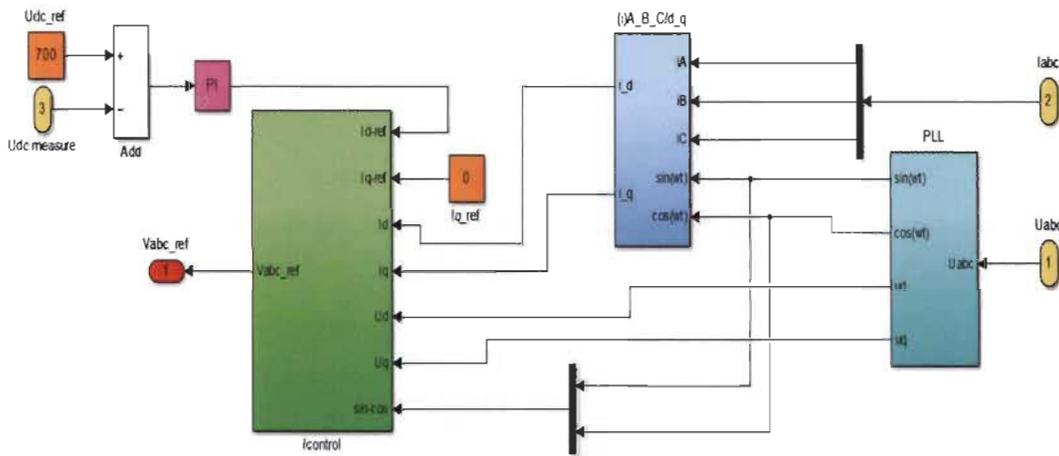
### 4. Bloc du contrôle des courants transités par le réseau dans le repère de Park



### 5. Bloc de PLL sous Matlab/Simulink



## 6. Modèle de la commande de l'ensemble du système PV connecté au réseau électrique



## 7. Transformée de Clarke

La transformée de Clarke permet le passage d'un système triphasé (a, b, c) en un système diphasé ( $\alpha$ ,  $\beta$ ). Elle est exprimée par :

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = [C] \times \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

Avec :

$$[C] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$$

[C] est appelée « matrice de Clark ».

## 8. Transformée de Park

La transformée de Park est constituée d'une transformation triphasée - diphasée suivie d'une rotation. Elle permet de passer du repère (a, b, c) vers le repère mobile (d, q).

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_0 \end{bmatrix} = [P] \times \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

$$\text{Avec : } [P(\theta)] = k \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

$[P(\theta)]$  est appelée « matrice de Park » et l'angle  $\theta$  indique la vitesse de rotation du repère ( $\theta = \omega \cdot t$ ).

Où  $k$  est une constante qui peut prendre soit les valeurs  $\frac{2}{3}$  ou 1 pour la non conservation de puissance, soit la valeur  $\sqrt{\frac{2}{3}}$  pour une conservation de puissance.

## 9. Transformée de Park inverse

A l'inverse, pour le retour à un système triphasé on utilise la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = [P]^{-1} \times \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_0 \end{bmatrix}$$

$$\text{Avec : } [P(\theta)]^{-1} = k \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

$[P(\theta)]^{-1}$  est appelée « matrice de Park inverse ».