

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTÉ DE GÉNIE ÉLECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE  
DÉPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

## Mémoire de Fin d'Études de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : **Sciences et Technologies**  
Filière : **Électrotechnique**  
Spécialité : **Electrotechnique industrielle**

*Présenté par*

**HADID MELISSA**  
**MEFTAH KARIMA**

Thème

### **Amélioration de la qualité de l'énergie dans les réseaux électriques par filtrage actif multi-niveaux**

*Mémoire soutenu publiquement le 19 /06 / 2024 devant le jury composé de :*

**Mr RABAH ROUAS**  
MCB, UMMTO, Président

**Mr SALAH HADDAD**  
Professeur, UMMTO, Rapporteur

**Mr MADJID SI BRAHIM**  
MCA, UMMTO, Examineur

**Mme FATMA LOUNNAS**  
MCB, UMMTO, Examinatrice

*Année Universitaire : 2023/2024*

## *Remerciement*

À l'issue de ce travail, nous tenons à adresser nos reconnaissances et nos remerciements à toutes les personnes qui ont contribué, chacune à leur manière, à l'accomplissement de ce mémoire.

En premier lieu, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre directeur de mémoire, M. HADDAD SALAH (Professeur à l'université Mouloud MAMMARI de Tizi-Ouzou), pour nous avoir confié et dirigé ce projet et qui n'a jamais manqué de nous conseiller et de nous orienter tout au long de ce projet. Qu'il trouve ici l'expression de notre respect et de notre profonde reconnaissance.

Nous tenons à remercier également les membres du jury, Mr. ROUAS, Mr. SI BRAHIM et Mme.LOUNNAS, pour avoir accepté d'évaluer notre mémoire et pour leurs précieuses suggestions.

Enfin, nous tenons à remercier nos familles et nos amis pour leur amour, leur patience et leur encouragement tout au long de cette aventure. Sans leur présence et leur compréhension, l'accomplissement de ce mémoire aurait été beaucoup plus difficile.

## ***Dédicaces***

*Ce mémoire n'aurait jamais pu voir le jour sans le soutien actif des membres de ma famille  
que je tiens à remercier.*

*Je dédie ce modeste travail, tout d'abord à mon père, le premier homme de ma vie, la lumière  
qui m'a toujours guidé vers le bon chemin.*

*A ma mère la flamme de ma vie, à celle qui a tout fait pour ma réussite, pour sa douceur, sa  
présence, ses sacrifices et ses encouragements.*

*A ma chère sœur Lamia, son mari.*

*A ma chère sœur Drifa, son mari et mes neveux Lyana, Yanis et Elyne.*

*A mes chers frère Djamel et Lyes.*

*A mes chers amis, en témoignage de l'amitié qui nous unit et des souvenirs de tous les  
moments que nous avons passés ensemble.*

***Melissa.***

## ***Dédicaces***

*Ce mémoire est dédié à ceux qui ont été mes soutiens les plus constants et mes sources d'inspiration inépuisable tout au long de mon parcours académique.*

*A ma chère mère, tu as été ma lumière et ma force, toujours là pour m'encourager et me guider à chaque étape de ma vie. Ton amour inconditionnelle et ta sagesse été les piliers sur lesquels j'ai construit mon chemin, ce mémoire est dédié à toi, pour tout ce que tu as sacrifié et tout ce que tu m'as donné. Je t'aime plus que des mots ne pourraient le dire.*

*A mon cher père, ton soutien inébranlable et ta persévérance m'ont montré la voie à suivre. Chaque jour, tu m'as appris l'importance de travail acharné et de l'intégrité. Ce travail est dédié à toi pour ton exemple inspirant et ta présence constante. Je te suis profondément reconnaissance.*

*A ma chère sœur NADJET et son mari ALI et mes neveux WALID et YACINE*

*A ma chère sœur ZAHIA et son mari MAHREZ et leur fils GHILES*

*A ma chère sœur NABILA.*

*Merci pour votre amour, votre soutien et votre présence constante. Merci d'être les piliers sur lesquelles je peux toujours compter.*

*A mes chers frères « MOHAMMED, MIHOUB, SOFIANE, KAMAL, et YAHIA »*

*Vous êtes plus que des frères pour moi ; vous êtes mes compagnons de vie, mes alliés inébranlables. Chacun de vous apporte une lumière unique à ma vie, et je suis profondément reconnaissante pour votre amour. Cette réussite est autant la vôtre que la mienne.*

*A mes chers amies, ce mémoire est dédié à vous, merci d'avoir enrichi cette expérience académique de votre précieuse amitié.*

***Karima.***

**Liste des figures :**

**Chapitre I :**

Figure I.1 : Différentes perturbations affectant la qualité d'énergie électrique.....	4
Figure I.2 : Variation de fréquence.....	6
Figure I.3 : Déséquilibre des tensions d'un système triphasé.....	6
Figure I.4 : Onde déformée par les harmoniques.....	7
Figure I.5 : Raccordement des inductances anti-harmoniques.....	12
Figure I.6 : Filtre passif amorti.....	13
Figure I.7 : Filtre passif résonnant.....	13
Figure I.8 : Filtre actif parallèle.....	14
Figure I.9 : Filtre actif série.....	15
Figure I.10 : Filtre combine parallèle-série.....	15
Figure I.11 : Filtre actif hybride.....	16
Figure I.12 : Redresseur triphasé de tension à MLI.....	17

**Chapitre II :**

Figure II.1 : Pont redresseur triphasé à diodes « PD3 ».....	18
Figure II.2 : Modèle Matlab Simulink du pont redresseur triphasé à diodes « PD3 ».....	20
Figure II.3 : Courant absorbé par la phase 1 du redresseur triphasé à diodes.....	21
Figure II.4 : Analyse harmonique du courant absorbé par la phase 1 du redresseur triphasé à diodes.....	22
Figure II.5 : Photographie du banc expérimental réalisé.....	23
Figure II.6 Courant expérimental absorbé par la phase 1 du redresseur triphasé à diodes.....	23
Figure II.7 Analyse harmonique du courant expérimental absorbé par la phase 1 du redresseur triphasé à diodes.....	24

**Chapitre III :**

Figure III.1 : filtrage passif des harmoniques.....28

Figure III.2 : schéma Matlab-Simulink du modelé de l'ensemble redresseurs-filtre passif.....31

Figure III.3 : forme d'onde du courant  $i_{a1}$  avant filtrage.....32

Figure III.4 : Forme d'onde du courant  $i_{a1}$  après filtrage de l'harmonique 5.....33

Figure III.5 : Photographie du banc expérimental réalisé.....34

Figure III.6 : résultat expérimentale de la Forme d'onde du courant  $i_{a1}$  après filtrage de l'harmonique 5.....35

**Chapitre IV :**

Figure IV.1 : Schéma du principe du filtre actif.....38

Figure IV.2 : Principe de séparation des puissances.....39

Figure IV.3 : Structure d'un filtre actif basé sur la méthode des puissances instantanées.....40

Figure IV.4 : Structure d'un filtre actif basé sur la méthode de détection synchrone.....42

Figure IV.5 : Principe de commande des courants par hystérésis.....43

Figure IV.6 : Principe de commande des courants par MLI.....43

Figure IV.7 : Onduleur multi-niveaux à deux (a), à trois (b) et à m niveaux (c).....45

Figure IV.8 : Schéma d'une branche d'onduleur trois niveaux à deux cellules par phase.....46

Figure IV.9 : Modèle Matlab-Simulink du filtre actif commandé par Hystérésis.....48

Figure IV.10 : Modèle Matlab-Simulink du filtre actif commandé par MLI.....48

Figure IV.11 : Forme d'onde du courant  $i_{r1}$  avant filtrage.....49

Figure IV.12 : Forme d'onde du courant  $i_{r1}$  après filtrage actif commandé par Hystérésis.....50

Figure IV.13 : Forme d'onde du courant de référence du filtre actif.....51

Figure IV.14 : Forme d'onde du courant en sortie du filtre actif commandé par hystérésis.....51

Figure IV.15 : Forme d'onde du courant  $i_{s1}$  après filtrage actif commandé par MLI à 1Niveau.....52

## Les figures et les tableaux des chapitres.

---

Figure IV.16 : Forme d'onde du courant après filtre actif multi-niveaux.....53

Figure IV.17 : Forme d'onde du courant de référence du filtre actif.....55

Figure IV.18 : Forme d'onde du courant en sortie du filtre actif commandé par MLI.....55

### Chapitre V :

Figure V.1 : Principe du redresseur à MLI.....58

Figure V.2: Principe de la commande à MLI.....60

Figure V.3 : Modèle Matlab-Simulink d'un redresseur à MLI.....61

Figure V.4 : Modèle Matlab-Simulink détaillé du bloc « redresseur à MLI ».....62

Figure V.5 : forme d'onde de la tension et le courant absorbe par la phase 1 du redresseur MLI pour le 1 ère niveau.....63

Figure V.6 : forme d'onde de la tension et le courant absorbe par la phase 1 du redresseur MLI pour le 5 ème niveau.....64

Figure V.7 : forme d'onde de la tension et le courant absorbe par la phase 1 du redresseur MLI pour le 7 ème niveau.....64

### Liste des tableaux :

#### Chapitre I :

Tableau I.1: Taux d'harmoniques spécifiés par la norme (CEI61000-3-2).....8

Tableau I.2: Limites des émissions de tensions harmoniques (la norme CEI 61000-2-2).....9

Tableau I.3 : Limite IEEE pour la distorsion harmonique de la tension.....9

Tableau I.4 : Limite IEEE des émissions de courants harmoniques.....10

Tableau I.5 : Classification IEEE des perturbations électromagnétiques.....11

#### Chapitre II :

Tableau II.1 Amplitudes et phases des harmoniques du courant absorbé par la phase 1 du redresseur triphasé à diodes.....22

## Les figures et les tableaux des chapitres.

---

Tableau II.2 Amplitudes et phases des harmoniques du courant expérimental absorbé par la phase 1 du redresseur triphasé à diodes.....	24
---	----

### Chapitre III :

Tableau III.1 : Paramètres du système étudié.....	30
---	----

Tableau III.2 : resultat de FFT analyse de courant avant filtrage.....	32
--	----

Tableau III.3: resultat de FFT analyse du courant après le filtrage de l'harmonique 5.....	33
--	----

### Chapitre IV :

Tableau IV.1 : Paramètres de simulation.....	47
--	----

Tableau IV.2 : FFT de $i_{r1}$ avant filtrage.....	49
--	----

Tableau IV.3 : FFT de $i_{r1}$ après filtrage actif commandé par hystérésis.....	50
--	----

Tableau IV.4 : FFT de $i_{r1}$ après filtrage actif commandé par MLI à 1 Niveau.....	52
--	----

Tableau IV.5 : Résultat de FFT analyse du courant $i_{r1}$ après filtrage actif multi-niveaux.....	54
--	----

### Chapitre V :

Tableau V.01 : Les paramètres de simulation.....	62
--	----

Tableau V.02: Résultat de FFT analyse du courant $i_{r1}$ .....	63
---	----

## Listes des Symboles et Acronymes.

---

### Nomenclature :

$P$	Puissance active.
$q$	Puissance réactive.
$\omega$	Pulsation du réseau.
$\theta$	L'angle de la transformation de Park.
$i_{ref}$	Courant de référence.
$i_{inf}$	Courant généré par l'onduleur.
$\bar{P}$	Puissance continue liée à la composante fondamentale active.
$\bar{q}$	Puissance continue liée à la composante fondamentale réactive.
$p_0$	Puissance active provenant de la boucle de régulation de la tension $U_c$ .
$i_{ref\alpha} \ i_{ref\beta}$	Les courants perturbateurs dans le repère $\alpha\beta$ .
$i_\alpha \ i_\beta$	Courants dans le repère $\alpha\text{-}\beta$ .
$\tilde{p}$ et $\tilde{q}$	Puissances alternatives liées à la somme des composantes perturbatrices.
$I_0$	L'amplitude du courant actif fondamental nécessaire à la régulation de la tension continue.
$L_{ch} , R_{ch}$	Inductance et Résistance de la Charge.
$Z_S :$	Impédance du réseau.
$e_a , e_b , e_c$	Les tensions du réseau.
$i_a , i_b , i_c$	Courants du réseau.
$V_a , V_b , V_c$	Les trois tensions d'entrée du redresseur à MLI.
$C_1, C_2, C_3 :$	Les ordres de contrôle des trois bras de l'onduleur.
$U_{dc} , i_{dc}$	Tension et Courant du bus continu.
$R , C$	Résistance et capacité du bus continu.
$L , R$	Inductance et Résistance de la ligne.

### Liste des Abréviations :

MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
THD	Taux de distorsion harmonique
PLL	Phase Locked Loop (boucle a verrouillage de phase).
TCD	Transformée de Concordia directe.
TCI	Transformée inverse de Concordia.
TPD	Transformée de Park directe
TPI	Transformée inverse de Park
CEI	Commission Electrotechnique Internationale.
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers.

# Sommaire .

---

## *Sommaire :*

*Remerciements*

*Dédicaces*

*Liste des figures*

*Liste des tableaux*

*Listes des Symboles et Acronymes*

Introduction générale .....1

### Chapitre I :

I.1 Introduction .....3

I.2 Paramètres de la qualité de l'énergie électrique .....3

I.3 Les perturbations électriques et leurs origines .....4

I.3.1 Creux et coupures de tension .....4

I.3.2 Surtensions .....5

I.3.3 Fluctuations de tension (papillotement) .....5

I.3.4 Variation de fréquence .....5

I.3.5 Déséquilibres du système triphasé de tension .....6

I.3.6 Perturbations harmoniques .....7

I.4 Caractérisation et normes .....7

I.4.1 Normes CEI .....8

I.4.2 Normes IEEE .....9

I.5 Solutions de dépollution des réseaux électriques .....11

I.5.1 Les méthodes classiques (Le filtrage passif) .....11

I.5.1.1 Classification des filtres passif .....12

I.5.1.1.1 Inductance anti-harmonique (ou filtre de barrage) ..... 12

I.5.1.1.2 Filtre passif amorti .....12

I.5.1.1.3 Filtre résonant .....13

# Sommaire .

---

I.5.2 Solutions modernes (Les filtres actifs) .....	13
I.5.2.1 Classification des filtres actifs .....	14
I.5.2.1.1 Filtrage actif parallèle (shunt) .....	14
I.5.2.1.2 Filtrage actif série .....	15
I.5.2.1.3 Filtre combiné parallèle-série .....	15
I.5.2.1.4 Filtrage hybride (mixte actif -passif) .....	16
I.5.3 Les convertisseurs propres .....	16
I.6 Conclusion .....	17

## Chapitre II

II.1 Introduction .....	18
II.2 Modélisation du pont redresseur triphasé à diodes .....	18
II.2.1 Calcul de la tension redressée .....	19
II.2.2 Calcul des courants d'entrée du redresseur .....	19
II.3 Modèle Matlab Simulink du pont redresseur triphasé à diodes « PD3 » .....	19
II.4 Résultats de simulation .....	21
II.4.1 Allure du courant absorbé par la phase 1 du redresseur triphasé à diodes .....	21
II.4.2 Analyse harmonique du courant absorbé par la phase 1 du redresseur triphasé à diodes.....	21
II.5 Résultats expérimentaux .....	22
II.5.1 Allure du courant expérimental absorbé par la phase 1 du redresseur triphasé à diodes .....	23
II.5.2 Analyse harmonique du courant expérimental absorbé par la phase 1 du redresseur triphasé à diodes.....	24
II.6 Comparaison des résultats expérimentaux et de simulation .....	25
II.7 Conclusion .....	25

## Chapitre III :

III.1 Introduction .....	27
--------------------------	----

## Sommaire .

---

III.2 Le principe du filtre passif .....	27
III.3 Les avantages et les inconvénients des filtres passifs.....	28
III.4 Dimensionnement des filtres passifs.....	29
III.4.1 Dimensionnements de la résistance $R_h$ .....	29
III.4.2 Dimensionnements de l'inductance $L_h$ et la capacité $C_h$ .....	29
III.5 paramètres de simulation .....	30
III.5.1 Modèle Matlab Simulink du filtre passif d'un pont redresseur triphasé à diodes ....	30
III.5.2 Résultats de simulation .....	31
III.5.2.1 Forme d'onde du courant avant le filtrage et son analyse harmonique .....	31
III.5.2.2 Forme d'onde du courant après filtrage de l'harmonique 5 et son analyse harmonique.....	32
III.5.3 Résultats expérimentaux .....	33
III.5.4 Comparaison entre les différents résultats .....	35
III.6 Conclusion .....	36

## Chapitre IV

IV.1 Introduction .....	37
IV.2 Principe du filtrage actif .....	37
IV.2.1 Identification des courants harmoniques .....	38
IV.2.1.1 Méthode des puissances instantanées .....	40
IV.2.2 Ploc de commande .....	42
IV.2.2.1 Commande par hystérésis .....	43
IV.2.2.2 Commande par MLI .....	43
IV.2.3 Le bloc onduleur .....	44
IV.2.4 Le bloc régulateur de tension du bus continu .....	44
IV.3 Onduleurs multi niveaux .....	45
IV.3.1 Principe de l'onduleur multiniveaux .....	45

## Sommaire .

---

IV.3.2 Modélisation des onduleurs à trois niveaux .....	45
IV.3.2.1 Schéma fonctionnel d'une phase d'un filtre actif à trois niveaux .....	45
IV.3.2.2 Calcul des tensions de sortie .....	46
IV.4 Rôle du filtre actif .....	46
IV.5 Paramètres de simulation :.....	47
IV.6 Modèle Matlab-Simulink du filtre actif .....	47
IV.6.1 Filtre actif commandé par Hystérésis .....	47
IV.6.2 Filtre actif commandé par MLI .....	48
IV.7 Résultats de simulation et interprétations .....	49
IV.7.1 Courant « is1 » avant filtrage .....	49
IV.7.2 Courant « is1 » après filtrage actif commandé par hystérésis .....	49
IV.7.2.1 Courant de référence ( $i_{ref1}$ ) et courant en sortie du filtre actif ( $i_{f1}$ ) .....	51
IV.7.3 Courant « is1 » après filtrage actif commandé par MLI .....	51
IV.7.3.1 Courant « is1 » après filtrage actif commandé par MLI à 1 Niveau .....	51
IV.7.3.2 Courant « ir1 » après filtrage actif multi-niveaux .....	53
IV.7.3.3 Courant de référence ( $i_{ref1}$ ) et courant en sortie du filtre actif ( $i_{f1}$ ) .....	55
IV.8 Conclusion .....	56

## Chapitre V

V.1 Introduction .....	57
V.2 Principe de fonctionnement d'un redresseur à MLI .....	57
V.2.1 Principe de l'obtention de l'absorption sinusoïdale .....	58
V.2.2 Principe de la commande à MLI .....	59
V.3 Modèle Matlab-Simulink du redresseur à MLI .....	61
V.3.1 Paramètres de simulation .....	62
V.3.2 Résultat de simulation .....	62
V.3.3 Interprétation des résultats .....	65

## Sommaire .

---

V.4 Conclusion .....65

Conclusion générale .....67

# **Introduction générale**

### Introduction générale :

Ces dernières années, Les convertisseurs statiques ont joué un rôle essentiel dans les systèmes de conversion d'énergie électrique en améliorant considérablement leurs performances et leur efficacité. En revanche, les convertisseurs statiques ont participé à la détérioration de la qualité du courant et de la tension des réseaux de distribution. En effet, ces systèmes consomment des courants non sinusoïdaux et ils se comportent comme des générateurs de courants harmoniques. Les déformations du courant et de la tension peuvent perturber le fonctionnement normal des équipements électriques.

C'est la raison pour laquelle les distributeurs d'énergie, qui doivent fournir une tension sinusoïdale, sont chargés de réduire les perturbations harmoniques générés par les installations de grande puissance. Les réglementations internationales récentes imposent aux consommateurs des limites de plus en plus sévères aux harmoniques produits par leurs systèmes, que ce soit en courant ou en tension.

Le respect des normes de la qualité de l'énergie électrique impose, si une charge non linéaire est connectée au réseau électrique, de concevoir un système qui restreint la dissipation des composantes harmoniques. Deux types de solutions sont envisageables. La première consiste à utiliser des convertisseurs statiques peu ou moins polluants, tandis que la seconde consiste à réaliser un filtrage des composantes harmoniques. La solution classique de filtrage consiste en l'utilisation de filtres passifs, et la solution moderne des harmoniques est auto-adaptable et est appelée filtrage actif. Le but de ces filtres est soit de piéger ces harmoniques soit de générer soit des courants, ou des tensions harmoniques de manière à compenser les perturbations responsables de la dégradation des performances des équipements et installations électriques.

L'objet de ce mémoire est de modéliser et de tester par simulation un ensemble composé d'une charge polluante et d'un dispositif de filtrage. Ce dispositif peut être un filtre passif ou un filtre actif. Le filtre actif que nous allons étudier est du type parallèle à simple niveau, puis nous généralisons son modèle à celui d'un filtre multiniveaux. Nous mettrons en évidence par simulation numérique les améliorations en termes de réduction de la pollution harmonique apportées par les filtres multiniveaux. Le mémoire lui-même se compose de cinq chapitres, dont nous présentons brièvement les contenus.

Dans le premier chapitre nous allons présenter des généralités sur les différentes sources de pollution des réseaux électriques et les différentes stratégies de dépollution. Nous présentons également les différentes normalisations à respecter concernant la pollution harmonique.

Le deuxième chapitre, sera réservé à l'élaboration d'un modèle sous Matlab Simulink d'une source polluante appelée « pont redresseur triphasé à diodes », qui est alimentée par une source de tension triphasée et qui alimente une charge résistive. Nous avons réalisé un banc d'essai expérimental afin de comparer les résultats de simulation avec les résultats expérimentaux et de confirmer la validité du modèle élaboré.

Dans le troisième chapitre, nous aborderons une première solution proposée pour résoudre le problème de la pollution harmonique, à savoir le filtrage passif. Le modèle Matlab-Simulink de l'ensemble source polluante et filtre passif sera développé. Nous nous limiterons au filtrage de l'harmonique de rang 5 qui est considéré comme prépondérant. Un banc d'essais expérimental sera réalisé, afin de comparer les résultats de simulation obtenus et valider le modèle du filtre passif.

Dans le quatrième chapitre, La modélisation d'un filtrage actif est abordée, offrant une solution contemporaine pour obtenir un filtrage de qualité. Cette dernière peut être améliorée en utilisant la technique multiniveaux. Un modèle du filtre actif sera développé sous environnement Matlab-Simulink, et des tests seront réalisés sur deux types de commandes : la commande à hystérésis et la commande à MLI. Pour mettre en évidence l'influence du pas de calcul, des tests par simulation sont conduits avec deux pas de calcul distincts  $10^{-5}$  s et  $10^{-6}$  s.

Dans ce chapitre, nous développons également le modèle Matlab-Simulink d'un filtre actif parallèle multiniveaux. Des tests par simulation seront conduits pour montrer l'apport de la technique multiniveaux dans l'amélioration de la qualité du filtrage. Les résultats de simulation seront présentés et interprétés.

Le cinquième chapitre sera consacré à la modélisation sous Matlab-Simulink d'un convertisseur propre qui absorbe un courant sinusoïdal, il s'agit du redresseur à MLI (Modulation de Largeurs d'Impulsions). Comme pour le filtre actif, nous pouvons améliorer les performances du redresseur à MLI par la technique multiniveaux. Ce chapitre exposera les résultats des tests par simulation pour le prouver.

Ce mémoire est clôturé par une conclusion générale.

# **Chapitre I**

## **Généralités sur la qualité de l'énergie et sur les perturbations harmoniques dans les réseaux électriques**

# Chapitre I : Généralités sur la qualité de l'énergie et sur les perturbations harmoniques dans les réseaux électriques.

---

## I.1 Introduction :

Le distributeur d'énergie doit fournir à l'ensemble de ses clients et utilisateurs une énergie de qualité sous forme de trois tensions sinusoïdales constituant un réseau triphasé équilibré ayant des valeurs d'amplitude et de fréquence préétablies en fonction du point de raccordement.

La qualité de cette énergie dépend de celle de la tension aux points de raccordement. Cependant, cette tension subit généralement des altérations durant son transport jusqu'à son arrivée chez le client, industriel ou particulier. Les origines de ces altérations sont liées à l'accroissement du nombre de convertisseurs statiques raccordés aux réseaux de distribution d'énergie, la plupart de ces appareils tels que les redresseurs, les gradateurs, le matériel informatique, les appareils de climatisation ou encore les éclairages à base de tubes fluorescents absorbent des courants non sinusoïdaux et consomment pour la plupart de la puissance réactive, ce qui provoque des distorsions harmoniques dans l'ensemble du réseau électrique. Ces harmoniques peuvent perturber le fonctionnement normal de certains équipements électriques voir même les endommager.

## I.2 Paramètres de la qualité de l'énergie électrique :

L'énergie électrique est fournie sous forme de tension constituant un système sinusoïdal triphasé dont la fréquence de base est de 50 Hz ou de 60 Hz, les paramètres caractéristiques sont les suivants :

- Les fluctuations.
- Le déséquilibre.
- La fréquence.
- La forme d'onde.

La qualité de l'énergie électrique peut être affectée par différents facteurs, à la fois liés aux incidents inhérents à la nature physique du système électrique et aux sujétions liées à l'exploitation du réseau, ainsi qu'aux caractéristiques des récepteurs électriques. [1]

Ces défauts se manifestent sous forme de différentes perturbations affectant un ou plusieurs des quatre paramètres précédemment définis. On a donc quatre possibilités distinctes de perturbation.

## I.3 Les perturbations électriques et leurs origines :

Les perturbations électriques affectant l'un des quatre paramètres cités précédemment peuvent se manifester par (un creux ou une coupure de tension, une fluctuation de tension, un déséquilibre du système triphasé de tension, une variation de la fréquence, la présence d'harmoniques et/ou d'inter harmoniques).

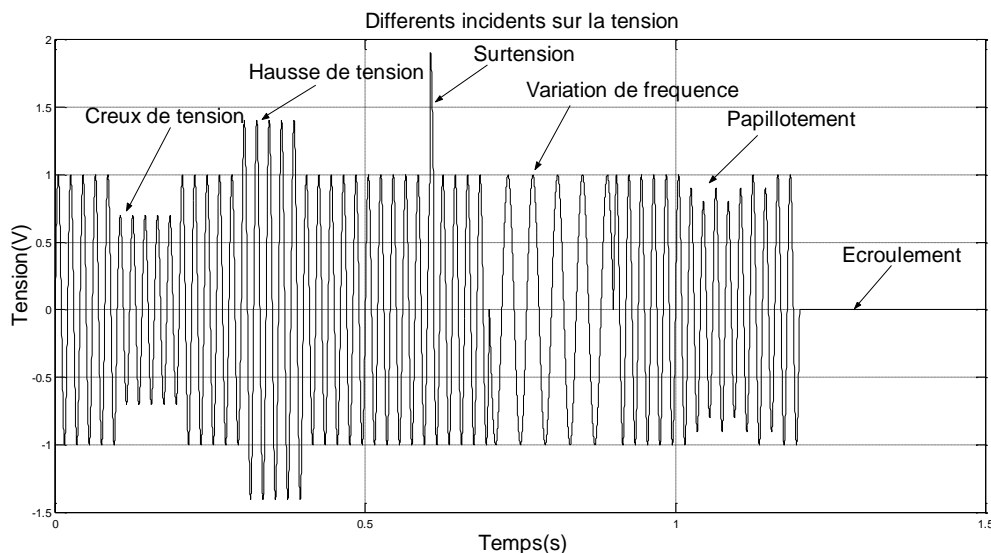


Figure I.1 : Différentes perturbations affectant la qualité d'énergie électrique.

### I.3.1 Creux et coupures de tension :

Le creux de tension est une baisse brusque de la tension électrique, survenant entre 10 % et 90 % de la tension nominale, pouvant durer de quelques millisecondes à plusieurs secondes. Ils sont causés par des phénomènes naturels comme la foudre ou des défauts dans les installations électriques. La plupart des appareils électriques tolèrent une coupure de moins de 10 ms, comme est montré dans la (Figure I.1), mais des creux plus longs peuvent perturber leur fonctionnement. Des dispositifs comme des régulateurs de tension ou des onduleurs sont utilisés pour atténuer les effets des creux de tension et protéger les équipements électriques sensibles. [2]

Une coupure de la tension est un cas particulier de creux de tension de profondeurs supérieures à 90% (norme IEEE 1159) ou 99 % (norme CEI-CENELEC EN 50160). [4]

Les paramètres caractéristiques d'un creux de tension sont : [4]

Sa diminution d'amplitude par rapport à sa tension nominale.

## Chapitre I : Généralités sur la qualité de l'énergie et sur les perturbations harmoniques dans les réseaux électriques.

---

Sa durée, définie comme le laps de temps pendant lequel la tension est baissée.

### **I.3.2 Surtensions :**

Une surtension est définie comme toute tension, en fonction du temps, qui dépasse la tension crête de régime permanent à sa tolérance maximale. Les surtensions peuvent se produire sous trois formes principales :

- Temporaires.
- Manœuvre.
- Origine atmosphérique (foudre).

### **I.3.3 Fluctuations de tension (papillotement) :**

Les fluctuations de tension sont des variations périodiques ou erratiques de l'enveloppe de la tension. Ce sont des variations brutales de l'amplitude de la tension situées dans une bande de  $\pm 10\%$  et se produisent sur un intervalle de temps de quelques centièmes de secondes.

Elles sont en particulier dues à la propagation sur les lignes du réseau de courants d'appel importants. L'origine principale de ces courants est le fonctionnement d'appareil dont la puissance absorbée varie de manière rapide, comme les fours à arc et des machines à souder.

Ces fluctuations se traduisent par des variations d'intensité, visible au niveau de l'éclairage causant une gêne visuelle perceptible pour une variation de 1 % de la tension (voir la Figure I.1). Ce phénomène de papillotement est appelé flicker. [1][4]

### **I.3.4 Variation de fréquence :**

Une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome. Au niveau des réseaux de distribution ou de transport, cette variation de la fréquence est très rare et n'est présentée que lors de circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle  $50\text{Hz} \pm 1\%$ . [3]

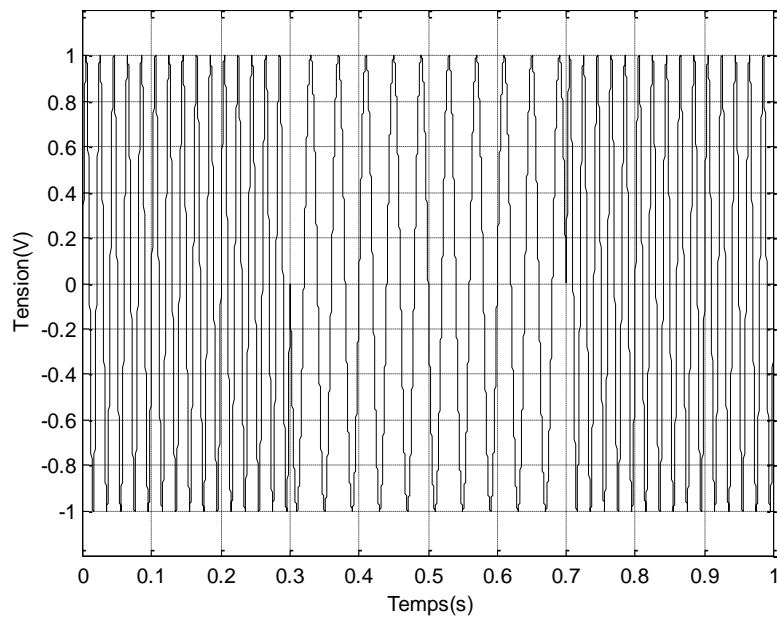


Figure I.2 : Variation de fréquence.

### I.3.5 Déséquilibres du système triphasé de tension :

Un système triphasé est déséquilibré lorsque les trois tensions ne sont pas égales en amplitude (figure I.3) et/ ou ne sont pas déphasées les unes par rapport aux autres de  $120^\circ$ .

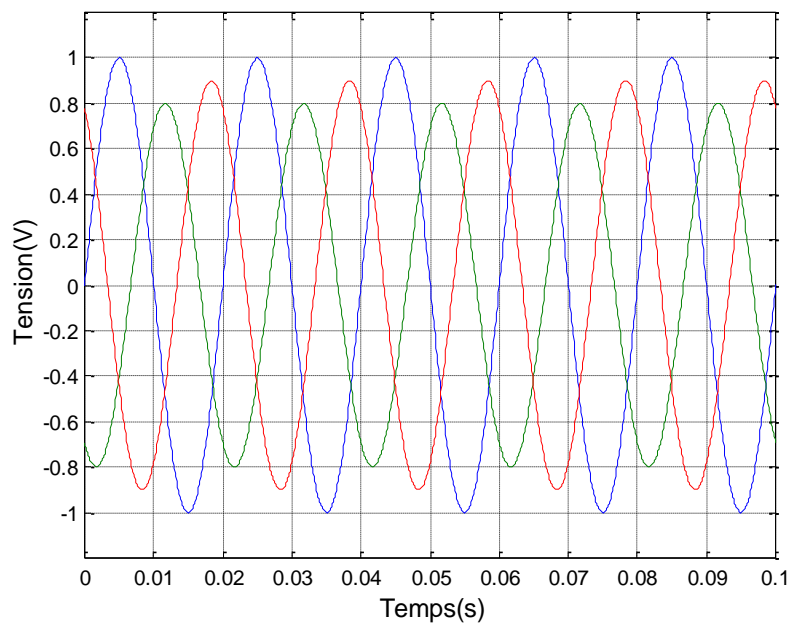


Figure I.3 : Déséquilibre des tensions d'un système triphasé.

### **I.3.6 Perturbations harmoniques :**

Selon la norme IEEE 519, un harmonique est une composante sinusoïdale d'une onde périodique ou une quantité ayant une fréquence qui est un multiple entier de la fréquence fondamentale. Le domaine des fréquences qui correspond à l'étude des harmoniques est généralement compris entre 100 Hz et 2000 Hz (entre les harmoniques de rangs  $h=2$  et  $h=40$ ). Il peut exister des inter-harmoniques. [5]

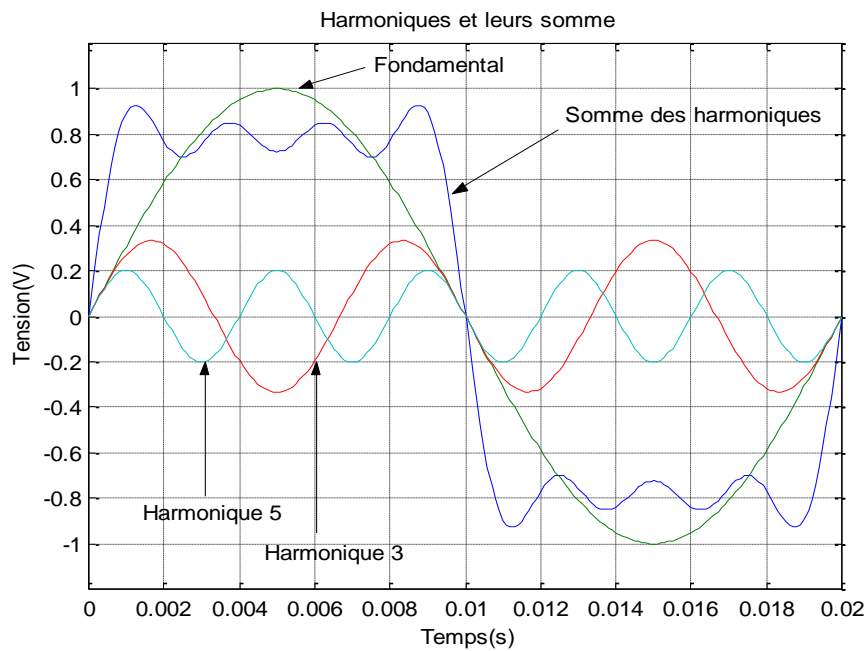


Figure I.4 : Onde déformée par les harmoniques.

L'harmonique de rang 1 est appelée la composante fondamentale du signal électrique périodique. L'harmonique de rang zéro correspond à la composante continue du signal. Les harmoniques de rang  $n$  ont une fréquence égale à  $n$  fois celle du fondamental.

Les premiers rangs harmoniques tel que (3, 5, 7) sont les plus gênants car ils ont souvent des amplitudes élevées et des fréquences relativement faibles donc ils sont difficiles à filtrer, raison pour laquelle il faut limiter ces harmoniques par des normes [6].

### **I.4 Caractérisation et normes :**

Les deux principaux organismes de normalisation internationaux dans le domaine électrotechnique sont la CEI (Commission Electrotechnique Internationale) et l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Ces deux organismes sont responsables de l'activité principale de normalisation dans le domaine des perturbations électriques à l'échelle mondiale

## Chapitre I : Généralités sur la qualité de l'énergie et sur les perturbations harmoniques dans les réseaux électriques.

et sont utilisées pour garantir l'interopérabilité et la qualité des produits dans le domaine électrique.

L'objectif principal des normes de la CEI et de l'IEEE est de limiter les dysfonctionnements causés par les harmoniques dans les systèmes et équipements électriques. [7]

### I.4.1 Normes CEI :

**La norme CEI 61000-3-2** : donne les limites en courants harmoniques pour les appareils de moins de 16A par phase, elle est représentée sur le tableau (I.1).

**La norme CEI 61000-3-4** : donne les limites d'émissions en courants harmoniques pour les appareils de plus de 16A par phase.

En effet, celles-ci fixent les niveaux d'émission harmonique en courant pour les appareils électrodomestiques et industriels, et constituant ainsi une base de référence pour comparer les valeurs efficaces relevées sur une installation électrique aux valeurs spécifiées par la norme. [8]

Range harmonique	Courant harmonique maximal admissible en ampères(A) classe D
Harmonique impairs	
3	2.3
5	1.14
7	0.77
11	0.33
13	0.21
$15 \leq n \leq 39$	$0.15 * 15 \div n$
Harmonique pairs	
2	1.08
4	0.43
6	0.30
$8 \leq n \leq 40$	$0.23 * 8 \div n$

Tableau I.1: Taux d'harmoniques spécifiés par la norme (CEI61000-3-2).

## Chapitre I : Généralités sur la qualité de l'énergie et sur les perturbations harmoniques dans les réseaux électriques.

**La norme CEI 61000-2-2** : elle définit les niveaux de comptabilité de tensions harmoniques sur les réseaux publics basse tension, elle est représentée sur le tableau I.2. Cette norme vise à protéger les équipements raccordés sur un réseau basse tension déformé.

Harmonique impairs				Harmonique pairs	
Non multiples de 3		multiples de 3			
Rang	Taux(%)	Rang	Taux(%)	Rang	Taux(%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
17	2	>21	0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			>12	0.2
25	1.5				
>25	$0.2+1.3*25/h$				

Tableau I.2: Limites des émissions de tensions harmoniques (la norme CEI 61000-2-2).

### I.4.2 Normes IEEE :

**IEEE 519- 1992** : (Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Power Systems), Cette norme détermine la procédure pour contrôler les harmoniques présents sur le réseau électrique ainsi que les limites recommandées de la pollution harmonique générée par les clients et de distorsion harmonique totale sur le réseau (voir tableau I.3, I.4) [9].

Tension au point de raccordement ( $V_n$ )	Distorsion Harmonique Individuelle (%)	THD $V_n$ (%)
$V_n \leq 69kV$	3.0	5.0
$69kV \leq V_n \leq 161kV$	1.5	2.5
$V_n > 161kV$	1.0	1.5

Tableau I.3 : Limite IEEE pour la distorsion harmonique de la tension.

**Chapitre I : Généralités sur la qualité de l'énergie et sur les perturbations harmoniques dans les réseaux électriques.**

V <sub>n</sub> ≤ 69Kv						
I <sub>cc</sub> /I <sub>ch</sub>	h ≤ 11	11 ≤ h ≤ 17	17 ≤ h ≤ 23	23 ≤ h ≤ 35	35 ≤ h	TDD
≤ 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	8.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0		0.52	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
69KV ≤ V <sub>n</sub> ≤ 161kv						
≤ 20	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20-50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50-100	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
100-1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0
V <sub>n</sub> > 161KV						
≤ 50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≥ 50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0

Tableau I.4 : Limite IEEE des émissions de courants harmoniques.

**IEEE 1159-1995** : (Recommended Practice on Monitoring Electric Power Quality), Cette norme réalise un bilan exhaustif et donne une définition de tous les phénomènes électromagnétiques qui ont lieu dans le réseau en fonction de leur contenu spectral, leur durée et leur amplitude (voir tableau I.5) .[10]

## Chapitre I : Généralités sur la qualité de l'énergie et sur les perturbations harmoniques dans les réseaux électriques.

		Durée	Magnitude de tension
Variations de courte durée			
Instantané	Creux	0.5 - 30 cycles	0.1 - 0.9 p.u
	Surtension	0.5 - 30 cycles	1.1 - 1.8 p.u
Momentané	Coupure.	0.5 cycles - 3s	0.1 < p.u
	Creux	30 cycles - 3s	0.1 - 0.9 p.u.
	Surtension	30 cycles - 3s	1.1 - 1.8 p.u
Temporaire	Coupure	3s – 1 min	< 0.1 p.u
	Creux	3s – 1 min	0.1 - 0.9 p.u
	Surtension	3s – 1 min	1.1 - 1.8 p.u
Variations de longue durée			
	Coupure longue	> 1 min	0.0 p.u.
	Surtension	> 1 min	0.8 – 0.9 p.u.
	Sous-tension	> 1 min	1.1 – 1.2 p.u

Tableau I.5 : Classification IEEE des perturbations électromagnétiques.

### III.5 Solutions de dépollution des réseaux électriques :

Les solutions visant à dépolluer les réseaux électriques peuvent être regroupées en deux catégories distinctes, les solutions traditionnelles et les solutions modernes.

#### III.5.1 Les méthodes classiques (Le filtrage passif) :

Les méthodes classiques de filtrage passif sont des techniques de filtrage qui utilisent des composants électroniques passifs, tels que des condensateurs, des inductances et des résistances, pour éliminer les harmoniques du réseau électrique. Il consiste à piéger les courants harmoniques pour les empêcher de se propager dans le reste du réseau.

Ce filtrage consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance de valeur très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau.

### **I.5.1.1 Classification des filtres passif :**

Parmi les dispositifs de filtrage les plus répandus, on distingue le filtre passif résonnant et le filtre passif amorti.

#### **I.5.1.1.1 Inductance anti-harmonique (ou filtre de barrage) :**

Cette première solution consiste à installer une inductance en série avec les condensateurs de compensation sur chaque branche monophasée

L'objectif principal de ce type de filtre est de protéger les batteries de condensateurs contre les surintensités causées par les harmoniques. En même temps, il réduit les tensions harmoniques aux bornes de ces condensateurs. Il permet souvent de réduire les valeurs d'impédance harmonique du réseau. Pour éviter toute résonance parallèle avec l'inductance du réseau, on accorde ces filtres à une fréquence inférieure à la première injection de courant harmonique (250 Hz en général). Il est également important de noter que l'installation d'inductances anti-harmoniques augmente la tension permanente à la fréquence fondamentale aux bornes des condensateurs, ce qui nécessite un dimensionnement approprié de ces condensateurs. [19]

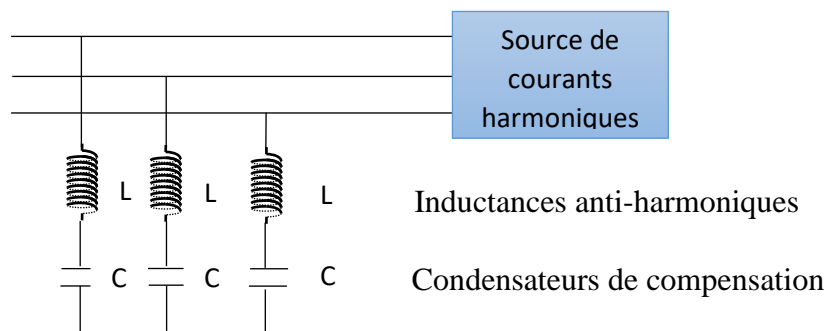


Figure I.5 : Raccordement des inductances anti-harmoniques.

#### **I.5.1.1.2 Filtre passif amorti :**

Le filtre amorti peut réduire le risque de résonance non souhaitée, et permet de réduire considérablement la taille du filtre passif, en fonctionnant sur une large gamme de fréquence. On distingue trois types de filtre amorti ; le filtre de premier ordre est très peu utilisé car il exige une grande capacité et provoque des pertes de puissance élevées. Les filtres de deuxième et troisième ordres sont plus performants [11].

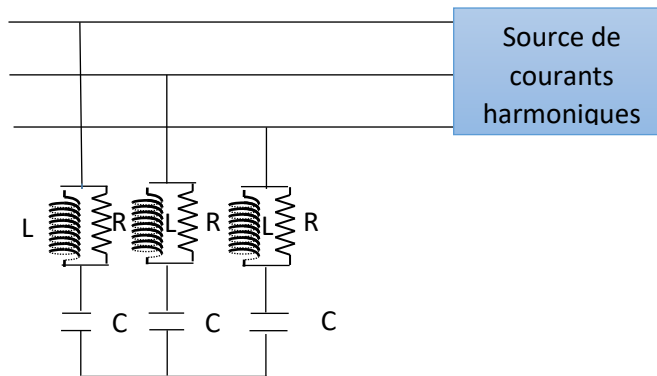


Figure I.6 : Filtre passif amorti

### I.5.1.1.3 Filtre résonant :

Le filtre passif résonnant est constitué d'un circuit résonnant composé d'un condensateur et d'une inductance en série accordés sur la fréquence de l'harmonique que l'on veut éliminer. Ce filtre possède une impédance faible pour l'harmonique concerné et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau. [12]

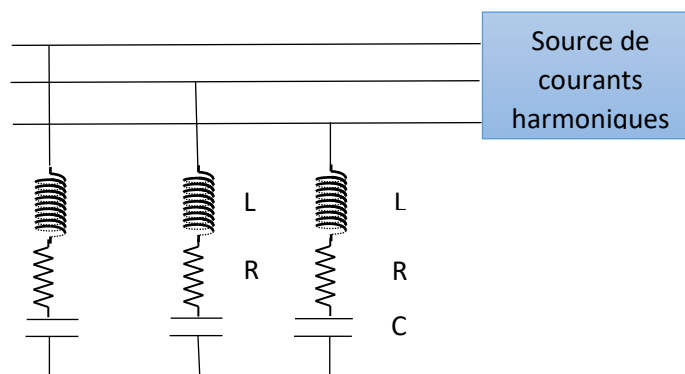


Figure I.7 : Filtre passif résonnant

### I.5.2 Solutions modernes (Les filtres actifs) :

Ces solutions sont proposées comme des solutions efficaces de dépollution des réseaux électriques afin de traiter les inconvénients inhérents aux solutions traditionnelles comme les filtres passifs.

Le principe du filtrage actif est de compenser les harmoniques présents sur les réseaux électriques en injectant des harmoniques de même amplitude mais en opposition de phase.

### **I.5.2.1 Classification des filtres actifs :**

Dans la littérature il existe une grande variété de types de filtres actifs. Ils sont classés de différentes manières selon le nombre de phases « monophasés ou triphasés », la technologie de l'onduleur « avec ou sans neutre raccordé », et la topologie « l'onduleur de tension ou de courant ». [13]

#### **I.5.2.1.1 Filtrage actif parallèle (shunt) :**

Il est placé en parallèle avec la charge. On parle alors de filtre shunt ou parallèle. Il existe deux types de fonctionnement pour un filtre actif parallèle :

- Compensation de courants harmoniques : Le filtre actif parallèle compensateur de courant injecte un courant qui s'oppose au courant harmonique émis par la charge. L'ensemble charge/filtre se présente sur le réseau comme une charge qui absorbe un courant sinusoïdal. Le dimensionnement du filtre actif dépend du courant harmonique à fournir.
- Compensation de tensions harmoniques : Le filtre actif parallèle compensateur de tension a pour rôle de maintenir sinusoïdale la tension à ses bornes, c'est-à-dire du côté de la charge. Le filtre actif injecte un courant harmonique au travers de l'impédance  $Z_s$  de façon à créer à ses bornes une chute de tension harmonique qui permet de régler la tension harmonique aux bornes de la charge. Cette stratégie de filtrage convient lorsque l'impédance de ligne  $Z_s$  est suffisamment grande. En effet, le dimensionnement en courant du filtre actif dépend du rapport : tension -source / impédance -source. [14]

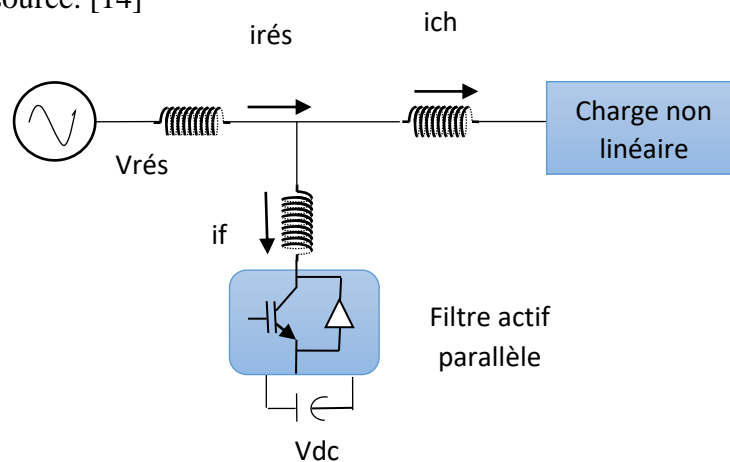


Figure I.8 : Filtre actif parallèle.

### I.5.2.1.2 Filtrage actif série :

Le filtre actif fonctionnant en compensateur de tension fournit une tension qui s'oppose à la tension harmonique du côté de la source et à la chute de tension harmonique due à la charge non linéaire. Il permet de limiter la tension harmonique aux bornes de la charge. [14]

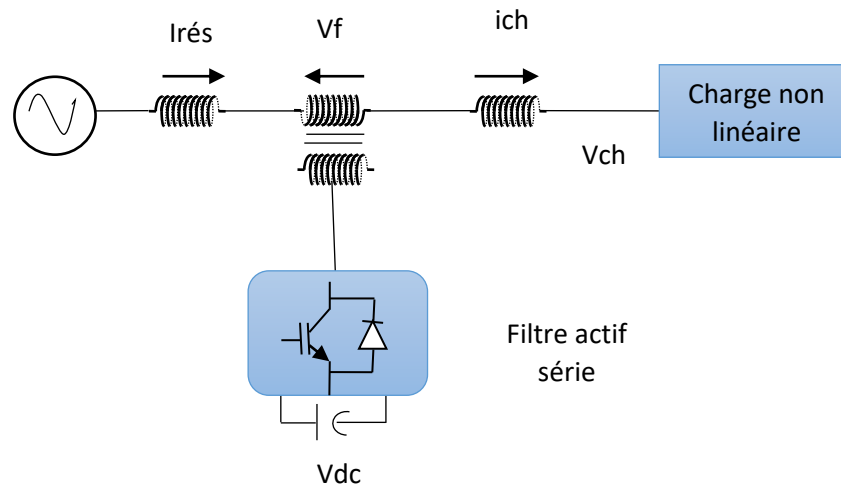


Figure I.9 : Filtre actif série.

### I.5.2.1.3 Filtre combiné parallèle-série :

Ce type de dispositif, principalement la combinaison de deux filtres actifs série et parallèle partageant la même capacité sur le bus continu, offre une solution puissante pour réguler la tension du réseau et éliminer les harmoniques. Il est considéré comme très efficace pour toutes les tâches de conditionnement de puissance. Cependant, son coût élevé et la complexité des commandes des nombreux interrupteurs limitent son utilisation à des applications critiques telles que l'équipement médical. [16]

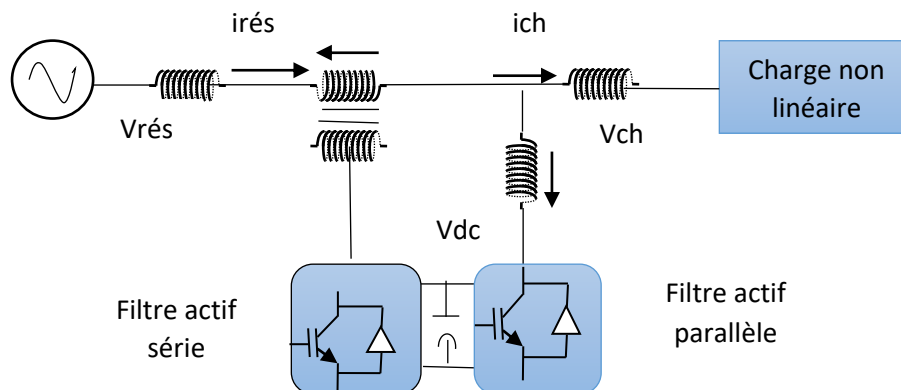


Figure I.10 : Filtre combine parallèle-série.

#### I.5.2.1.4 Filtrage hybride (mixte actif -passif) :

Le filtrage mixte ou hybride résulte de l'association d'un filtre passif et d'un filtre actif. L'intérêt des filtres mixtes est que le filtre passif prend en charge la compensation d'une grande partie des harmoniques, le filtre actif maintient les performances de filtrage en fonction de l'évolution de la charge et du réseau. Ainsi la puissance du convertisseur qui constitue le filtre actif est fortement diminuée grâce aux éléments passifs. [15]

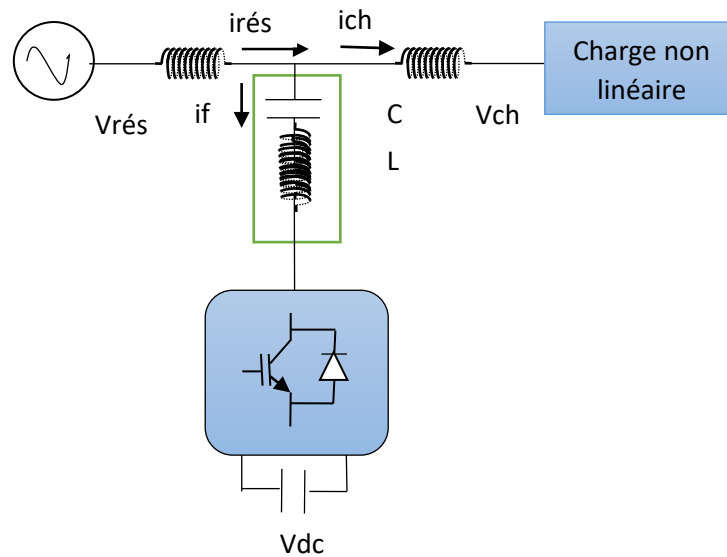


Figure I.11: Filtre actif hybride.

#### I.5.3 Les convertisseurs propres :

Les convertisseurs propres sont des dispositifs qui visent à réduire les harmoniques et à améliorer la qualité de l'énergie électrique. Ils peuvent être de deux types : les convertisseurs propres qui réduisent le courant à son seul fondamental pour un prélèvement sinusoïdal, et les compensateurs actifs qui annulent globalement les harmoniques au point de couplage. Ces convertisseurs utilisent des techniques telles que la modulation de largeur d'impulsion (MLI) pour contrôler le flux d'énergie électrique et garantir un fonctionnement plus efficace et durable des systèmes électroniques. En outre, les convertisseurs propres jouent un rôle crucial dans l'optimisation de l'utilisation de l'énergie électrique, contribuant ainsi à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et à la transition énergétique. [17]

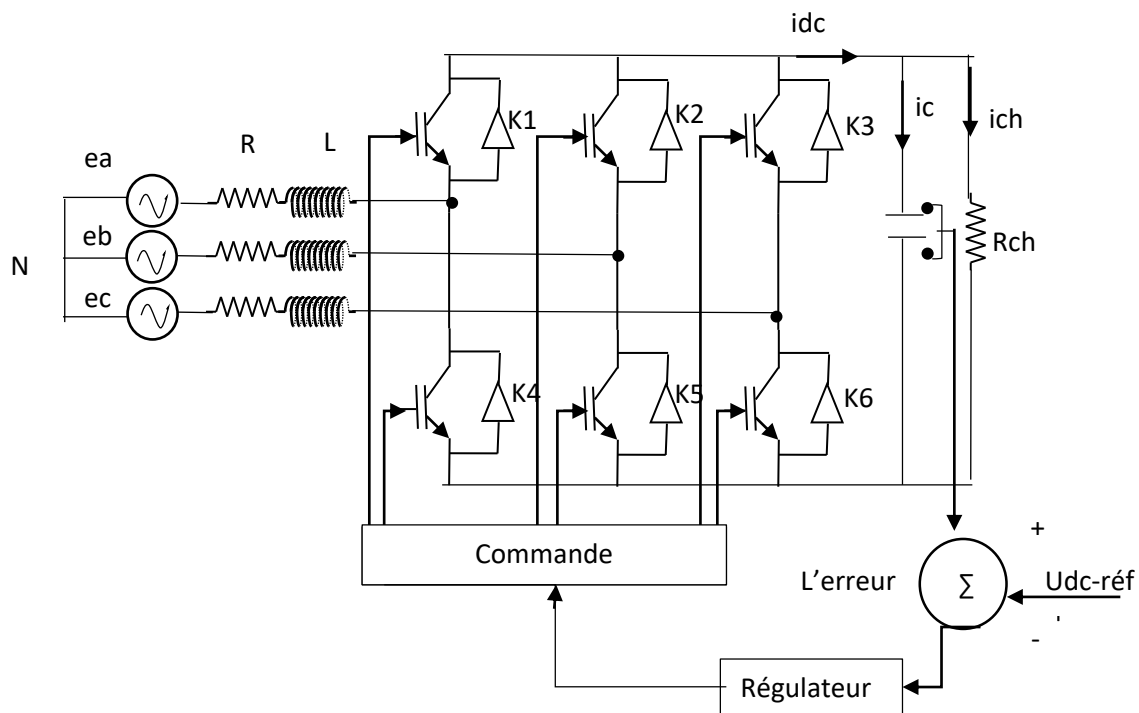


Figure I.12 : Redresseur triphasé de tension à MLI.

### I.6 Conclusion :

Le chapitre présenté aborde les problèmes de pollution du réseau électrique causés par les charges non-linéaires, qui injectent des courants non-sinusoïdaux, notamment des harmoniques. Ces charges perturbent la qualité de l'énergie électrique en introduisant des harmoniques supérieures. Afin de pallier à ces problèmes, des réglementations imposent aux utilisateurs tertiaires et domestiques de limiter la prolifération des harmoniques dans le réseau électrique.

Cependant, pour faire face à ces problèmes de perturbations, nous avons présenté des solutions de dépollution des réseaux électriques par différents types de filtrage.

Dans le prochain chapitre, nous aborderons en détail le modèle et les caractéristiques spécifiques d'une charge polluante bien connue sous le nom de « pont redresseur à diodes ».

# **Chapitre II**

## **Modélisation du pont redresseur à diodes**

### II.1 Introduction :

Ce Chapitre sera consacré à l'élaboration d'un modèle sous Matlab Simulink d'un pont redresseur triphasé à diodes alimenté par une source de tension triphasée et alimentant une charge résistive.

Un banc d'essai expérimental est réalisé pour comparer les résultats de simulation et les résultats expérimentaux et valider le modèle construit.

Le redresseur à diodes ainsi construit constituera la charge polluante génératrice d'harmoniques. Nous allons effectuer une analyse harmonique du courant absorbé par ce redresseur pour connaître les amplitudes et les phases de tous les harmoniques et pour pouvoir apporter différentes solutions que nous présenterons dans les prochains chapitres.

### II.2 Modélisation du pont redresseur triphasé à diodes :

Le montage de la figure II.1 représente un pont redresseur triphasé à diodes alimenté par une source de tension triphasée et alimentant une charge il est communément appelé montage à commutation parallèle PD3.

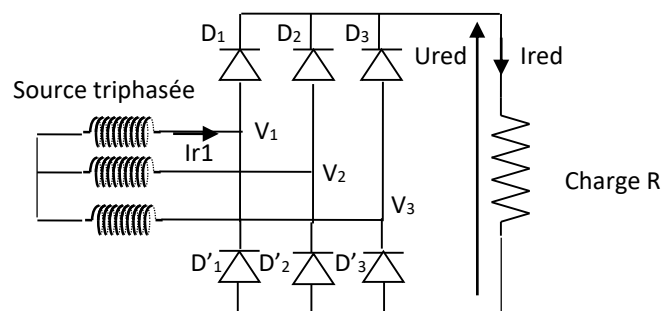


Figure II.1 : Pont redresseur triphasé à diodes « PD3 »

La tension  $U_{red}$  est à chaque instant, égale à la différence entre la plus positive et la plus négative des tensions d'alimentation. Ce montage effectue donc un double choix. Les diodes  $D_1$ ,  $D_2$  et  $D_3$  conduisent le sens positif du courant et les diodes  $D'_1$ ,  $D'_2$  et  $D'_3$  conduisent le retour (le sens négatif). A chaque instant, il y a toujours deux diodes qui conduisent, une diode du haut et une diode du bas.

### II.2.1 Calcul de la tension redressée

Si :

- $V_1 > V_2 > V_3$ , alors  $D_1$  et  $D'_3$  conduisent et  $U_{red} = V_1 - V_3$
- $V_1 > V_3 > V_2$ , alors  $D_1$  et  $D'_2$  conduisent et  $U_{red} = V_1 - V_2$
- $V_2 > V_1 > V_3$ , alors  $D_2$  et  $D'_3$  conduisent et  $U_{red} = V_2 - V_3$
- $V_2 > V_3 > V_1$ , alors  $D_2$  et  $D'_1$  conduisent et  $U_{red} = V_2 - V_1$
- $V_3 > V_2 > V_1$ , alors  $D_3$  et  $D'_1$  conduisent et  $U_{red} = V_3 - V_1$
- $V_3 > V_1 > V_2$ , alors  $D_3$  et  $D'_2$  conduisent et  $U_{red} = V_3 - V_2$

La tension redressée vaut donc à tout instant la différence entre la tension maximale et la tension minimale du réseau.

### II.2.2 Calcul des courants d'entrée du redresseur

$$i_{r1} = (D_1 - D'_1) i_{red} \quad ; \quad i_{r2} = (D_2 - D'_2) i_{red} \quad ; \quad i_{r3} = (D_3 - D'_3) i_{red}$$

$D_1, D_2, D_3, D'_1, D'_2$  et  $D'_3$  sont des variables logiques qui valent 1 si la diode correspondante conduit et 0 si elle est bloquée.

### II.3 Modèle Matlab Simulink du pont redresseur triphasé à diodes « PD3 » :

Le modèle Matlab Simulink du pont redresseur triphasé à diodes « PD3 » est représenté dans la figure II.2 ci-dessous.

## Chapitre II : Modélisation du pont redresseur à diodes.

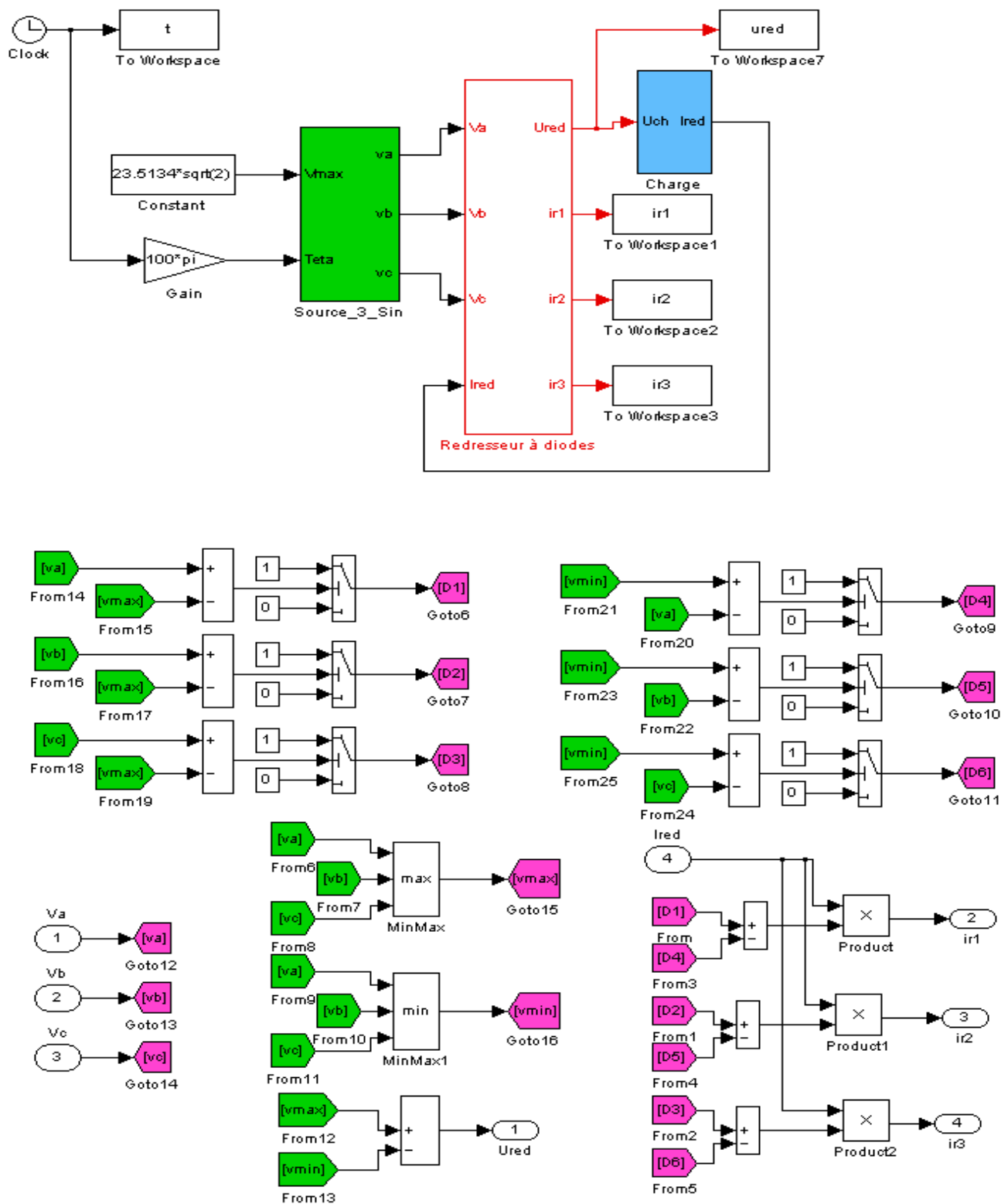


Figure II.2 : Modèle Matlab Simulink du pont redresseur triphasé à diodes « PD3 »

### II.4 Résultats de simulation :

#### II.4.1 Allure du courant absorbé par la phase 1 du redresseur triphasé à diodes :

Le modèle Matlab Simulink de la figure II.2 est exécuté avec les mêmes paramètres que ceux du banc d'essai expérimental réalisé et qui sera décrit dans le paragraphe II.4 suivant. Ceci est dans le but de comparer les résultats de simulation et les résultats expérimentaux et valider ainsi le modèle construit.

La figure II.3 représente le courant absorbé par la phase 1 du redresseur triphasé à diodes.

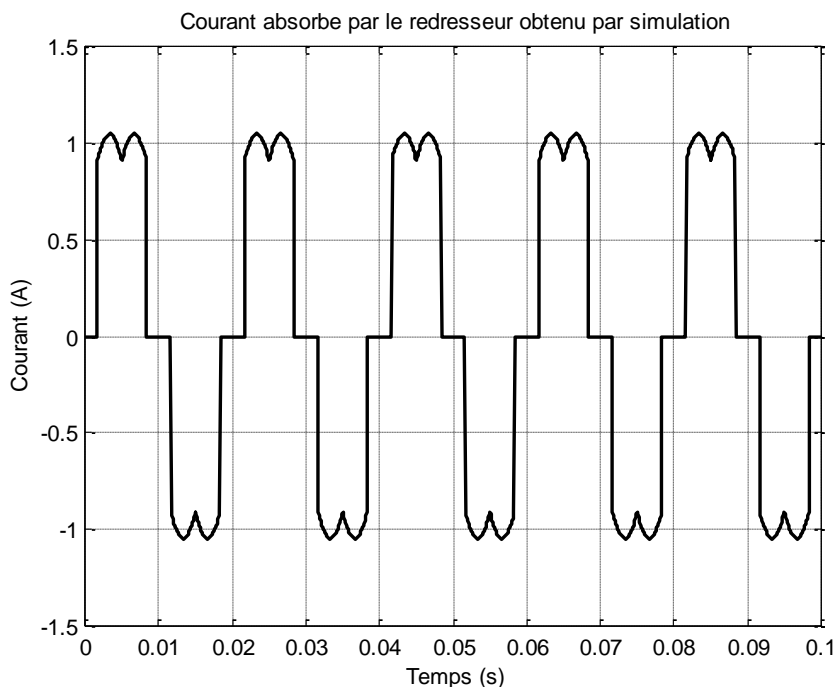


Figure II.3 : Courant absorbé par la phase 1 du redresseur triphasé à diodes

#### II.4.2 Analyse harmonique du courant absorbé par la phase 1 du redresseur triphasé à diodes :

La figure II.4 représente le résultat de l'analyse harmonique effectuée sur le courant absorbé par la phase 1 du redresseur triphasé à diodes, obtenu par simulation.

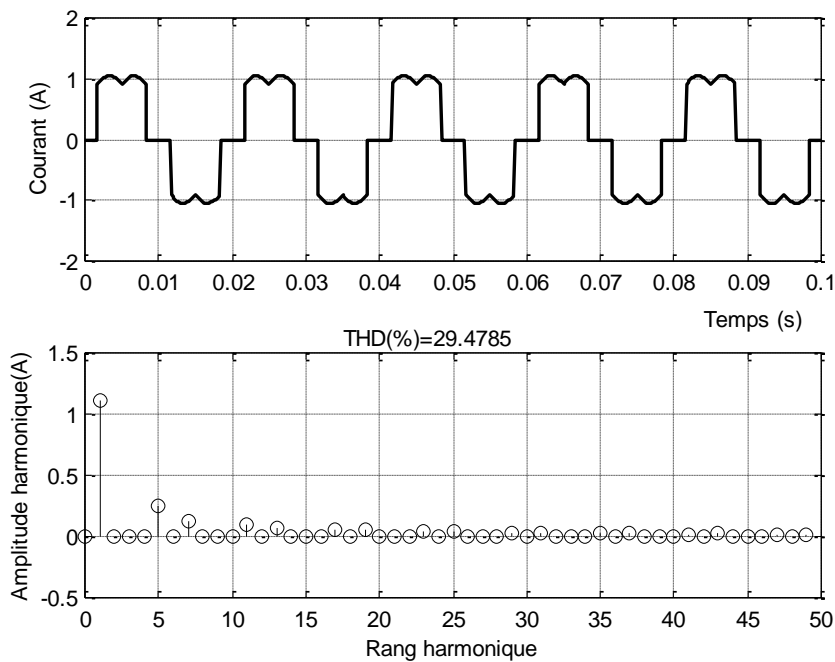


Figure II.4 : Analyse harmonique du courant absorbé par la phase 1 du redresseur triphasé à diodes.

Les figures II.3 et II.4 montrent respectivement l'allure du courant absorbé par la phase 1 du redresseur triphasé à diodes et son analyse harmonique. Ces deux figures montrent que ce courant est loin de la forme sinusoïdale parfaite, mais il est riche en harmoniques. Le tableau II.1 ci-dessous montre que les harmoniques prépondérants sont les rangs 5,7,11,13,17 et 19.

Rang	1	5	7	11	13	17	19
Amplitude (A)	1.1074	0.2467	0.1276	0.0964	0.0737	0.0586	0.0519
Phase (°)	-89.9830	90.0919	90.1263	-89.7997	-89.7653	90.3039	90.3440

Tableau II.1 : Amplitudes et phases des harmoniques du courant absorbé par la phase 1 du redresseur triphasé à diodes.

### II.5 Résultats expérimentaux :

Le banc d'essai expérimental réalisé au sein du Laboratoire des Technologies Avancées du Génie Electrique (LATAGE), l'équipe 2 « commande des machines et qualité de l'énergie » est montré dans la figure II.6 ci-dessous.

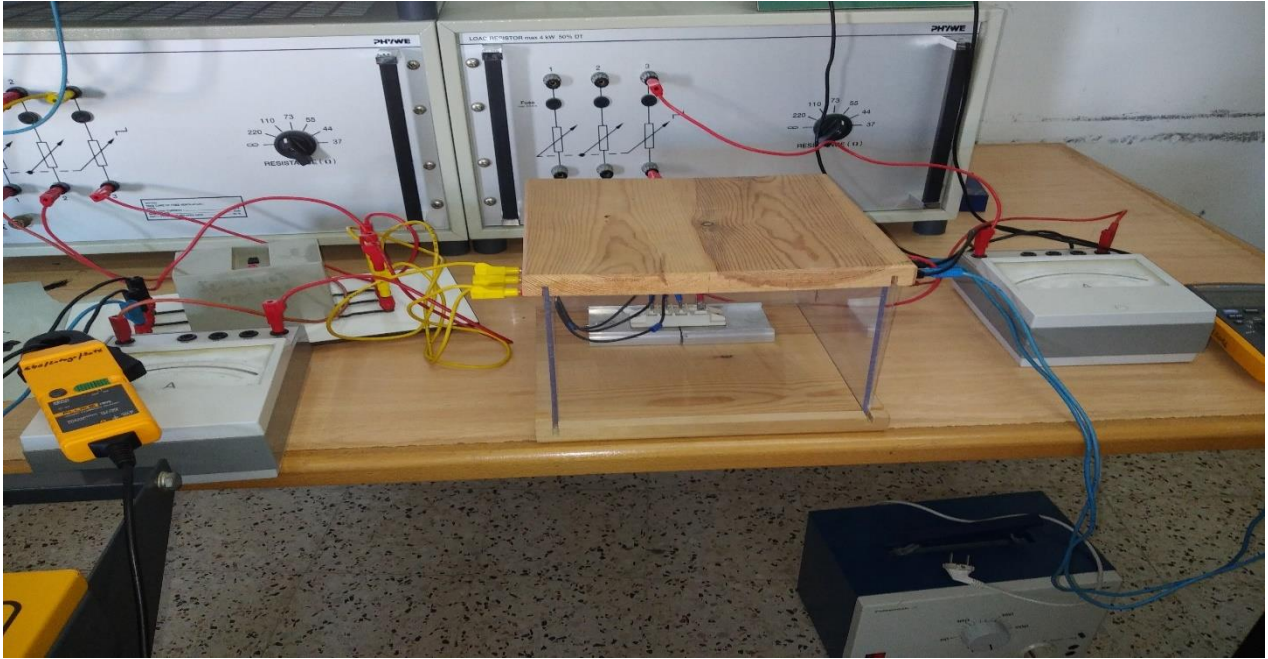


Figure II.5 : Photographie du banc expérimental réalisé.

### II.5.1 Allure du courant expérimental absorbé par la phase 1 du redresseur triphasé à diodes :

La figure II.6 représente le courant expérimental absorbé par la phase 1 du redresseur triphasé à diode.

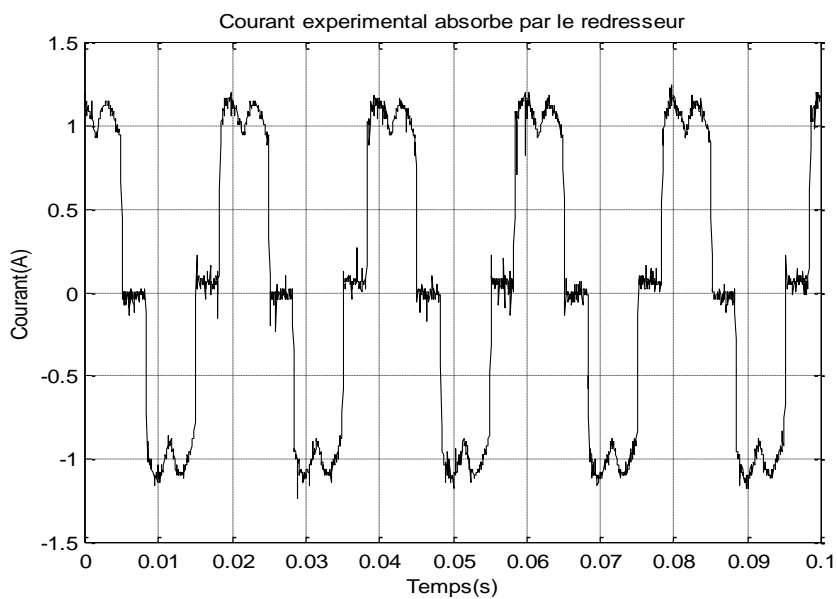


Figure II.6 : Courant expérimental absorbé par la phase 1 du redresseur triphasé à diode.

### II.5.2 Analyse harmonique du courant expérimental absorbé par la phase 1 du redresseur triphasé à diodes.

La figure II.7 représente le résultat de l'analyse harmonique effectuée sur le courant absorbé par la phase 1 du redresseur triphasé à diodes, obtenu expérimentalement.

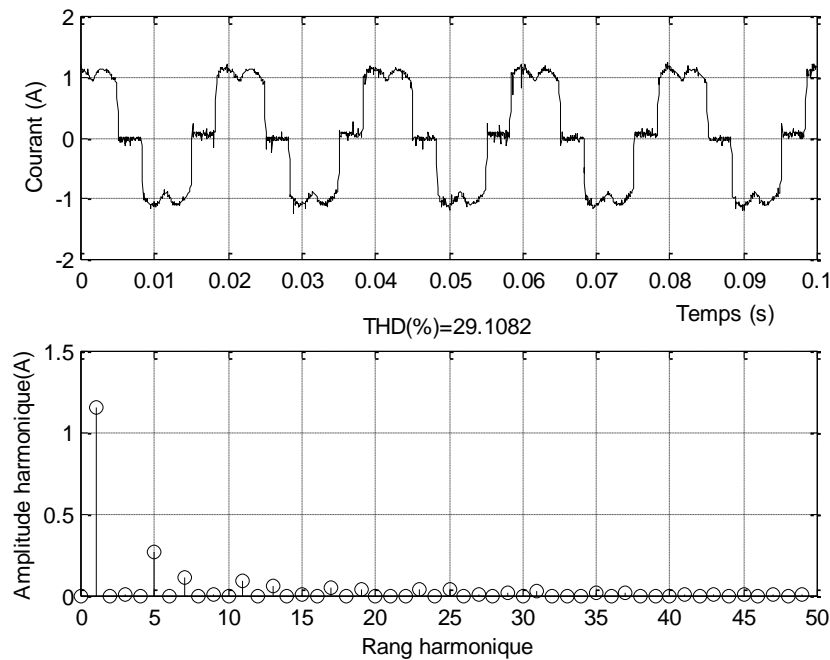


Figure II.7 : Analyse harmonique du courant expérimental absorbé par la phase 1 du redresseur triphasé à diodes.

Le tableau II.2 ci-dessous montre que les harmoniques prépondérants du courant obtenus par expérience sont comme dans le cas théorique, les rangs 5,7,11,13,17 et 19.

Rang	1	5	7	11	13	17	19
Amplitude (A)	1.1512	0.2705	0.1169	0.0984	0.0672	0.0562	0.0466
Phase (°)	-27.6624	35.8901	143.2108	-146.058	-29.4672	34.7843	150.9916

Tableau II.2 : Amplitudes et phases des harmoniques du courant expérimental absorbé par la phase 1 du redresseur triphasé à diodes.

### **II.6 Comparaison des résultats expérimentaux et de simulation :**

Les résultats des figures II.3 et II.6 montrent que les allures des courants expérimentaux et de simulation absorbés par le redresseur triphasé à diodes sont proches les uns des autres. Les résultats des analyses harmoniques des figures II.4 et II.7 et des tableaux II.1 et II.2 montrent également qu'ils sont très proches, ils affichent tous les deux un THD de 29 %. Cette comparaison valide le modèle Matlab Simulink du redresseur construit et constitue donc la charge polluante à dépolluer dans les prochains chapitres.

### **II.7 Conclusion :**

Ce chapitre a été consacré au développement d'un modèle sous Matlab Simulink d'un pont redresseur triphasé à diodes alimenté par une source triphasée et alimentant une charge résistive. Le modèle construit est validé en comparant les résultats de simulation et les résultats expérimentaux.

Le modèle construit servira de base aux chapitres suivants puisqu'il constituera la charge polluante génératrice d'harmoniques à dépolluer par différentes techniques.

## **Chapitre III**

# **Filtrage passif des harmoniques généérés par le redresseur à diodes**

### III.1 Introduction :

Comme l'avons indiqué dans le chapitre précédent, le courant consommé par un pont redresseur triphasé à diodes est non sinusoïdal, ce courant est riche en harmoniques, dont l'harmonique de rang 5 qui est le prépondérant.

La pollution harmonique fait référence à la présence indésirable de composantes de fréquences de la fréquence fondamentale dans un système électrique. L'analyse harmonique effectuée par la fonction « FFT analysis » de l'outil de la bibliothèque Simulink « powergui » a montré que le courant absorbé par un pont redresseur triphasé à diodes contient les harmoniques des rangs « 5,7,11,13,17,19 ». Les autres harmoniques ont des amplitudes très faibles et peuvent être négligés.

Dans ce chapitre, nous allons dimensionner, modéliser et tester par simulation le filtre passif et nous le metrons en œuvre afin d'éliminer l'harmonique d'ordre 5 du courant absorbé par le redresseur à diodes. Nous avons réalisé au sein de l'équipe N°2 du Laboratoire des Technologies Avancées du Génie Electrique un banc d'essai de filtrage passif que nous avons dimensionné pour filtrer l'harmonique de rang 5. Le banc d'essais réalisé est montré dans la figure III.05. Nous avons réalisé un test par simulation dans les mêmes conditions que l'expérience pour pouvoir comparer les résultats de simulation et les résultats expérimentaux et valider le modèle de filtre passif construit.

### III.2 Le principe du filtre passif :

Le principe du filtrage passif consiste à insérer généralement des circuits électriques composés d'éléments passifs RLC (résistance, inductance, capacité). Ces filtres sont placés en parallèle avec la charge à dépolluer, comme illustré sur la figure III.1. Le principe du filtre passif est de modifier localement l'impédance du réseau, de façon à dévier les courants et à éliminer un seul harmonique.

Donc avant le choix des éléments constituant le filtre passif et leur dimensionnement, une connaissance précise des rangs harmoniques qui devront être filtrés et des atténuations requises est nécessaire à la réalisation d'un filtre. Une telle étude est généralement menée à l'aide d'un logiciel de simulation Matlab, on installe souvent plusieurs filtres résonants en parallèle, correspondant aux différents rangs harmoniques à filtrer [19][20].

## Chapitre III : Filtrage passif des harmoniques générés par le redresseur à diodes.

Nous avons choisi d'utiliser un filtre résonant constitué d'un circuit RLC série, parce que nous disposons dans notre laboratoire tous les éléments pour le réaliser. Nous l'avons dimensionné afin d'éliminer l'harmonique d'ordre 5.

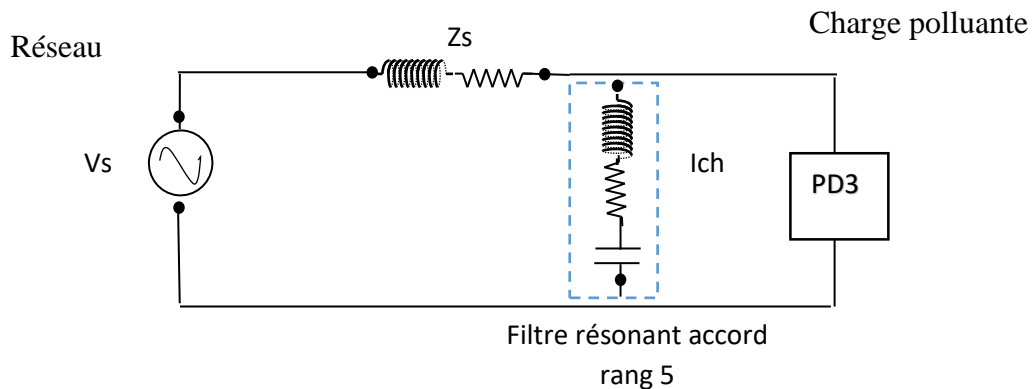


Figure III.1 : filtrage passif des harmoniques.

### III.3 Les avantages et les inconvénients des filtres passifs :

Le filtrage passif est très utilisé dans l'industrie en raison de son faible coût, de son efficacité et de sa capacité à s'adapter aux réseaux de forte puissance. Il a fait ses preuves et est largement utilisé dans de nombreux secteurs industriels.

Le filtrage passif a largement été éprouvé en milieu industriel et à donner généralement satisfaction. Il a cependant quelques limites.

- L'impédance du réseau en présence des filtres peut faire apparaître des résonances.
- Il est sélectif, ainsi si on souhaite atténuer plusieurs rangs d'harmoniques, plusieurs types sont nécessaires, ce qui cause des problèmes en termes d'encombrement.
- Dans le cas d'une installation soumise à des variations importantes de fréquence et de puissance, les filtres passifs ne sont pas adaptés. Ils doivent être à large bande, ce qui complique leurs réalisations et augmente les pertes, la puissance, le volume et le coût.
- L'implantation de filtres passifs sur un réseau nécessite une étude poussée et précise. En outre, il n'est pas toujours possible de connaître tous les paramètres du réseau, nécessaires à l'étude, lorsqu'il est de grande dimension.

Finalement, l'amortissement de la résonance dans les systèmes de puissance par les filtres passifs peut introduire des résonances additionnelles indésirables pouvant conduire à la destruction de ces filtres. [14] [21]

### III.4 Dimensionnement des filtres passifs :

Chaque filtre passif est conçu pour éliminer un seul harmonique. Chaque filtre est dimensionné pour absorber un courant d'amplitude égale à l'amplitude de l'harmonique à éliminer. La fréquence de chaque filtre est réglée pour résonner à la fréquence de l'harmonique à éliminer. Si nous avons une résonance sur une phase, écrivons l'équation complexe pour le cas monophasé, étant donné que le même calcul s'applique pour les autres phases à un angle de 120 degré près. Appelons « h » l'ordre de l'harmonique à éliminer, dans notre cas c'est l'ordre 5 et écrivons la loi d'Ohm pour une seule phase d'un filtre passif.

A la fréquence de résonance du filtre, l'impédance est très faible, elle est égale à celle de la résistance uniquement.

$$\vec{V}_a = \left\{ R_h + j \left( L_h \cdot h \cdot \omega - \frac{1}{C_h \cdot h \cdot \omega} \right) \right\} \cdot \vec{I}_{ha} \quad (\text{III.1})$$

Cela veut dire que :

$$L_h \cdot h \cdot \omega - \frac{1}{C_h \cdot h \cdot \omega} = 0 \Rightarrow C_h = \frac{1}{L_h \cdot h^2 \cdot \omega^2} \quad (\text{III.2})$$

#### III.4.1 Dimensionnements de la résistance $R_h$ :

La résistance  $R_h$  est dimensionnée comme suit :

$$R_h = \frac{\vec{V}_a}{\vec{I}_{ha}} \quad (\text{III.3})$$

Il suffit de diviser l'amplitude de la tension du réseau sur l'amplitude du courant harmonique à éliminer.

#### III.4.2 Dimensionnements de l'inductance $L_h$ et la capacité $C_h$ :

On fixe l'une et déduit l'autre en vertu de l'équation de la résonance.

On fixe  $C_h$  et on déduit  $L_h$  par la relation :

$$L_h = \frac{1}{C_h \cdot h^2 \cdot \omega^2} \quad (\text{III.4})$$

### III.5 paramètres de simulation :

Les paramètres du modèle Matlab-Simulink de la figure III.02 sont identiques à ceux du banc d'essai expérimental présenté dans la figure III.05, dont les paramètres sont présentés dans le tableau III.1 ci-dessous. Cela vise à comparer les résultats de simulation avec les résultats expérimentaux et ainsi confirmer la validité du modèle élaboré.

Alimentation	Fréquence $f_s$ [Hz]	50
	Résistance $R_s$ [ $\Omega$ ]	0.16
	Inductance $L_s$ [mH]	45
Filtre	Tension $V_f$ [v]	23.5134
	Capacité $C_f$ [ $\mu$ F]	120
	Inductance $L_f$ [mH]	9
Charge	Résistance $R_c$ [ $\Omega$ ]	55

Tableau III.1 : Paramètres du système étudié.

#### III.5.1 Modèle Matlab Simulink du filtre passif d'un pont redresseur triphasé à diodes :

La figure III.02 ci-dessous présente le modèle Matlab Simulink de l'ensemble composé d'un pont redresseur triphasé à diodes représentant la charge polluante et d'un filtre passif composé d'un circuit RLC série représentant un filtre résonnant. Ce filtrage est utilisé pour purifier les courants absorbés par la charge. Comme nous pouvons le constater, nous avons utilisé un seul filtre passif pour éliminer l'harmonique d'ordre 5.

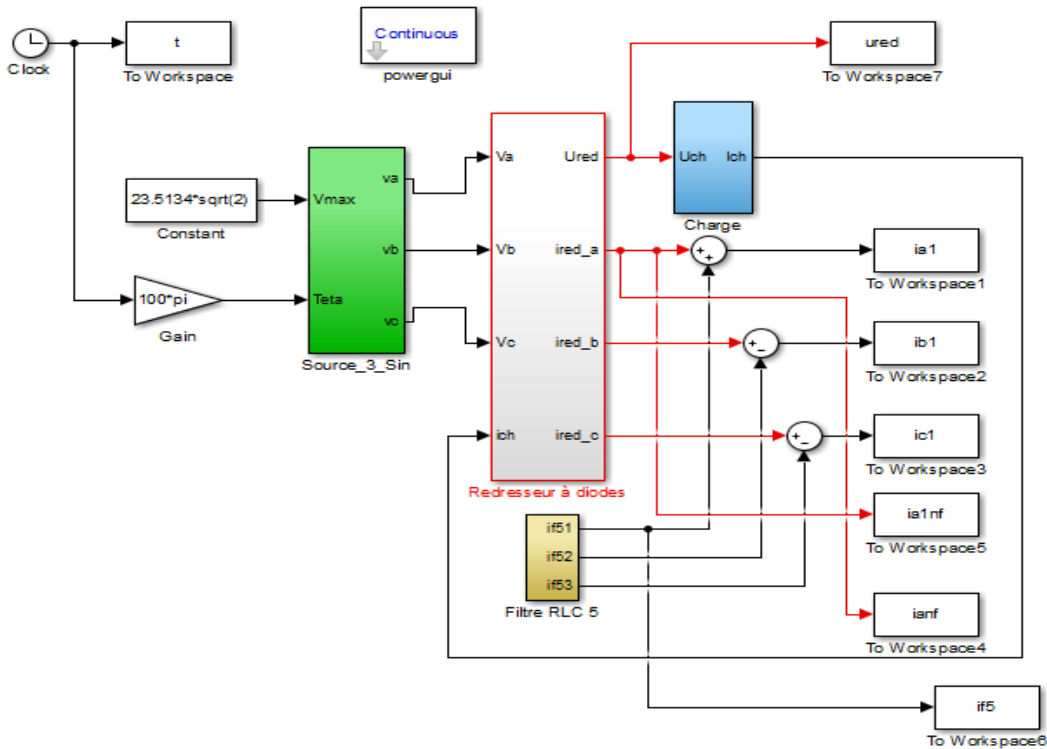


Figure III.2 : schéma Matlab-Simulink du modelé de l'ensemble redresseurs-filtre passif.

### III.5.2 Résultats de simulation :

L'utilisation du logiciel MATLAB/SIMULINK permet d'effectuer une analyse harmonique en configurant les workspaces en "structure with time". Il est envisageable de tracer les courbes en configurant les workspaces en "array". Les deux Workspace sont utilisés pour chaque variable.

Après avoir appliqué les paramètres et simulé le programme sur Matlab Simulink, nous avons tracé les formes d'onde du courant absorbé par la phase a d'un redresseur triphasé à diode. En utilisant Powergui, nous avons dressé un tableau des caractéristiques des harmoniques de ce courant, dans le but d'éliminer l'harmonique d'ordre 5. Nous avons placé un Workspace avant et après ce filtre afin de voir l'effet de du filtrage.

#### III.5.2.1 Forme d'onde du courant avant le filtrage et son analyse harmonique :

Dans la figure III.3, on peut observer la forme d'onde, tandis que l'analyse harmonique avec FFT permet d'analyser le courant ia1 avant de filtrer l'harmonique d'ordre 5 comme montré dans le tableau III.2.

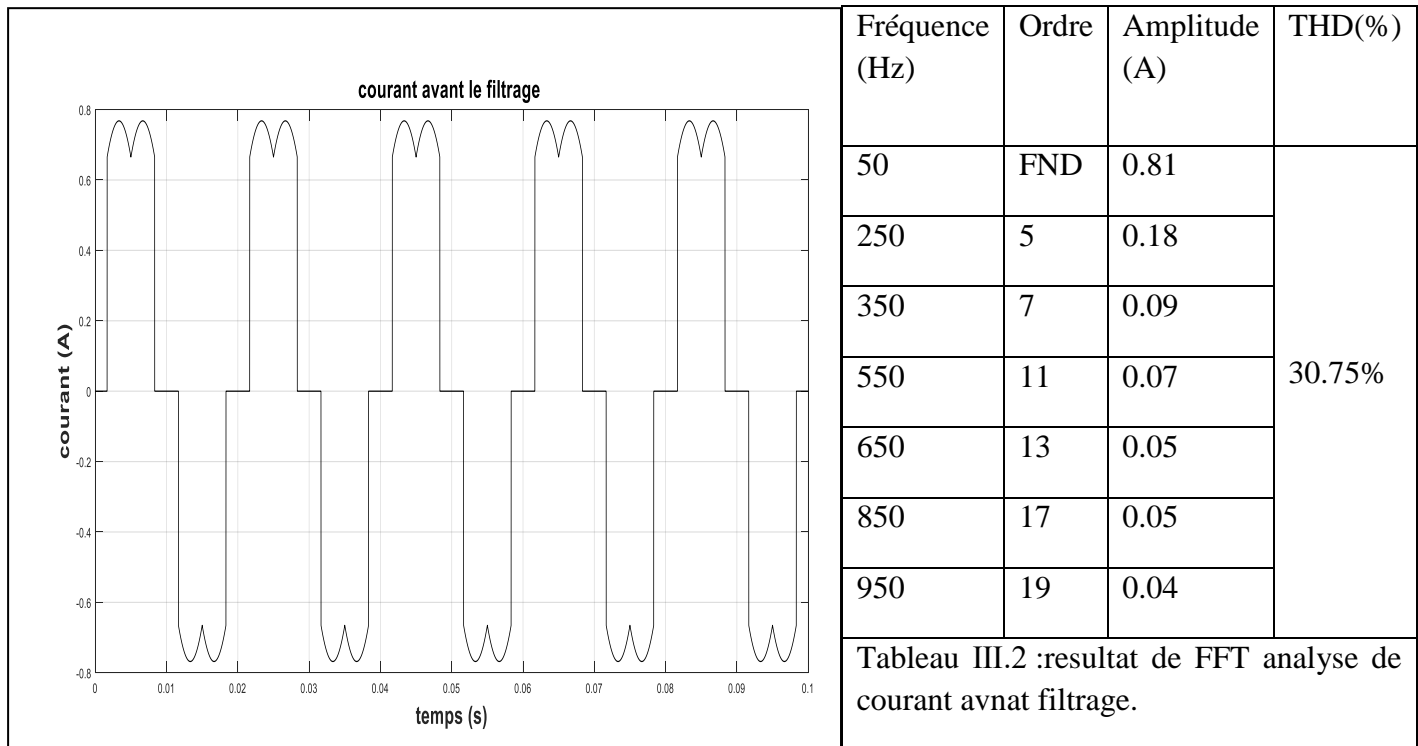


Figure III.3 : forme d'onde du courant ia1 avant filtrage.

### Interprétation :

Selon la figure III.3, il est clair que la forme d'onde du courant absorbé par la charge est très éloignée d'une forme sinusoïdale. Le Tableau III.2 résume l'analyse « FFT » de l'outil « powergui » qui révèle que ce courant est très riche en harmoniques, avec un THD élevé de 30,75% et un fondamental d'amplitude de 0.81 A.

Ces harmoniques, dans le cas des grandes puissances, peuvent perturber le bon fonctionnement des charges voisines de la charge polluante par l'intermédiaire de l'impédance du réseau.

### III.6.2.2 Forme d'onde du courant après filtrage de l'harmonique 5 et son analyse harmonique :

Dans la figure III.4, on peut observer la forme d'onde du courant absorbé par la phase a du redresseur à diodes. La fonction « FFT » de l'outil « powergui » donne le contenu harmonique de ce courant et son THD comme montré dans le tableau III.3.

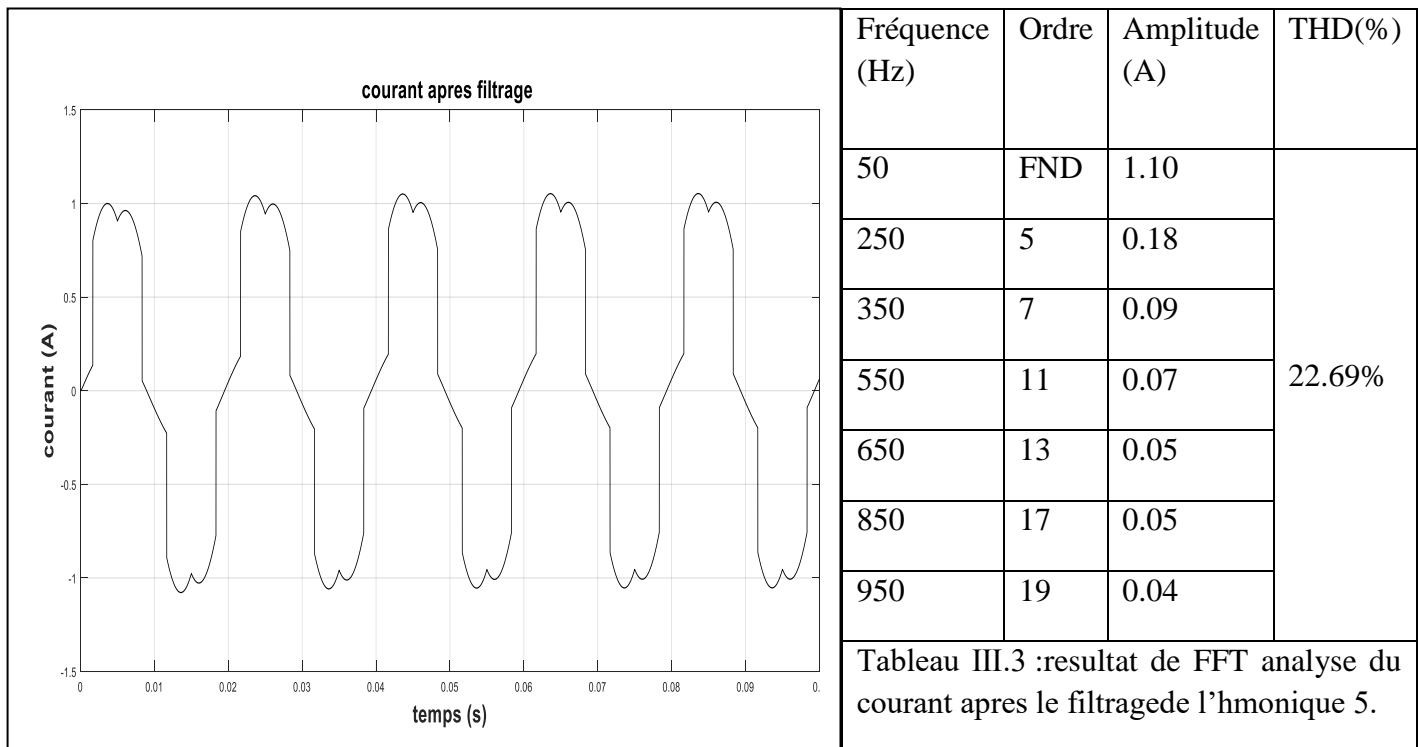


Figure III.4 : Forme d'onde du courant ia1 après filtrage de l'harmonique 5.

**Interprétation :**

Sur la figure III.4, nous remarquons que la forme d'onde est toujours déformée. Mais nous remarquons l'effet du filtrage de l'harmonique 5. En effet, son THD diminue de 30,75% à 22,69%, et l'onde fondamentale augmente de 0,81A à 1,10A.

**III.5.3 Résultats expérimentaux :**

Le banc d'essai expérimental réalisé au sein du Laboratoire des Technologies Avancées du Génie Electrique (LATAGE), l'équipe 2 « commande des machines et qualité de l'énergie » est montré dans la figure III.5 ci-dessous

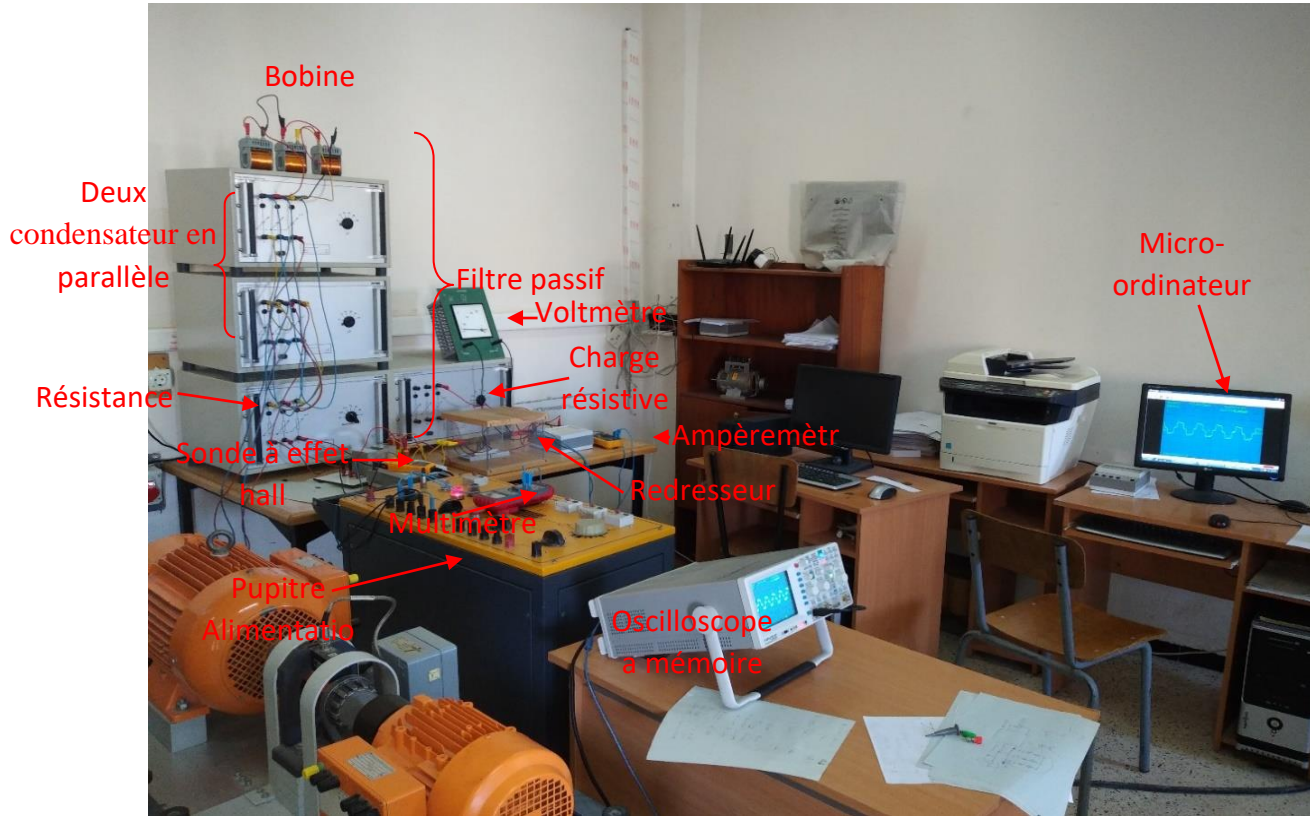


Figure III.5 : Photographie du banc expérimental réalisé.

La figure III.5 montre un banc d'essais composé des éléments suivants :

- Un pupitre d'alimentation.
- Un pont redresseur triphasé à diodes.
- Une charge résistive triphasée variable à plots (fixée à  $55\Omega$ ).
- Un filtre passif résonnant triphasé composé d'un circuit RLC série triphasé comme suit :
  - o Une résistance triphasée variable à plots (fixée à  $110\Omega$ )
  - o Deux condensateurs triphasés variables à plots (de capacité maximale de  $60\mu\text{F}$  chacun). Ils sont montés en parallèle pour obtenir une capacité de  $120\mu\text{F}$ .
  - o Trois bobines d'une self inductance de  $9\text{mH}$  chacune.

- Deux ampèremètres.
- Deux Voltmètres.
- Un oscilloscope à mémoire.
- Une sonde à effet Hall pour capter le courant.
- Un Micro-ordinateur pour enregistrer les résultats.

### Interprétation :

La figure III.6 ci-dessous représente l'allure du courant expérimental absorbé par la phase a d'un redresseur, après filtrage de l'harmonique d'ordre 5. On constate clairement que la forme d'onde semble la même que celle de la figure III.4. Ce qui prouve la validité du modèle du filtre passif utilisé.

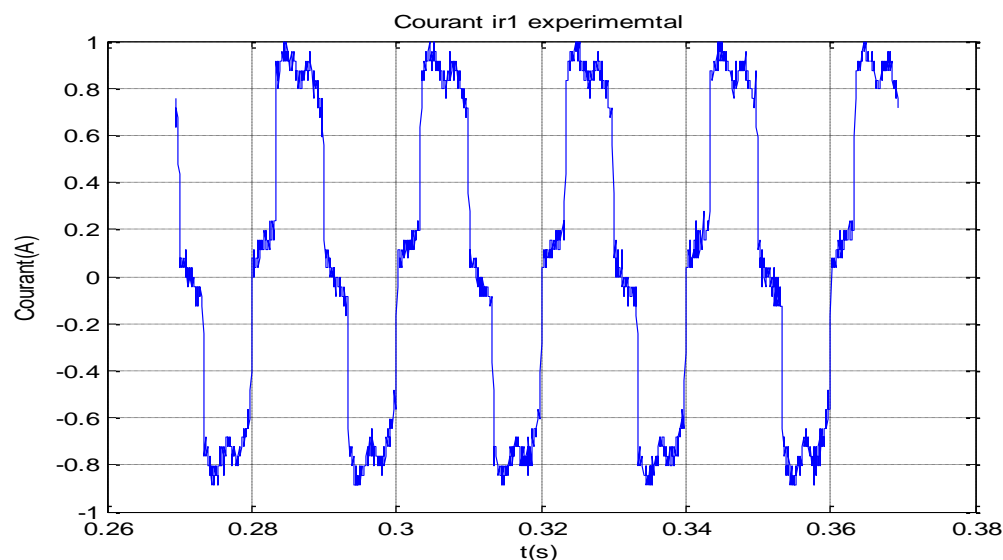


Figure III.6 : résultat expérimentale de la Forme d'onde du courant  $i_{a1}$  après filtrage de l'harmonique 5.

### III.5.4 Comparaison entre les différents résultats :

En analysant les divers résultats, il est observé que la valeur de THD diminue après le filtrage d'harmonique d'ordre 5. Après le filtrage, la forme du courant absorbé par le pont redresseur triphasé à diode s'approche légèrement de celle de la sinusoïde. Les figures III.04 et III.06 démontrent que les courants expérimentaux et de simulation présentent des allures similaires, ce qui confirme la validité du modèle développé.

## **Chapitre III : Filtrage passif des harmoniques générés par le redresseur à diodes.**

---

Pour obtenir un courant sinusoïdal, il est nécessaire de mettre en place un filtre passif correctement dimensionné pour chaque harmonique.

### **III.7 Conclusion :**

Ce chapitre a exposé le fonctionnement du filtre passif résonant en tant que solution classique pour la dépollution des réseaux électriques. En se basant sur les résultats de la simulation, on constate une baisse du THD après filtrage. Par ailleurs, nous avons obtenu des résultats de simulation similaires avec les résultats expérimentaux. S'ils sont correctement dimensionnés, les filtres passifs jouent un rôle très important.

Cependant, ils présentent de nombreux inconvénients, comme leur encombrement, leur non adaptation au changement de la charge et de la fréquence et le risque de résonance additionnelle.

Dans le chapitre suivant, nous allons exposer d'autres solutions contemporaines telles que le filtrage active.

## **Chapitre IV**

**Filtrage actif des harmoniques  
générés par le redresseur à diodes,  
apport du multiniveaux dans la  
qualité du filtrage**

### **IV.1 Introduction :**

Traditionnellement, un filtre passif est utilisé pour éliminer les harmoniques, cependant cet équipement comporte certains inconvénients, tels que l'encombrement (un filtre passif par harmonique), leur non adaptabilité aux variations de la fréquence et de la charge, ... C'est pour cela qu'on leur préfère les filtres actifs. [22]

Le filtrage actif constitue une solution moderne et intéressante pour la dépollution des réseaux industriels. Ces équipements, intégrant des technologies d'électronique de puissance à commutation rapide, sont capables de s'adapter automatiquement aux changements d'amplitude et de fréquence des harmoniques présents sur le réseau électrique.

Dans ce chapitre nous allons présenter le principe de filtrage actif, deux méthodes d'identification du contenu harmonique et le modèle Matlab-Simulink d'un filtre actif parallèle avec deux types de commande : par hystérésis et par MLI. Enfin nous présenterons les résultats de simulation de l'ensemble filtre actif - pont redresseur triphasé à diodes et nous mettrons en évidence l'apport de la technique multi-niveaux pour l'amélioration du THD du courant absorbé par la charge polluante.

### **IV.2 Principe du filtrage actif :**

Le but de filtres actifs est d'engendrer des courants, ou des tensions harmoniques de manière à ce que le courant ou la tension soient rendus sinusoïdaux. [23]

Le principe de fonctionnement du filtre actif est basé sur la production de courants qui s'opposent aux courants harmoniques générés par les charges non linéaires. Ils génèrent donc des courants d'amplitude égale à celle de la somme des harmoniques, mais de phase décalée de  $180^\circ$ . Ces filtres actifs également appelés compensateurs actifs, sont utilisés en parallèle ou en série dans les installations nécessitant une correction harmonique. Ce qui est intéressant, c'est que les filtres actifs peuvent compenser plusieurs rangs d'harmoniques simultanément, contrairement aux filtres passifs. De plus, ils n'affectent pas les caractéristiques d'impédance ou de résonance du réseau électrique. Sa structure est montrée dans la figure IV.1 ci-dessous.

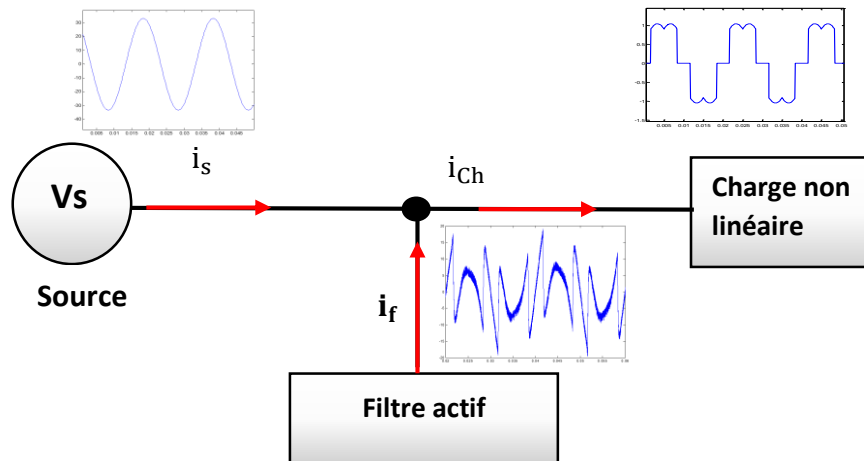


Figure IV.1 : Schéma du principe du filtre actif

Le filtre actif est composé de quatre blocs essentiels : le bloc d'identification du contenu harmonique, le bloc de commande, le bloc onduleur et le bloc de régulation.

#### IV.2.1 Identification des courants harmoniques :

Le bloc d'identification du contenu harmonique a pour rôle d'extraire la composante fondamentale et de ne laisser que les harmoniques. Il se base pour cela sur la méthode détection synchrone et la méthode des puissances instantanées [23] [25]. Ce sont les deux méthodes les plus couramment employées pour isoler la composante harmonique du courant de charge.

##### IV.2.1.1 Méthode des puissances instantanées :

La méthode la plus couramment utilisée pour d'identification est appelée méthode des puissances instantanées [24]. Cette approche présente plusieurs avantages, notamment la possibilité de choisir avec précision, rapidité et facilité la perturbation à compenser. C'est une méthode très pratique à mettre en œuvre.

Les puissances réelle et imaginaire instantanées, notées respectivement  $p$  et  $q$ , sont définies dans le repère  $\alpha\beta$  par la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (IV.1)$$

On peut séparer les puissances instantanées en deux parties : les composantes continues liées au fondamental ( $\bar{p}$  et  $\bar{q}$ ) et les composantes alternatives liées aux harmonique ( $\tilde{p}$  et  $\tilde{q}$ ). Ce qui nous permet d'écrire l'expression ci-dessous :

## Chapitre IV : Filtrage actif des harmoniques générés par le redresseur à diodes, apport du multiniveaux dans la qualité du filtrage.

$$\begin{cases} P = \bar{P} + \tilde{P} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (IV.2)$$

Un filtre passe bas dans l'espace des puissances permet de séparer la composante fondamentale (la partie continue), des composantes harmoniques (la partie alternative).

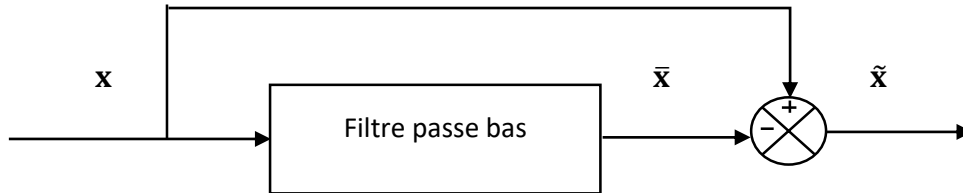


Figure IV.2 : Principe de séparation des puissances

Après avoir séparé les puissances, on peut calculer les courants perturbateurs dans le repère  $\alpha\beta$  en utilisant l'expression (IV.4) :

En posant :

$$\Delta = v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2 \quad (IV.3)$$

On a :

$$\begin{bmatrix} i_{ref\alpha} \\ i_{ref\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & -v_{\beta} \\ v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_0 - \tilde{p} \\ -\tilde{q} \end{bmatrix} \quad (IV.4)$$

La relation (IV.4) est utilisée pour compenser tous les harmoniques et permet également de compenser l'énergie réactive. L'absorption de l'énergie réactive se traduit par une composante continue non nulle le long de l'axe  $q$  ( $\bar{i}_q$ ), le courant du filtre permettant cette compensation est donc :

$$\begin{bmatrix} i_{ref\alpha} \\ i_{ref\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & -v_{\beta} \\ v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -\tilde{q} \end{bmatrix} \quad (IV.5)$$

Si notre but est de compenser à la fois la puissance réactive et tous les harmoniques en même temps, on utilise la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} i_{ref\alpha} \\ i_{ref\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & -v_{\beta} \\ v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_0 - \tilde{p} \\ -\bar{q} - \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (IV.6)$$

Finalement les trois courants de référence sont calculés en appliquant la transformée inverse de Concordia. Ces courants sont donnés par la relation suivante :

## Chapitre IV : Filtrage actif des harmoniques générés par le redresseur à diodes, apport du multiniveaux dans la qualité du filtrage.

$$\begin{bmatrix} i_{ref1} \\ i_{ref2} \\ i_{ref3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ref\alpha} \\ i_{ref\beta} \end{bmatrix} \quad (IV.7)$$

La méthode des puissances instantanées est illustrée par la figure IV.3 .

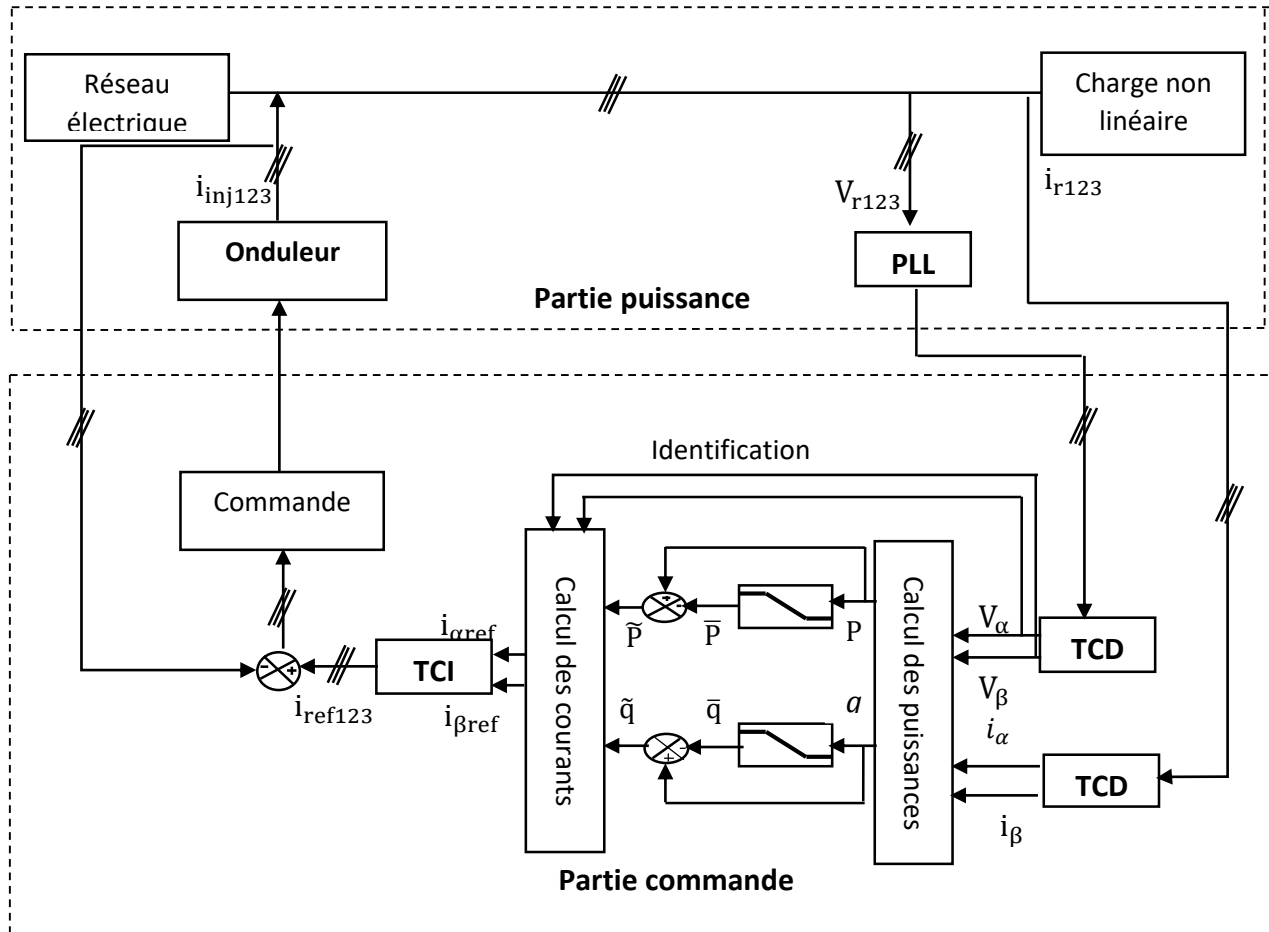


Figure IV.3 : Structure d'un filtre actif basé sur la méthode des puissances instantanées.

### IV.2.1.2 Méthode de détection synchrone :

La méthode de détection synchrone, également connue sous le nom de méthode des courants instantanés, fonctionne dans l'espace de Park  $dq$ . Elle est plus précise et robuste et nécessite moins de calcul. [25]

La méthode de détection synchrone, tout comme la méthode des puissances instantanées, nécessite une tension du réseau parfaitement sinusoïdale et équilibrée pour être applicable.

## Chapitre IV : Filtrage actif des harmoniques générés par le redresseur à diodes, apport du multiniveaux dans la qualité du filtrage.

D'abord, pour ramener les courants triphasés de la charge polluante dans le domaine de Park, on utilise la transformée de Park comme suit :

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) \\ \sin \theta & \sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.8})$$

Comme pour la méthode des puissances instantanées, on suppose que le réseau électrique étudié est constitué de trois fils.

Dans le domaine de la dépollution des réseaux électriques, la pulsation de référence est une valeur notée  $\omega$ . L'angle de la transformation de Park  $\theta$  est défini par :

$$\theta = \omega t \quad (\text{IV.9})$$

Les courants harmoniques sont composés de deux composantes : Une composante continue liée au courant fondamental et une composante alternative liée aux harmoniques.

$$\begin{cases} i_d = \bar{i}_d + \tilde{i}_d \\ i_q = \bar{i}_q + \tilde{i}_q \end{cases} \quad (\text{IV.10})$$

Pour séparer ces deux éléments du courant et extraire la partie continue, on utilise un filtre passe bas et un soustracteur comme dans la figure (IV.2) :

$$\begin{bmatrix} i_{refd} \\ i_{refq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0 - \tilde{i}_d \\ -\tilde{i}_q \end{bmatrix} \quad (\text{IV.11})$$

Finalement, pour déterminer les courants perturbateurs triphasés représentant les courants identifiés, appelés courants de référence  $i_{ref}$ , on applique la transformation inverse de Park. Ces courants sont exprimés par l'équation (IV.11) :

$$\begin{bmatrix} i_{ref1} \\ i_{ref2} \\ i_{ref3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) & \sin \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_{refd} \\ \bar{i}_{refq} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.12})$$

La méthode de détection synchrone permet également de compenser l'énergie réactive en utilisant l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} i_{refd} \\ i_{refq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\bar{i}_q \end{bmatrix} \quad (\text{IV.13})$$

## Chapitre IV : Filtrage actif des harmoniques générés par le redresseur à diodes, apport du multiniveaux dans la qualité du filtrage.

Et pour compenser à la fois la puissance réactive et l'ensemble des harmoniques, on utilise cette relation :

$$\begin{bmatrix} i_{refd} \\ i_{refq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0 - \tilde{i}_d \\ -\tilde{i}_q - \tilde{i}_q \end{bmatrix} \quad (IV.14)$$

L'identification des courants harmoniques par la méthode de détection synchrone est représentée par la figure IV.4 :

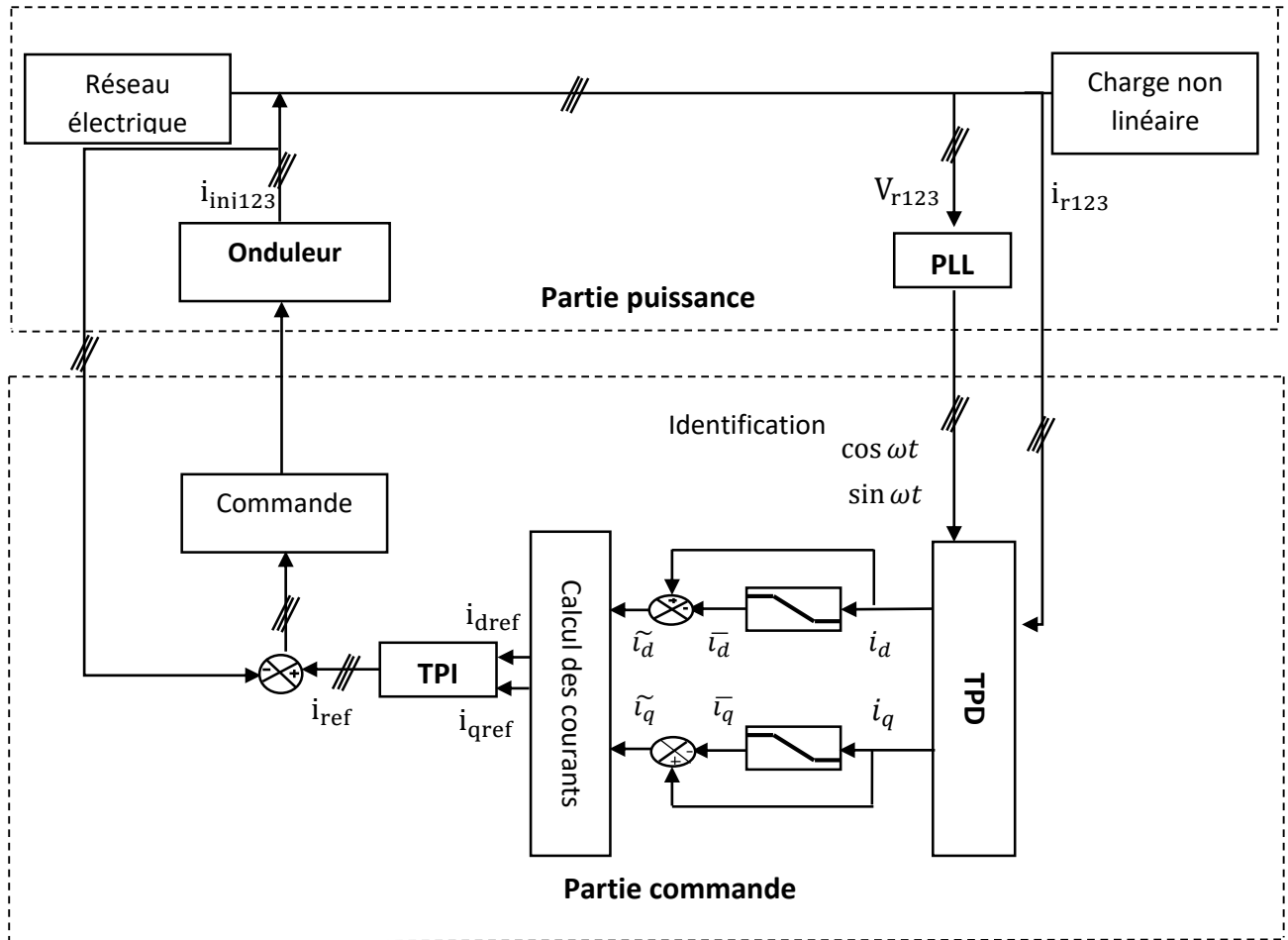


Figure IV.4 : Structure d'un filtre actif basé sur la méthode de détection synchrone.

### IV.2.2 Ploc de commande :

Le bloc de commande a pour but de générer un signal de commande précis pour le filtre actif. Ce signal de commande est basé sur les informations fournies par le bloc d'identification, qui détecte et analyse les harmoniques présents dans le système électrique.

La littérature mentionne plusieurs types de commande de l'onduleur, tels que la commande par hystérésis et la commande par MLI.

#### IV.2.2.1 Commande par hystérésis :

La méthode de contrôle par hystérésis est facile parfaitement adaptée pour la gestion en courant des convertisseurs statiques. En réalité, cette approche garantit un contrôle adéquat du courant sans nécessiter une connaissance approfondie du modèle du système à surveiller ou de ses paramètres. La figure (IV.5) présente le schéma de principe de cette technique de commande. Son principe repose sur l'établissement initial du signal d'erreur, qui correspond à la différence entre le courant de référence ( $i_{ref}$ ) et le courant généré par l'onduleur ( $i_{inf}$ ). Par la suite, on compare cette erreur à un modèle connu sous le nom de bande d'hystérésis pour établir les instructions de commande des interrupteurs du bras correspondant de l'onduleur. [26][27][16]

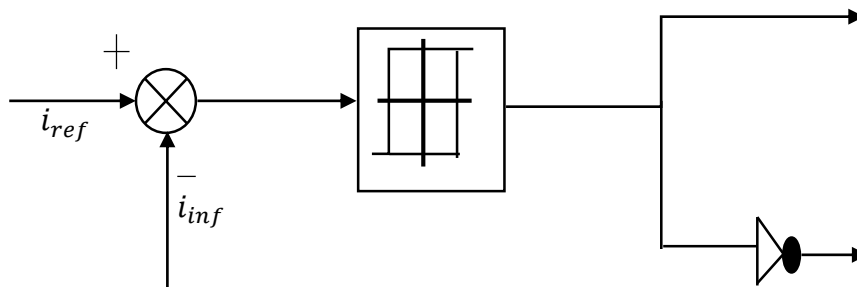


Figure IV.5 : Principe de commande des courants par hystérésis.

#### IV.2.2.2 Commande par MLI :

Dans cette méthode de contrôle, un régulateur est utilisé pour déterminer la tension de référence de l'onduleur en fonction de l'écart entre le courant mesuré et sa référence. Par la suite, on compare cette dernière à un signal triangulaire (une porteuse à fréquence élevée qui détermine la fréquence de commutation). L'ordre de commande des interrupteurs est fourni par la sortie du comparateur. La figure IV.6 présente le schéma de principe de commande des courants par MLI.

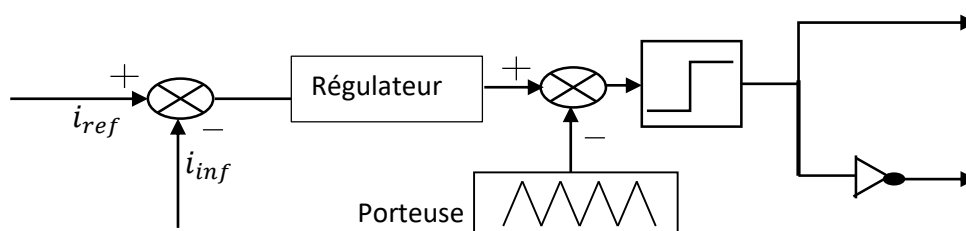


Figure IV.6 : Principe de commande des courants par MLI.

### IV.2.3 Le bloc onduleur :

Ce bloc calcule la tension de sortie de l'ondeur en fonction de la tension du bus continu et des ordres de commande fournis par la MLI, conformément à la relation IV.15.

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{pmatrix} \cdot U_{dc} \quad (\text{IV.15})$$

Avec :

$V_a, V_b, V_c$  : les tensions de sortie de l'ondeur.

$C_1, C_2, C_3$  : Les ordres de contrôle des trois bras de l'ondeur.

$U_{dc}$  : La tension du bus continu.

### IV.2.4 Le bloc régulateur de tension du bus continu :

Le bus continu n'est pas une source de tension autonome qui alimente le filtre, mais plutôt un condensateur qui est une source flottante qui se charge à travers les diodes de l'ondeur et se décharge à travers ses transistors. En raison de sa sensibilité aux échanges de puissance entre la charge polluante et le réseau, la tension aux bornes de cette source flottante n'est pas constante. C'est le filtre actif qui fournira la puissance requise pour rétablir l'équilibre. La tension aux bornes du condensateur varie également en fonction du régime transitoire de la charge non linéaire et des pertes dans les composants de puissance. Il est donc essentiel d'avoir une boucle externe de régulation de tension, car :

- En régime statique, il est nécessaire de maintenir la tension du bus continu constante en compensant les fluctuations de puissance active.
- Pour maintenir les performances de la régulation, il est nécessaire de restreindre les amplitudes des variations de la tension du bus continu en régime dynamique.

Pour maintenir la tension du bus continu constante dans un filtre actif, il est essentiel de mesurer l'amplitude de la composante active du courant et de l'ajouter aux courants de référence du filtre. Cela permet de corriger la valeur moyenne de la tension du bus continu. [28]

### IV.3 Onduleurs multi niveaux :

Les onduleurs multi-niveaux étendent la tension de sortie des convertisseurs statiques au-delà des limites des composants électriques, en offrant diverses options de configuration pour la synthèse de la tension de sortie.

#### IV.3.1 Principe de l'onduleur multiniveaux :

L'objectif de ce paragraphe est de présenter le fonctionnement général de l'onduleur multiniveaux. Une tension à plusieurs niveaux peut être obtenue soit par la mise en série de sources flottantes (condensateurs), illustré par la figure IV.7, soit en utilisant des inductances de couplage montré dans la figure IV.8.

La figure IV.7 permet de saisir le fonctionnement des convertisseurs multi-niveaux. La figure IV.7 (a) illustre un convertisseur à deux niveaux où les commutateurs semi-conducteurs ont été substitués par un interrupteur idéal. Il n'y a que deux valeurs possibles pour la tension de sortie: 0 ou  $V_{dc1}$ . La tension de sortie de trois niveaux peut être de trois valeurs, comme illustré dans la figure IV.7 (b) 0,  $V_{dc1}$  ou  $V_{dc1} + V_{dc2}$ . La figure IV.7 (c) illustre un cas général de m niveaux. [29]

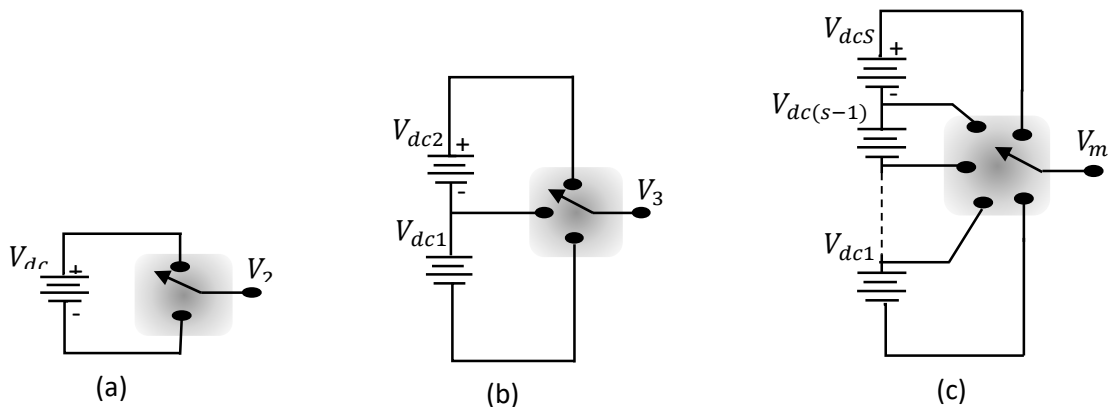


Figure IV.7 : Onduleur multi-niveaux à deux (a), à trois (b) et à m niveaux (c).

#### IV.3.2 Modélisation des onduleurs à trois niveaux :

##### IV.3.2.1 Schéma fonctionnel d'une phase d'un filtre actif à trois niveaux :

La figure IV.8 montre un bras du filtre actif à 3 niveaux. Comme on peut le constater, chaque bras est composé de deux interrupteurs en haut et deux autres en bas. Chaque paire

## Chapitre IV : Filtrage actif des harmoniques générés par le redresseur à diodes, apport du multiniveaux dans la qualité du filtrage.

d'interrupteurs est liée par une inductance de couplage. La tension de sortie est donc la somme des tensions individuelles que l'on divise par deux. La commande des interrupteurs  $K_{11}$  et  $K_{21}$  diffèrent uniquement par leurs porteuses. Leurs porteuses ont la même amplitude et la même fréquence, mais elles sont décalées d'un angle de  $\pi$ .

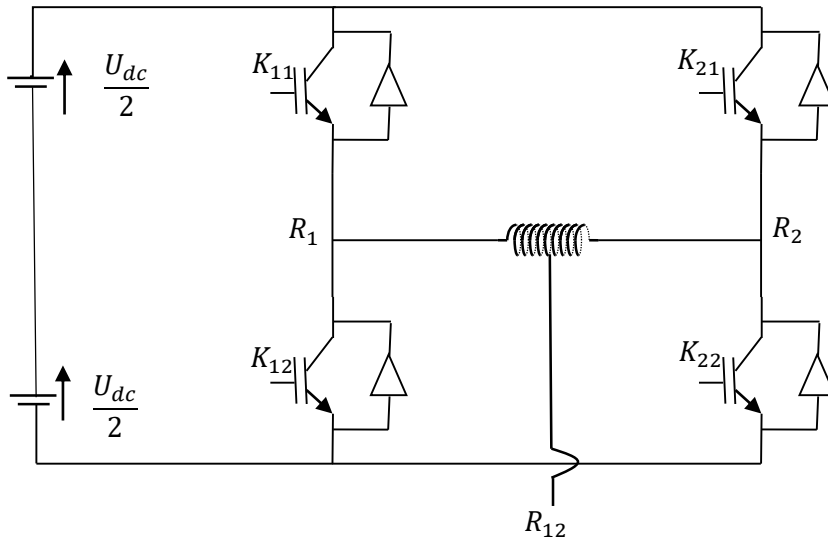


Figure IV.8 : Schéma d'une branche d'onduleur trois niveaux à deux cellules par phase.

### IV.3.2.2 Calcul des tensions de sortie :

Les tensions de sortie sont calculées en se basant sur la relation IV.16

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} C_{11} + C_{12} \\ C_{21} + C_{22} \\ C_{31} + C_{32} \end{pmatrix} \cdot \frac{U_{dc}}{2} \quad (\text{IV.16})$$

Avec :

$V_a, V_b, V_c$  : Les tensions de sortie de l'onduleur.

$C_{11}, C_{12}, C_{21}, C_{22}, C_{31}, C_{32}$  : Les ordres de commande des six interrupteurs des trois bras de l'onduleur.

$U_{dc}$  : La tension du bus continu.

### IV.4 Rôle du filtre actif :

Dans la pratique, on ne peut pas obtenir un courant parfaitement sinusoïdal comme dans un cas idéal mais le but est d'avoir un courant qui se rapproche le plus possible de la sinusoïde. Cela peut être difficile en raison des erreurs liées au filtrage ou à l'alimentation du réseau.

## Chapitre IV : Filtrage actif des harmoniques générés par le redresseur à diodes, apport du multiniveaux dans la qualité du filtrage.

Dans le cas idéal, le filtre actif joue un rôle essentiel en éliminant les harmoniques générés par la charge non linéaire. Il fait cela en fournissant des harmoniques de même amplitude et en opposition de phase par rapport à ceux produits par la charge. Cela permet de maintenir le courant dans la ligne purement sinusoïde et égal au fondamental du courant de charge. [3]

### IV.5 Paramètres de simulation :

Les paramètres de simulation sont résumés dans le tableau suivant :

Tension et fréquence de la source :	
$V=220\sqrt{2}V$	, $f = 50Hz$
Impédance de la ligne :	
$L_s = 45 \text{ mH}$	, $R_s = 0.16 \Omega$
Impédance la charge	
$L_{ch} = 68 \text{ mH}$	, $R_{ch} = 22\sqrt{2} \Omega$
Impédance du filtre entrée:	
$L_f = 2 \text{ mH}$	, $R_f = 8e-3 \Omega$
Résistance et capacité du bus continu :	
$R = 300 \Omega$	, $C = 3.3 \text{ mF}$

Tableau IV.1 : Paramètres de simulation.

### IV.6 Modèle Matlab-Simulink du filtre actif :

#### IV.6.1 Filtre actif commandé par Hystérésis :

Le modèle Matlab-Simulink du filtre actif commandé par hystérésis est montré dans la figure IV.9 :

## Chapitre IV : Filtrage actif des harmoniques générés par le redresseur à diodes, apport du multiniveaux dans la qualité du filtrage.

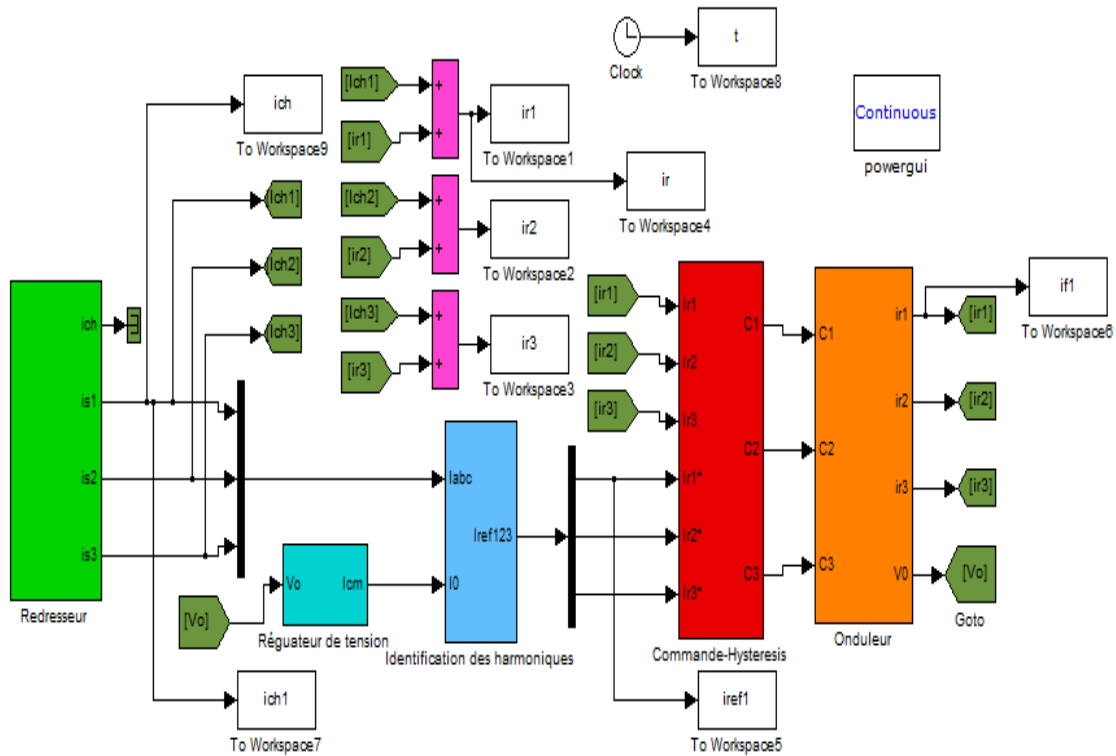


Figure IV.9 : Modèle Matlab-Simulink du filtre actif commandé par Hystérésis.

### IV.6.2 Filtre actif commandé par MLI :

La figure IV.10 montre le modèle Matlab-Simulink du filtre actif commandé par MLI. Il s'agit du même modèle que celui de la figure IV.9, seul le bloc commande change.

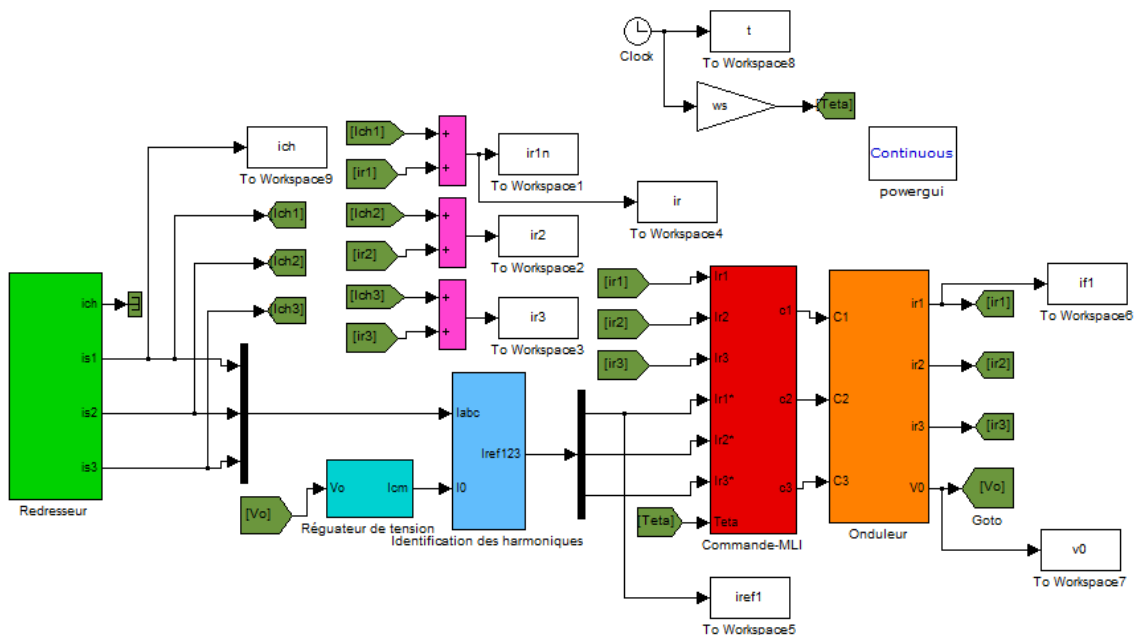


Figure IV.10 : Modèle Matlab-Simulink du filtre actif commandé par MLI.

## Chapitre IV : Filtrage actif des harmoniques générés par le redresseur à diodes, apport du multiniveaux dans la qualité du filtrage.

### IV.7 Résultats de simulation et interprétations :

En utilisant les paramètres précédents sur notre bloc Simulink pour l'extraction des courbes (avant et après le filtrage), les résultats de simulation sont présentés sur les figures suivantes :

#### IV.7.1 Courant « is1 » avant filtrage :

Dans la figure IV.11, on peut observer la forme d'onde du courant ia1 absorbé avant le filtre. L'analyse harmonique de ce courant est montrée dans le tableau IV.2.

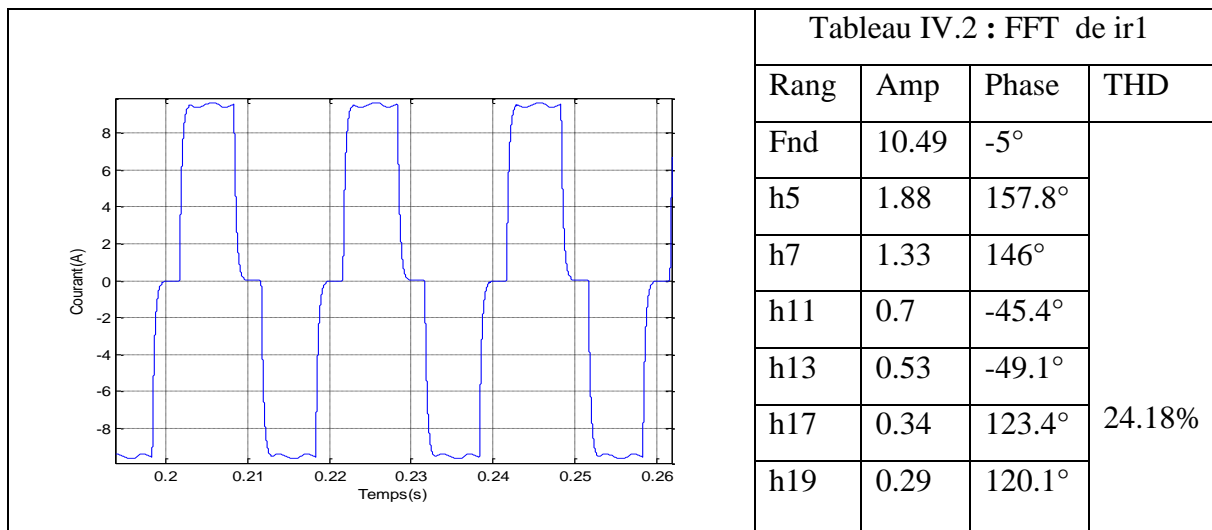


Figure IV.11 : Forme d'onde du courant ir1 avant filtrage.

La figure IV.11 représente la forme d'onde du courant de charge, on remarque que le courant de charge est très riche en harmoniques, son taux de distorsion harmonique (THD) est de 24.18% et son fondamental à une amplitude de 10.49A. Cela dépasse largement la norme standard de 5% pour le THD du courant.

#### IV.7.2 Courant « is1 » après filtrage actif commandé par hystérésis :

La figure IV.12 et le tableau IV.3 montrent respectivement la forme d'onde et l'analyse harmonique du courant dépollué après filtrage actif commandé par hystérésis et ce pour deux pas de calcul distincts ;  $10^{-5}$ s et  $10^{-6}$ s.

Les figures IV.12 (a) et (b) montrent la forme d'onde du courant absorbé par la phase a d'un redresseur à diodes, en utilisant respectivement un pas de calcul de  $10^{-5}$ s et  $10^{-6}$ s. On peut observer qu'avec un pas de calcul de  $10^{-5}$ s, la forme d'onde du courant présente des fluctuations importantes autour de la référence sinusoïdale avec un THD de 7.18%. Avec un pas de calcul de  $10^{-6}$ s, la forme d'onde du courant est plus proche du signal sinusoïdal avec un THD de

## Chapitre IV : Filtrage actif des harmoniques générés par le redresseur à diodes, apport du multiniveaux dans la qualité du filtrage.

0.63%. Nous concluons que le pas de calcul de  $10^{-6}$ s donne des résultats plus précis. On adoptera donc le pas de calcul de  $10^{-6}$ s pour la suite de ce travail.

D'après la figure IV.12, on remarque que la forme d'onde du courant du réseau après filtrage prend la forme d'une sinusoïde et le THD est réduit de 24.18% à 0.63% et son fondamental à une amplitude de 14.9A.

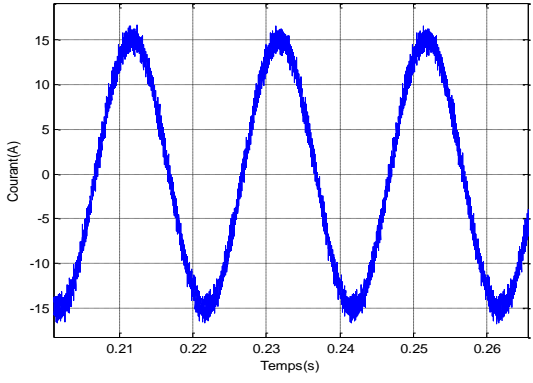
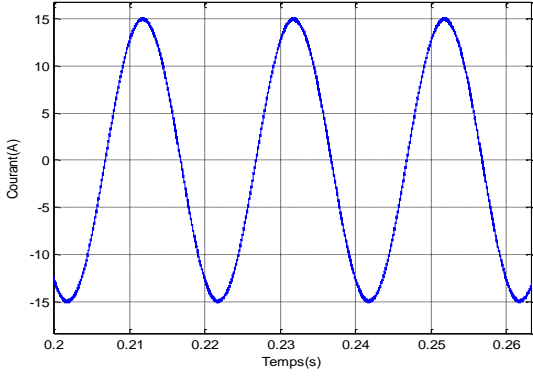
Tableau IV.3 : FFT de $i_{r1}$ après filtrage actif commandé par hystérésis					
Avec un pas de calcul $10^{-5}$			Avec un pas de calcul $10^{-6}$		
Rang	Amp (A)	Phase (°)	Rang	Amp (A)	Phase (°)
fnd	14.9	-1.8	fnd	14.9	-1.8
5	0.01	192.3	5	0.01	103.4
7	0.04	191.8	7	0.01	259.1
11	0.03	49.6	11	0.01	40.9
13	0.01	91	13	0.00	48.4
17	0.02	175.6	17	0.00	259
19	0.04	229.4	19	0.00	231.2
THD=7.38%			THD=0.63%		
					
Figure (a) avec un pas de calcul $10^{-5}$			Figure (b) avec un pas de calcul $10^{-6}$		

Figure IV.12 : Forme d'onde du courant  $i_{r1}$  après filtrage actif commandé par Hystérésis.

#### IV.7.2.1 Courant de référencer ( $i_{ref1}$ ) et courant en sortie du filtre actif ( $i_{f1}$ ) :

Les figures IV.13 et IV.14 représente la forme d'onde du courant de référence  $i_{ref1}$  et du courant  $i_{f1}$  en sortie du le filtre actif dans le cas où l'onduleur est commandé par hystérésis. On constate que le courant en sortie du filtre suit bien sa référence à l'intérieur d'une bande d'hystérésis.

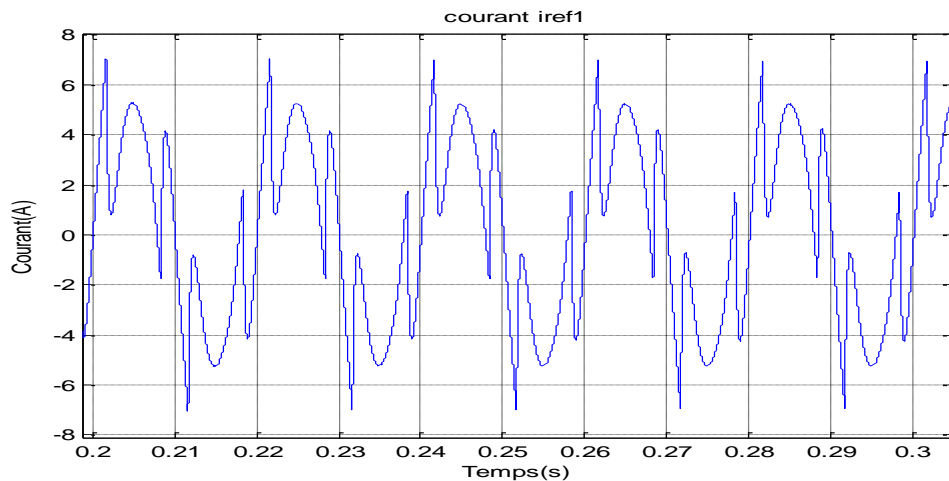


Figure IV.13 : Forme d'onde du courant de référence du filtre actif

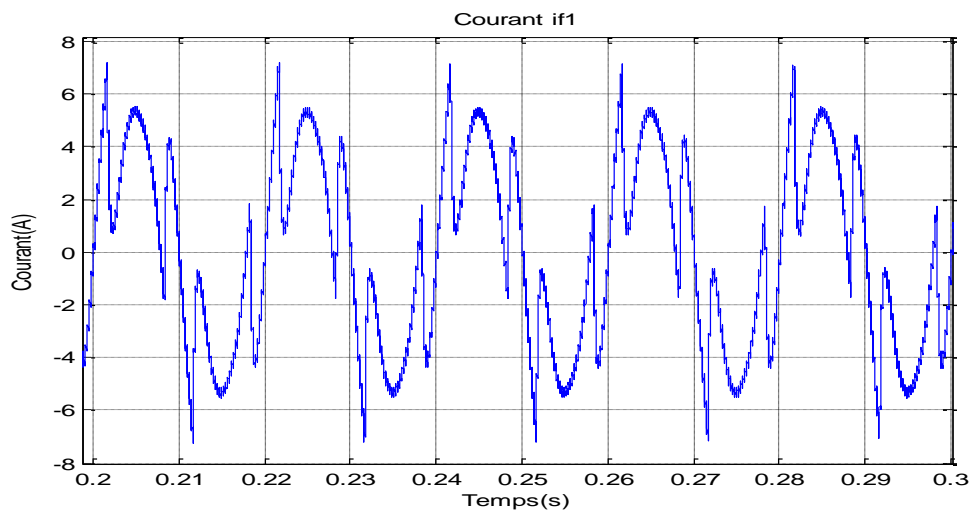


Figure IV.14 : Forme d'onde du courant en sortie du filtre actif commandé par hystérésis.

#### IV.7.3 Courant « is1 » après filtrage actif commandé par MLI :

##### IV.7.3.1 Courant « is1 » après filtrage actif commandé par MLI à 1 Niveau :

Les résultats présents dans la figure IV.15 et le tableau IV.4 illustrent respectivement la forme d'onde et l'analyse harmonique du courant dépollué après filtrage actif commandé par MLI à 1

## Chapitre IV : Filtrage actif des harmoniques générés par le redresseur à diodes, apport du multiniveaux dans la qualité du filtrage.

Niveau, avec deux pas de calcul différents : La figure IV.16 (a) le pas de calcul est  $10^{-5}$  s et dans la figure IV.16 (b) le pas de  $10^{-6}$ s.

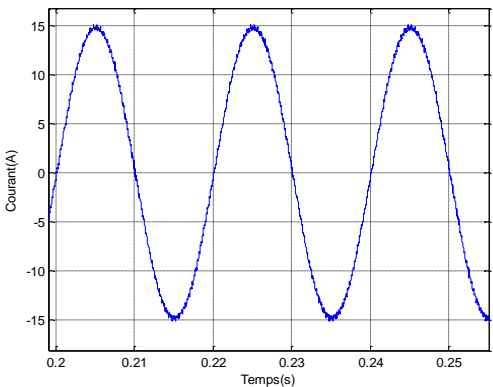
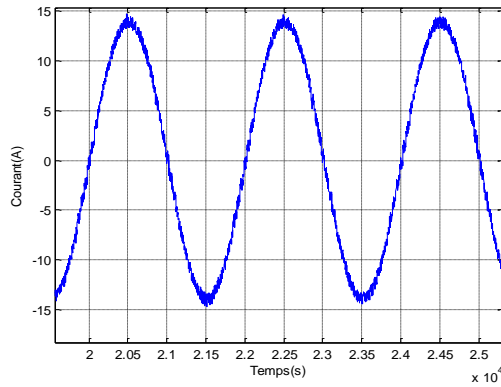
Tableau IV.4 : FFT de $i_{r1}$ après filtrage actif commande par MLI a 1 Niveau.					
Avec un pas de calcul $10^{-5}$			Avec un pas de calcul $10^{-6}$		
Rang	Amplitude (A)	Phase (°)	Rang	Amplitude (A)	Phase (°)
FND	13.87	-1.9	FND	14.8	-1.8
5	0.01	53.8	5	0.04	157.1
7	0.03	219.5	7	0.03	195.2
11	0.01	6.7	11	0.02	13.8
13	0.02	-38.6	13	0.02	-5.5
17	0.02	175.6	17	0.01	158.9
19	0.02	236.2	19	0.01	159
THD=2.78%			THD=1.39%		
					
Figure (b) avec un pas de calcul $10^{-6}$			Figure (a) avec un pas de calcul $10^{-5}$		

Figure IV.15 : Forme d'onde du courant  $i_{r1}$  après filtrage actif commandé par MLI à 1 Niveau.

D'après les figures IV.15 (a) et (b), on peut observer que la forme d'onde du courant  $i_{r1}$  est plus proche de la sinusoïde avec un pas de calcul de  $10^{-6}$ s qu'avec un pas de  $10^{-5}$ s. En effet, avec un pas de  $10^{-6}$ s le THD de 1.39%, tandis qu'avec un pas de  $10^{-5}$ s le THD devient égal à 2.78%. Par conséquent, nous utilisons par la suite un pas de calcul  $10^{-6}$ s pour tous les autres niveaux {3,5,7,9,}.

IV.7.3.2 Courant «  $i_{r1}$  » après filtrage actif multi-niveaux :

Les résultats présentes dans la figure IV.16 et le tableau IV.5 illustrent respectivement les formes d'ondes et l'analyses harmoniques des courants dépollue après filtrage actif commandé multi-niveaux (3,5,7 et 9 niveaux).

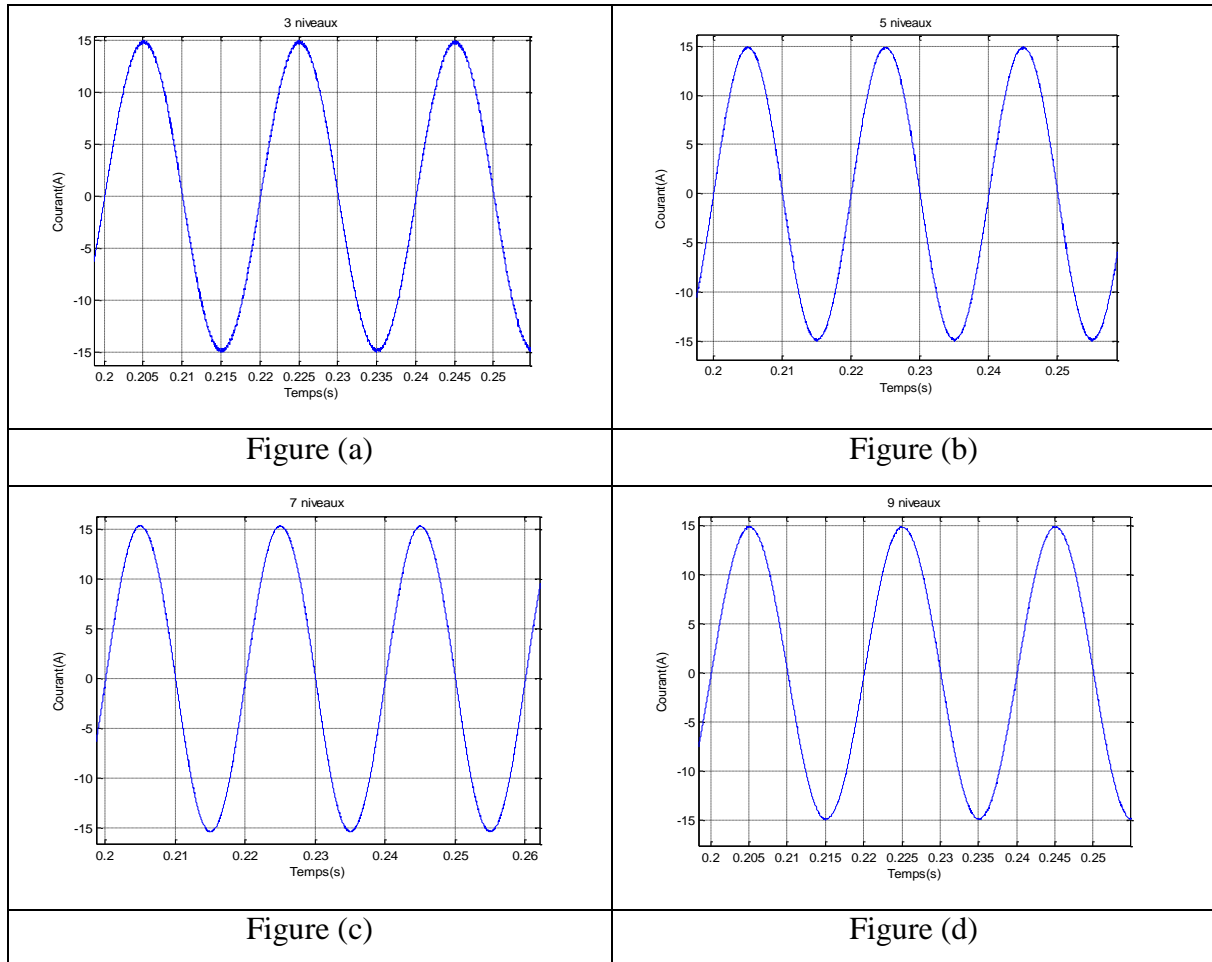


Figure IV.16 : Forme d'onde du courant après filtre actif multi-niveaux.

**Chapitre IV : Filtrage actif des harmoniques générés par le redresseur à diodes, apport du multiniveaux dans la qualité du filtrage.**

3 niveaux	Rang	FND	5	7	11	13	17	19
	Amplitude (A)	14.87	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
	Phase (°)	-1.8	141.4	224.1	-13.9	-1.6	178.7	204.8
	THD	0.67%						
5 niveau	Rang	FND	5	7	11	13	17	19
	Amplitude (A)	14.89	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	0.00
	Phase (°)	-1.8	142	-51.4	55.2	-17.8	-83.6	204
	THD	0.37%						
7 niveaux	Rang	FND	5	7	11	13	17	19
	Amplitude (A)	15.35	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	Phase (°)	-1.6	83.1	220.3	-6.9	41.7	170.4	164.3
	THD	0.33%						
9 niveaux	Rang	FND	5	7	11	13	17	19
	Amplitude (A)	14.9	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00
	Phase (°)	-1.8	82.1	260.5	72.8	46.8	259.7	261.8
	THD	0.33%						

Tableau IV.5 : Resultat de FFT analyse du courant  $i_{r1}$  apres filtrage actif multi-niveaux.

Le Tableau IV.5 présente les résultats de l'analyse FFT du courant  $i_{r1}$  pour les quatre niveaux (3,5,7,9). Le troisième niveau présente un taux de distorsion harmonique THD de 0.67% et l'amplitude fondamentale est de 14.87A. Le cinquième niveau présente une diminution du THD qui arrive à 0.37% avec une amplitude de 14.89A. Le septième niveau présente une diminution de THD qui arrive à 0.33% avec une amplitude de 15.35A. On remarque que les résultats obtenus du neuvième niveau et du septième niveau sont identiques avec un THD de 0.33%, le fondamental a une amplitude de 14.9A.

La figure IV.16 montre que le courant après le filtrage actif s'améliore progressivement et sa forme d'onde s'approche de plus en plus d'une sinusoïde au fur et à mesure que le nombre de niveaux augmente.

### IV.7.3.3 Courant de référence ( $i_{ref1}$ ) et courant en sortie du filtre actif ( $i_{f1}$ ) :

Les figures IV.17 et IV.18 montrent respectivement les courbes du courant de référence du filtre actif ( $i_{ref1}$ ) et du courant en sortie du filtre actif ( $i_{f1}$ ).

Les figure IV.17 et IV.18 montrent que le courant du filtre actif commandé par MLI suit parfaitement la référence, ce qui est beaucoup mieux que les résultats obtenus avec l'hystérésis (Figure IV.14).

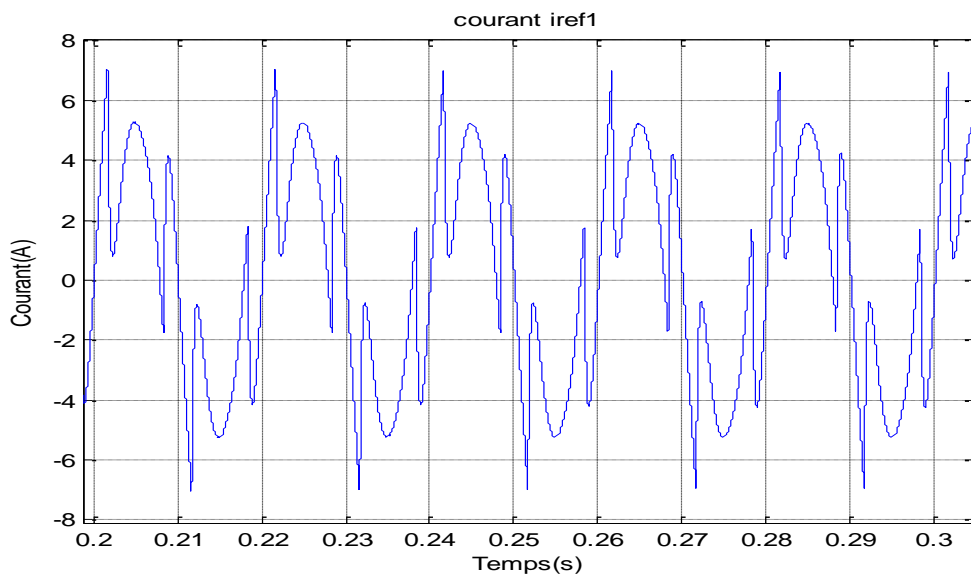


Figure IV.17 : Forme d'onde du courant de référence du filtre actif

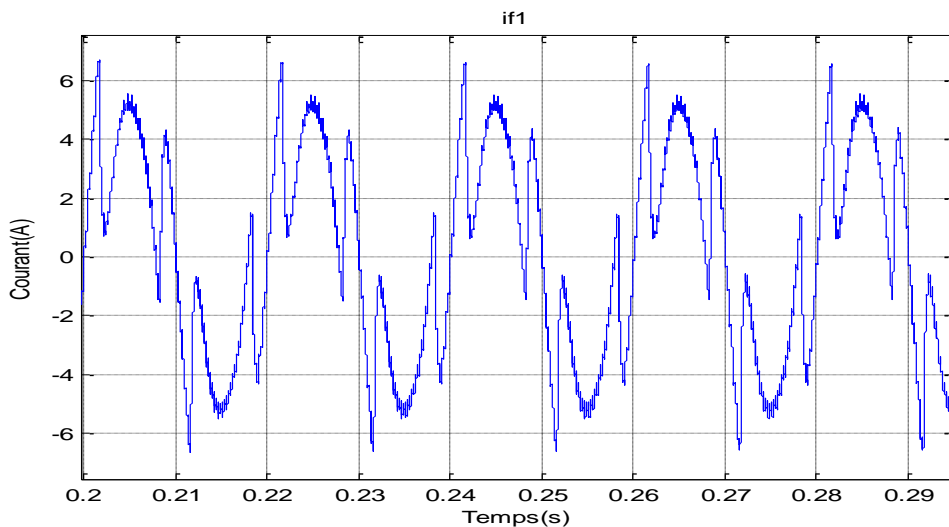


Figure IV.18 : Forme d'onde du courant en sortie du filtre actif commandé par MLI.

#### **IV.8 Conclusion :**

Ce chapitre a été consacré au filtrage actif. Nous avons commencé par le principe de fonctionnement d'un filtre actif et par la suite nous avons présenté son modèle sous environnement Matlab-Simulink. Nous avons étudié deux types de commandes ; la commande à hystérésis et la commande à MLI.

Après avoir effectué les premiers tests par simulation, nous avons remarqué que le pas de calcul a une influence considérable sur la précision des résultats. Nous avons conclu que le pas de calcul de  $10^{-6}$ s donne des résultats avec une bonne précision.

La commande à hystérésis a l'avantage d'être facile à implémenter mais elle présente l'inconvénient de la fréquence de commutation incontrôlable. La commande à MLI est un peu plus compliquée, mais sa fréquence peut être contrôlée. Pour améliorer les performances du filtre actif commandé par MLI, nous avons fait appel à la technique multi-niveaux et nous avons constaté qu'en augmentant le nombre de niveaux, on améliore la qualité spectrale, on diminue le THD et on augmente l'amplitude du fondamental. La technique multi-niveaux permet d'améliorer le THD sans augmenter la fréquence de commutation.

## **Chapitre V**

# **Modélisation d'un redresseur propre et amélioration de ses performances par la technique multiniveaux**

### **V.1 Introduction :**

Dans les chapitres précédents, nous avons mis l'accent sur les harmoniques produits par les convertisseurs statiques, insistant sur les harmoniques générés par les redresseurs à commutation naturelle (pont de diodes). Ensuite, nous avons présenté les différentes techniques de filtrage requises pour éliminer les harmoniques indésirables du réseau électrique, notamment les filtres passifs et les filtres actifs.

Au lieu d'utiliser des convertisseurs polluants et leurs associer des systèmes de filtrage, la solution la plus efficace est d'utiliser des convertisseurs non polluants c'est-à-dire des convertisseurs qui absorbent des courants qui absorbent des courants aussi proches que possibles d'un signal sinusoïdal.

Ce chapitre sera précisément consacré à l'étude et la modélisation de l'un de ces convertisseurs dits « propres », il s'agit des redresseurs commandés par la technique MLI, « Modulation de Largeurs d'Impulsion ». Nous passerons ensuite à une technique qui améliore encore plus les performances des redresseurs à MLI en termes de qualité spectrale, il s'agit de la technique multiniveaux.

Dans ce chapitre, nous présentons le principe de fonctionnement du redresseur à MLI à travers ses différents constituants et à travers la technique de commande à MLI qui permet une absorption sinusoïdale et également un facteur de puissance unitaire. Nous présenterons ensuite le principe de la technique multiniveaux qui permet d'obtenir des courants absorbés qui contiennent moins d'harmoniques et qui permettent également de monter en puissance.

Basés sur le principe de fonctionnement, nous développerons les modèles Matlab-Simulink du redresseur à MLI à 1 niveau puis à plusieurs niveaux et présenterons et nous discuterons les différents résultats.

### **V.2 Principe de fonctionnement d'un redresseur à MLI :**

Comme le montre la figure V.1, le redresseur à MLI est composé des éléments suivants :

- Le réseau et le filtre d'entrée.
- Le convertisseur composé de six transistors et de six diodes connectées en antiparallèle aux transistors.
- Le condensateur de filtrage de la tension de sortie.
- La charge.

- Le module de commande à MLI.

Pour permettre au redresseur d'absorber un courant sinusoïdal, il faut appliquer son entrée des tensions ( $V_a, V_b, V_c$ ) aussi proches que possible d'un signal sinusoïdal [30]. Pour cela il faut appliquer une commande qui délivre des tensions ( $V_a, V_b, V_c$ ) sinusoïdale par escaliers, c'est le rôle de la MLI.

La figure (V.1) montre comment fonctionne un redresseur à MLI. Son principe consiste à contrôler les tensions d'entrée de manière à ce que les courants absorbés par le redresseur du réseau soient sinusoïdaux.

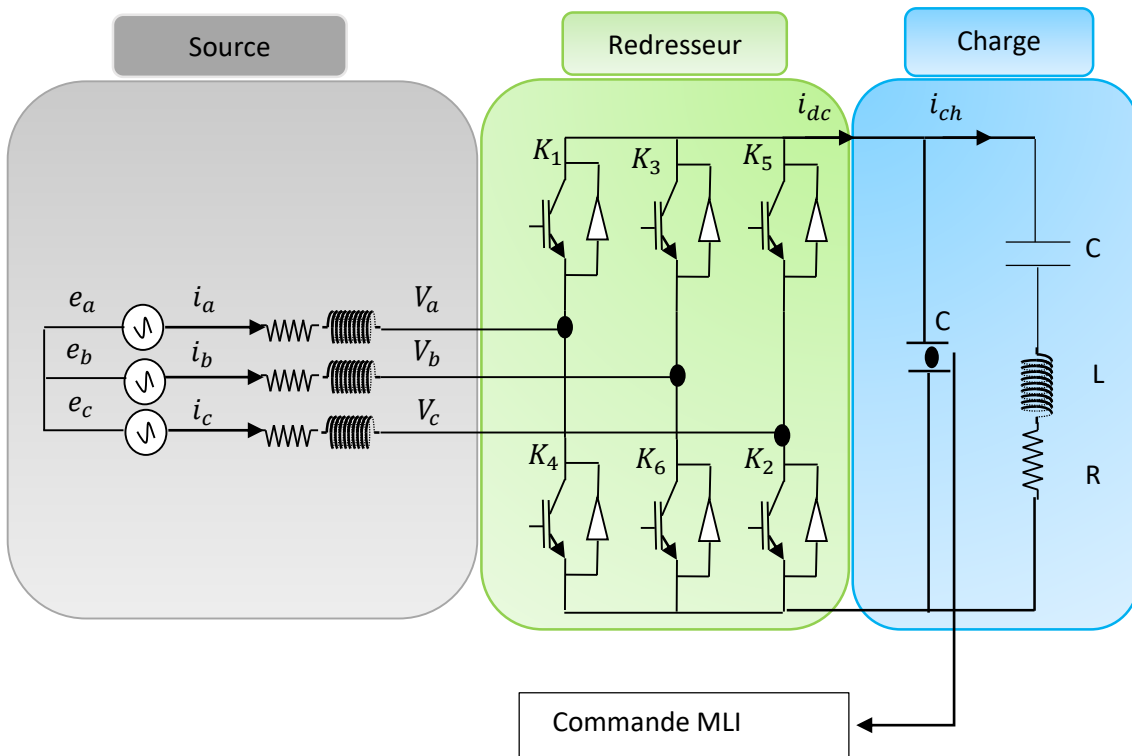


Figure V.1 : Principe du redresseur à MLI.

**V.2.1 Principe de l'obtention de l'absorption sinusoïdale :**

Le redresseur à MLI est alimenté par une source triphasée équilibrée à travers un filtre RL.

$$\begin{cases} e_a = E_{max} \cos \omega t \\ e_b = E_{max} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ e_c = E_{max} \cos(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (V.1)$$

## Chapitre V : Modélisation d'un redresseur propre et amélioration de ses performances par la technique multiniveaux.

---

Avec :

$E_{max}$  : Amplitude de la tension du réseau.

$\omega$  : Pulsation du réseau.

- L'hypothèse d'un système équilibré sans filtre du neutre implique l'égalité suivante :

$$\sum_{i=a}^c e_i = \mathbf{0} \quad (V.2)$$

- En appliquant la loi de Kirchhoff du côté alternatif, on obtient :

$$\begin{cases} e_a = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + V_a \\ e_b = Ri_b + L \frac{di_b}{dt} + V_b \\ e_c = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} + V_c \end{cases} \quad (V.3)$$

L et R sont respectivement l'inductance et la résistance du filtre à l'entrée du redresseur et (a, b, c) ce sont des indices des phases.

Sous forme matricielle, le système d'équations 5V.3) s'écrit :

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (V.4)$$

Tel que  $(V_a, V_b, V_c)$  sont des tensions simples par rapport au neutre de la source. Du système (V.4), on déduit le système d'équations différentielles donnant le courant dans chaque phase :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = -\frac{R}{L} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} e_a - V_a \\ e_b - V_b \\ e_c - V_c \end{bmatrix} \quad (V.5)$$

En considérant le système d'équations (V.5) on comprend que pour avoir des courants  $(i_a, i_b, i_c)$  sinusoïdaux, il faut que les tensions  $(V_a, V_b, V_c)$  soient sinusoïdales.

### V.2.2 Principe de la commande à MLI :

Le redresseur triphasé de la figure V.1 est composé de six transistors et chaque transistor a une diode qui lui est connectée en anti parallèle. Chaque paire de transistor + diode en antiparallèle forme un interrupteur commandable à l'ouverture et à la fermeture. Le redresseur triphasé est donc formé de six interrupteurs, trois du haut et trois du bas. Chaque paire : interrupteur du haut + interrupteur du bas, forme un bras. Le redresseur triphasé est donc formé de trois bras. La commande des interrupteurs d'un même bras est complémentaire, il suffit donc d'envoyer des

## Chapitre V : Modélisation d'un redresseur propre et amélioration de ses performances par la technique multiniveaux.

signaux de commande aux trois interrupteurs du haut. Ces signaux sont appelés :  $C_1, C_2, C_3$  . Pour envoyer chacun des trois signaux  $C_1, C_2, C_3$  , la technique MLI compare un signal sinusoïdal de basse fréquence appelé tension de référence et un signal de haute fréquence appelé porteuse. A chaque intersection entre le signal de référence et de la porteuse un ordre de commande est envoyé aux six interrupteurs. A chaque intersection, si la tension de référence est supérieure à la tension de la porteuse c'est l'interrupteur du haut qui est commandé, sinon c'est l'interrupteur du bas qui est commandé. contrôle la sortie d'un redresseur en combinant une tension de référence avec une onde porteuse à haute fréquence, souvent sous forme de triangle.

Les signaux de contrôle  $C_1, C_2, C_3$  des transistors supérieurs sont formes en croisant trois tensions de référence avec une onde porteuse, tandis que les signaux de contrôle des transistors inférieurs sont les compléments des signaux des transistors supérieurs.

La figure (V.2) représente le principe de contrôle à MLI .

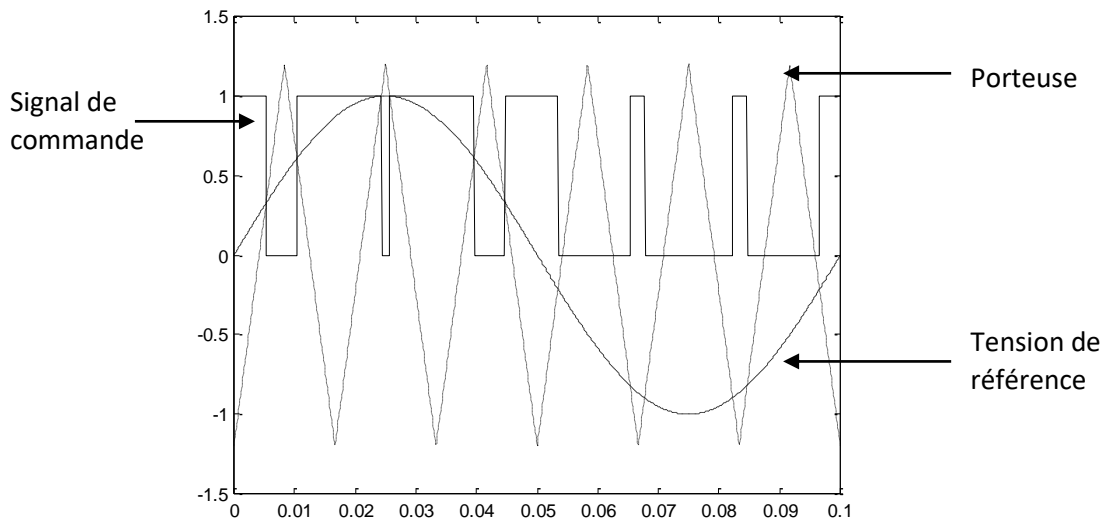


Figure V.2: Principe de la commande à MLI.

Les tensions appliquées au redresseur sont déterminées par le système d'équations (V.6).

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{U_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} \quad (V.6)$$

**V.3 Modèle Matlab-Simulink du redresseur à MLI :**

Le modèle Matlab-Simulink de l'ensemble réseau - redresseur à MLI - Charge RLC est illustré dans la figure V.3.

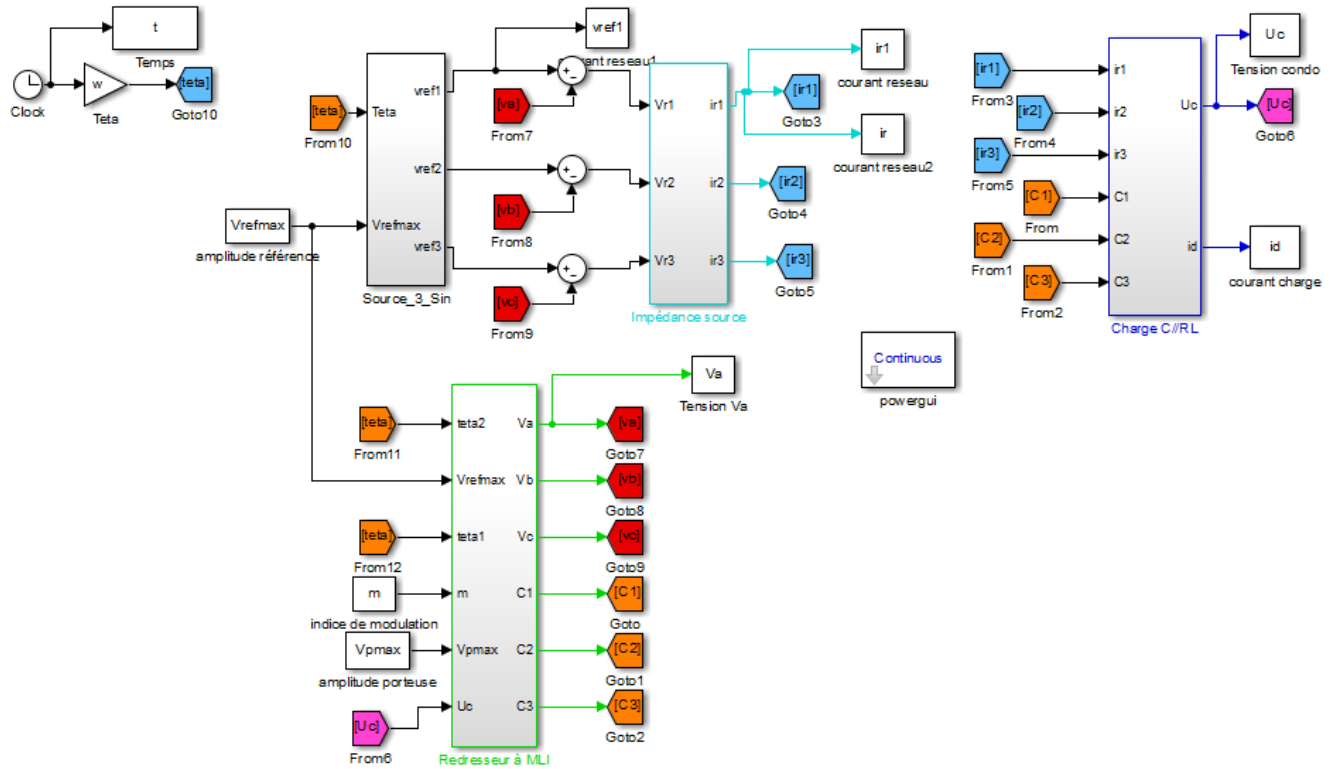


Figure V.3 : Modèle Matlab-Simulink d'un redresseur à MLI.

La figure V.4 montre les différents éléments qui constituent le bloc "redresseur à MLI". Selon cette figure, le bloc « redresseur à MLI » est constitué des sous-blocs suivants conformément au principe de la commande à MLI de la figure V.2 :

- Tensions de référence.
- Tension de porteuse.
- Commande à MLI qui délivre les signaux de commande ( $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ).
- Redresseur qui délivre les tension d'entrée ( $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$ ) .

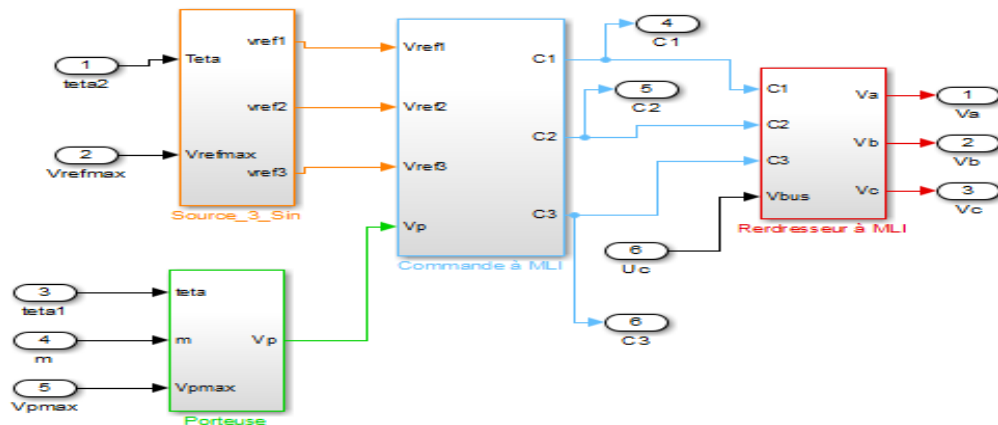


Figure V.04 : Modèle Matlab-Simulink détaillé du bloc « redresseur à MLI »

### V.3.1 Paramètres de simulation :

Les paramètres de simulation nécessaires pour effectuer des tests par simulation du redresseur à MLI simple et multiniveaux sont donnés dans le tableau V.1.

Tension	$V = 220\sqrt{2}(V)$
Filtre d'entrée	$L_r = 0.024(H)$
	$R_r = 5(\Omega)$
La charge	$R_d = 80(\Omega)$
	$L_d = 0.54(H)$
	$C = 45e-4(F)$
Indice de modulation	$M = 18$
Fréquence	$F = 50(Hz)$

Tableau V.1 : Les paramètres de simulation.

### V .3.2 Résultat de simulation :

Après avoir appliqué les paramètres et simulé le programme sur Matlab Simulink, nous avons tracé les formes d'onde du courant absorbé par la phase 1 pour trois niveaux différents (1,5 et 7 niveaux) dans les figures V.5, V.6 et V.7. En utilisant Powergui, nous avons dressé le tableau V.2 contenant le résultat de l'analyse harmonique de ce courant.

**Chapitre V : Modélisation d'un redresseur propre et amélioration de ses performances par la technique multiniveaux.**

1 niveau	Fréquence (Hz)	50	250	350	550	650	850	950
	Ordre	FND	5	7	11	13	17	19
	Amplitude (A)	16.56	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Phase(°)	-56.5	193.4	192.7	172.4	178.2	200.3	180.2
	THD%	3.66						
5 niveaux	Fréquence (Hz)	50	250	350	550	650	850	950
	Ordre	FND	5	7	11	13	17	19
	Amplitude (A)	6.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Phase(°)	-56.5	264.8	254.7	108.3	100	136.6	266.6
	THD%	1.94						
7 niveaux	Fréquence (Hz)	50	250	350	550	650	850	950
	Ordre	FND	5	7	11	13	17	19
	Amplitude (A)	3.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Phase(°)	-56.4	-82.4	-87.6	93.4	93	92.3	-88
	THD%	0.81						

Tableau V.2: Résultat de l'analyse FFT du courant  $i_{r1}$ .

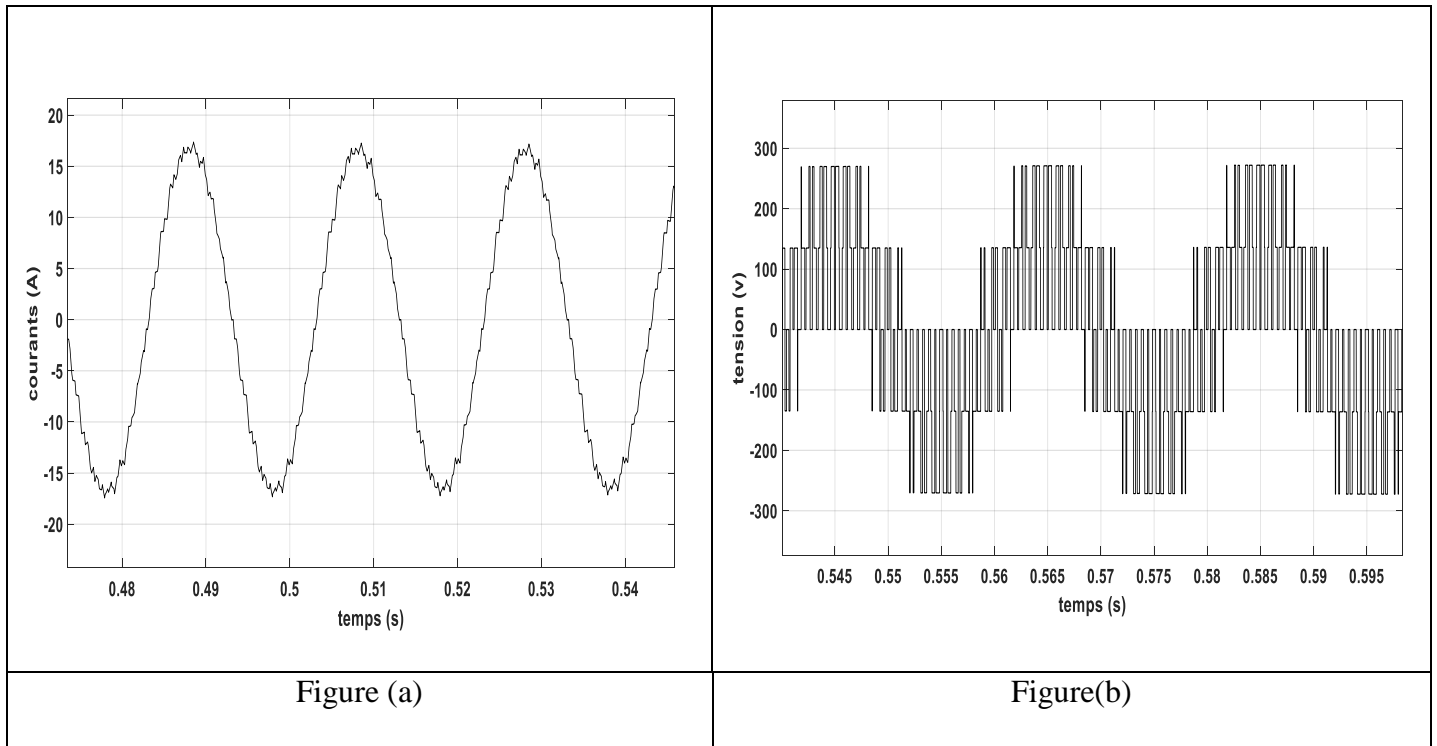


Figure V.5 : Tension et courant absorbé par la phase 1 du redresseur MLI à 1 niveau.

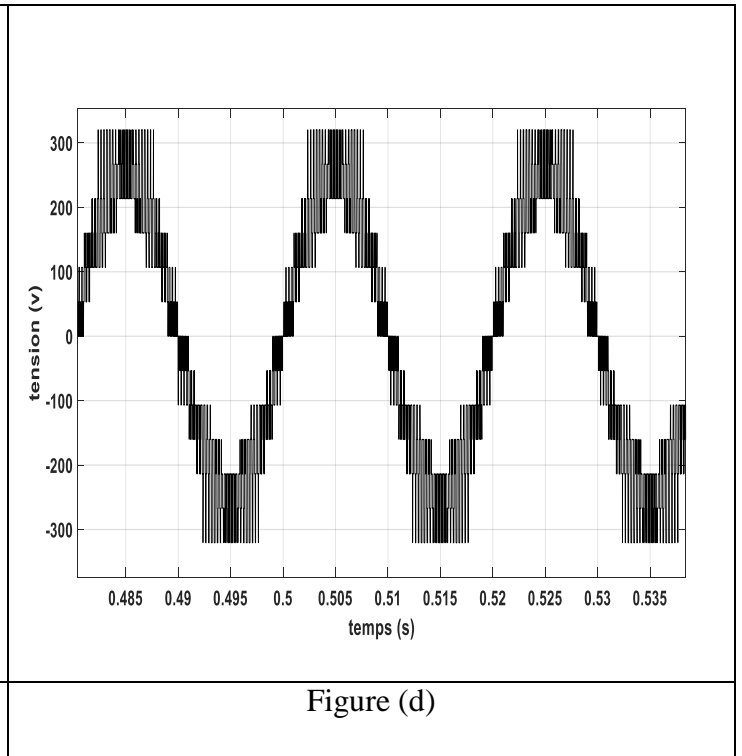
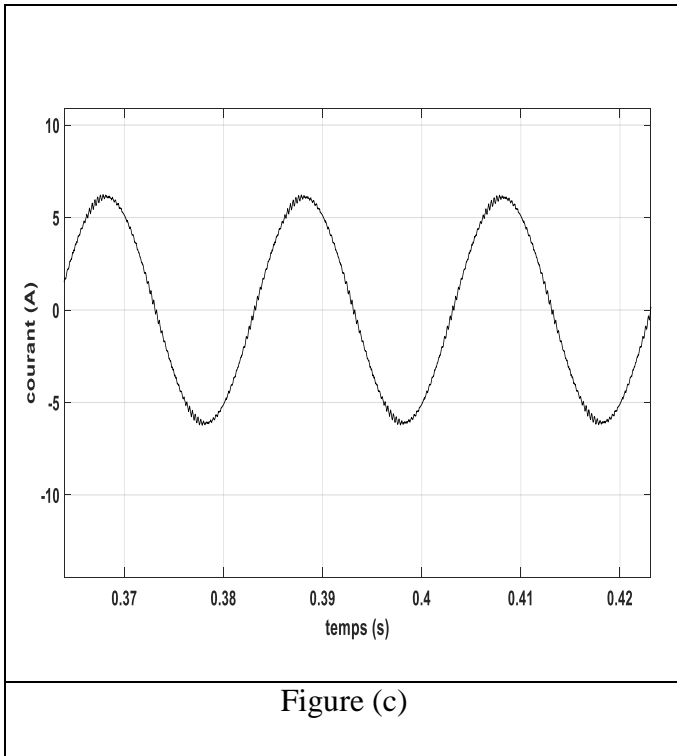


Figure V.6 : Tension et courant absorbé par la phase 1 du redresseur MLI à 5 niveaux.

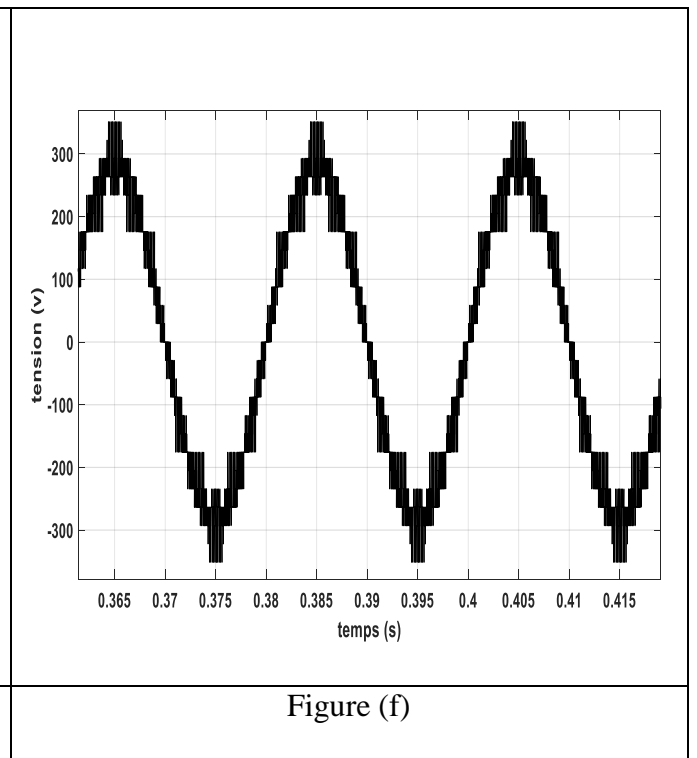
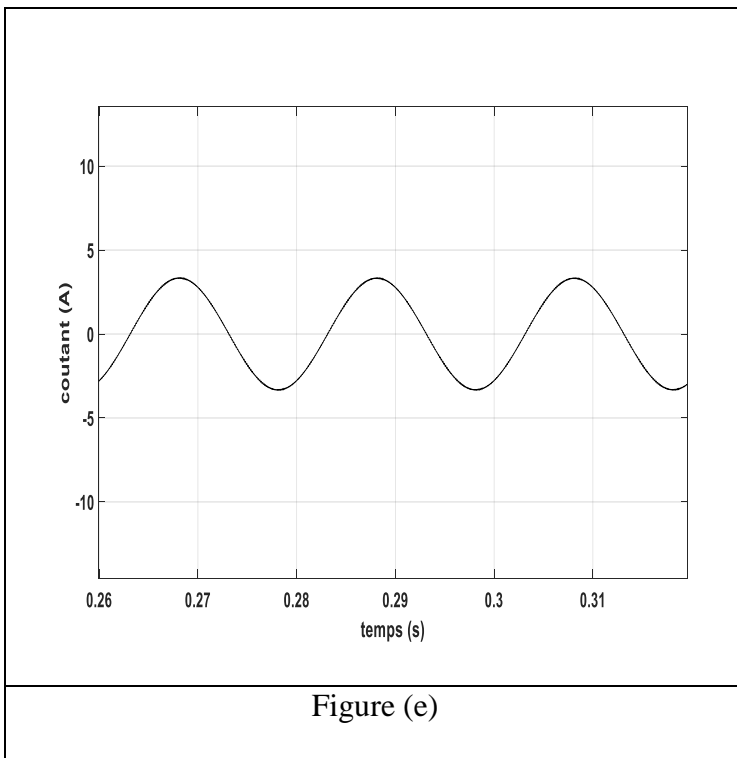


Figure V.7 : Tension et courant absorbé par la phase 1 du redresseur MLI à 7 niveaux.

### **V.3.3 Interprétation des résultats :**

Les résultats de l'analyse FFT du courant  $i_{r1}$  pour les trois niveaux (1,5 et 7 niveaux) sont présentés dans le Tableau V.2. Le THD diminue au fur et à mesure que le nombre de niveaux augmente. Ainsi le THD diminue de 3,66% (1 niveau) à 1,94% (5 niveaux) puis à 0,81% (7 niveaux). Les figures V.5, V.6 et V.7 montrent que l'amplitude du fondamental du courant consommé diminue également quand le nombre de niveaux augmente. Ainsi l'amplitude du fondamental du courant absorbé diminue de 16,56A (1 niveau) à 6,06A (5 niveaux) puis à 3,32A (7 niveaux). Les figures V.5, V.6 et V.7 montrent aussi que les tensions d'entrée du redresseur s'approchent de la forme sinusoïdale au fur et à mesure que le nombre de niveaux augmente. Cette observation sur la diminution du fondamental du courant absorbé s'explique par la tension du bus continu qui n'est pas régulée.

### **V.4 Conclusion :**

Au cours de ce chapitre, nous avons exposé le principe de fonctionnement, le modèle Matlab-Simulink et les résultats de simulation d'un redresseur commandé par MLI.

Les résultats de simulation ont montré que ce convertisseur ne pollue pas puisque son THD est inférieur à 5% même pour le simple niveau.

Les résultats de simulation ont montré aussi que la technique multiniveaux peut encore améliorer le THD.

Nous concluons qu'il est préférable d'opter pour des convertisseurs propres afin d'améliorer la qualité de l'énergie électrique dans les réseaux électriques et les entreprises industrielles, puisque leur coût est inférieur à celui des convertisseurs polluants, ajouté au coût des filtres.

# **Conclusion générale**

### Conclusion générale :

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre de la recherche de nouvelles solutions modernes, basées sur l'électronique de puissance, pour éliminer de manière harmonieuse la pollution du réseau électrique. La forme d'onde de la tension du réseau est influencée par la présence des harmoniques générées par des convertisseurs statiques de grande puissance. Ces derniers absorbent des courants distordus du réseau affectant négativement le taux d'harmonique (THD) qui dépasse considérablement les limites définies par les normes. Cette pollution affecte aussi la qualité de la tension par l'intermédiaire de l'impédance des lignes.

Pour faire face à la pollution harmonique causée par ces convertisseurs et restreindre leur diffusion dans le réseau, il est apparu nécessaire de développer dans le domaine industriel et sur le plan domestique des dispositifs curatifs tels que les filtres actifs et passifs d'une part et d'autre part de concevoir des convertisseurs statiques non polluants dans un cadre préventif.

L'objectif de ce mémoire était de purifier une charge polluante représentée par un pont redresseur triphasé à diodes qui alimente une charge résistive.

Nous avons dans un premier chapitre donné des généralités sur la qualité d'énergie électrique, et nous avons exposé quelques concepts liés aux perturbations qui impactent le réseau électrique, comme les harmoniques, les surtensions, les creux et les coupures de tension, etc.

Le second chapitre a été dédié à la modélisation et à la caractérisation d'une charge polluante, à savoir « le pont redresseur triphasé à diodes ». Le modèle de la charge polluante a été validé en confrontant les résultats de simulation et les résultats expérimentaux.

Par la suite, les chapitres suivants ont été dédiés aux solutions traditionnelles et modernes pour résoudre le problème de la pollution harmonique dans les réseaux électriques. Le filtrage passif, le filtrage actif et les convertisseurs non polluants sont les méthodes proposées.

Les filtres passifs sont utilisés comme solution classique ou traditionnelle. Le chapitre trois leur a été entièrement dédié. Une fois que le principe des filtres passifs a été exposé, les avantages et les inconvénients de ce filtre ont été énumérés. Sous Matlab-Simulink, nous avons décidé de représenter le filtre résonnant série, qui est composé d'un circuit RLC série, pour éliminer l'harmoniques d'ordre 5. Le modèle du filtre passif que nous avons développé a été validé en comparant les résultats expérimentaux et les résultats de simulation. L'inconvénient de cette méthode de filtrage réside dans l'utilisation d'un filtre passif par harmonique. De plus, ces filtres

## Conclusion générale.

---

sont extrêmement sensibles aux changements de charge et perdent leur efficacité au fil du temps.

Le chapitre quatre a abordé le filtrage actif, qui apporte une solution moderne à la qualité du filtrage et permet une amélioration du filtrage en utilisant la technique multiniveaux. Le filtre actif est un convertisseur statique (onduleur commandé en courant) qui a pour fonction d'injecter un courant contenant tous les courants harmoniques, mais en opposition de phase. Nous avons développé un modèle de filtre actif sous Matlab-Simulink et nous avons effectué des tests sur deux types de commandes : la commande à hystérésis a été testée avec deux pas de calcul différents  $10^{-5}$  s et  $10^{-6}$  s. En utilisant la commande à MLI multiniveaux, nous avons comparé les résultats obtenus en appliquant différents niveaux (1,3,5,7 et 9).

Le cinquième et dernier chapitre a été consacré à la modélisation d'un convertisseur propre. Il s'agit d'un pont redresseur triphasé commandé par MLI. Il absorbe un courant sinusoïdal, ce qui en fait un convertisseur non polluant. Nous avons développé le modèle du redresseur à MLI à un niveau sous Matlab-Simulink, puis nous avons amélioré ses performances en le généralisant à plusieurs niveaux (5 et 7). Nous avons discuté des différents résultats obtenus.

A l'issue de ce mémoire, nous avons étudié les différentes solutions à apporter à une charge polluante. Les solutions peuvent être classées d'abord en deux grandes classes : solutions curatives (comme le filtrage) et préventives (comme les redresseurs propres). Les solutions curatives peuvent elles-mêmes être divisées en deux grandes familles : les solutions traditionnelles et les solutions modernes.

Par des tests par simulation des différents modèles développés sous Matlab, nous avons constaté les améliorations apportées par les différentes solutions. Toutes les solutions étudiées permettent d'obtenir des résultats qui respectent les normes imposées. La différence entre elles réside dans le prix, l'encombrement et la complexité. Nous avons constaté également que la longueur du pas de calcul a une grande influence sur les résultats obtenus et qu'un mauvais pas de calcul peut aboutir à des résultats erronés.

# **Bibliographie**

## Bibliographie.

---

### Bibliographie :

[1] **OMEIRI AMAR.** « Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant » thèse de doctorat en sciences option : commande électrique, université badji Mokhtar- Annaba, 2007.

[2] **Roland CALVAS.** « Les perturbations électriques en BT », cahier technique numéro 141 de Schneider électrique, 1999.

[3] **Djaffar Ould Abdeslam.** « Technique neuromimétique pour la commande dans Les systèmes électriques, application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques, basse tension », Thèse de Doctorat. Université de haute alsace, 2005.

[4] **Philippe FERRACCI.** « La qualité de l'énergie électrique », cahier technique numéro 199 de Schneider électrique ,1999.

[5] **T. DEFLANDRE et P. MAURS.** « Les Harmoniques sur les Réseaux Electriques ´ ». Direction des Etudes et Recherche en France -Edition EYROLLES, 1998.

[6] **L. ZELLOUMA.** « Filtrage actif Parallèle des Harmoniques du Courant Génères Par un Pont Redresseur Triphasé non Commandé ». mémoire de magister, Université de Badji Mokhtar, Annaba, 2006.

[7] **S. Kerrouche.** « Développement et implémentation d'un système de filtrage actif de puissance à base d'onduleur triphasé » Mémoire de magister, Université Ferhat Abbas Sétif.

[8] **Eric Félice.** « Perturbations harmoniques : effets, origine, mesures, diagnostic et remèdes », DUNOD, Paris, 2000.

[9] IEEE STD 519-1992, « IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems », IEEE 519 working Group., 1992.

[10] IEEE STD 1159-1995, « IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality », 1995.

[11] **F. Hamoudi.** « Contribution aux stratégies de commande avancées d'un filtre actif shunt à quatre fils », Thèse Doctorat. Université de Batna 2012.

[12] **M. Magraoul.** « Validation de techniques de commande d'un filtre actif parallèle », Mémoire génie électrique. Université du Québec 2007.

[13] **S.A. Tadjer.** « Etude d'un système de compensation d'harmonique en utilisant un générateur photovoltaïque GPV », Mémoire de Magister. Université de Boumerdes 2008.

## Bibliographie.

---

- [14] **S. Rechka.** « Etude de méthodes de filtrage des harmoniques dans les réseaux électriques de distribution », Mémoire en génie électrique. Université du Québec à Trois-Rivières 2002.
- [15] **Hideak Fujita, Hirofumi Akagi.** « A practical approach to harmonic compensation in power systems - series connection of passive and active filters », Industry Applications Society Annual Meeting, 1990, Conference Record of the 1990 IEEE, 1990.
- [16] **M. M. Abdusalam.** « Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales ». Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, France. 2008.
- [17] <https://www.electricity-magnetism.org/fr>.
- [18] **E. Bettega J-N. Fiorina.** « Harmoniques : convertisseurs propres et compensateurs actifs », Cahier technique n° 183.
- [19] **Thierry deflandre, Philippe Maurras.** « Les harmoniques sur les réseaux électriques » Edition Eyrolles 61, Bd saint-germain paris 5° 1998.
- [20] **KIFOUCHE REZKI.** « Identification des courants harmoniques et génération du courant référence "application au convertisseur statique" » mémoire magister en génie électrique Université M'hamed Bouguarra Boumerdes ,2005.
- [21] **S. GUFFON,** « modélisation et commande à structure variable de filtres actifs de puissance ». Thèse de doctorat, institut national polytechnique de grenoble,2000.
- [22] **S.P. Litran** « Control strategy for hybrid power filter to compensate unbalanced and non-linear, three phase loads », EPE 2009.
- [23] **T. Gouraud,** « Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution électrique », Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes, Université de Nantes, Janvier 1997.
- [24] **AKAGI, Hirofumi, KANAZAWA, Yoshihira, et NABAE, Akira.** « Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits »,1983.
- [25] **D. OULD ABDESLAM, P. WIRA, D. FLIELLER, J. MERKLE.** «Power harmonic identification and compensation with an artificial neural network method». International Symposium on Industrial Electronics (ISIE'2006), Montreal, Canada, 2006.
- [26] **J. Xu.** « Filtrage actif parallèle des harmoniques des réseaux de distribution d'électricité », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Janvier 1994.

## **Bibliographie.**

---

[27] **E.S. Gholipour.** « Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques », Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, Octobre 2003.

[28] **Kebiri Samia.** « Modélisation et simulation d'un filtre actif multiniveaux », mémoire de Magister, UMMTO, 2009.

[29] **B. KHALIFA.** « Réalisation d'un banc d'essai pour la Commande et l'Observation des Convertisseurs Multicellulaires Série ; Approche Hybride », Thèse de docteur de l'Université de Cergy-pontoise, 2009.

[30] **B. Abdelmalek.** « Etude des Convertisseurs Statiques destinés à la Qualité de l'Energie Electrique », mémoire de magister, Université de Constantine, 2009.

## ***Résumé :***

Les charges non linéaires prolifèrent dans les réseaux électriques. Elles sont apparues à cause du besoin de vitesse variable et de dynamique de plus en plus élevées exigées par les applications industrielles.

Ces charges non linéaires sont dans leur grande majorité des convertisseurs statiques (onduleurs, redresseurs, gradateurs, etc...). Elles représentent la principale source d'injection de courants harmoniques dans le réseau électrique. Ces harmoniques sont la principale cause de beaucoup d'inconvénient, tels que chute de tension, échauffements supplémentaires, etc...

Le travail développé dans ce mémoire rentre dans le cadre de la dépollution d'une charge polluante représentée par un pont redresseur triphasé à diodes. Les solutions de dépollution étudiées dans ce mémoire sont le filtrage passif et actif. Nous avons proposé une amélioration des performances du filtrage actif par la technique du multiniveaux. Nous avons enfin présenté et étudié par simulation numérique, un convertisseur non polluant.

## ***Summary***

Nonlinear loads proliferate in electrical networks. They emerged because of the need for increasingly variable speed and high dynamics demanded by industrial applications. The vast majority of these non-linear loads are static converters (inverters, rectifiers, dimmers, etc.). They represent the main source of current harmonic injections into the electrical network. These harmonics are the main cause of many inconveniences, such as voltage drop, additional heating, etc. The work developed in this dissertation falls within the framework of the depollution of a polluting load represented by a three-phase rectifier bridge with diodes. The pollution control solutions studied in this dissertation are passive and active filtering. We proposed an improvement in the performance of active filtering using the multilevel technique. We finally presented and studied by numerical simulation, a non-polluting converter.