

Ministère De L'enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique  
Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou  
Faculté De Génie Electrique Et D'informatique  
Département D'électrotechnique



## ***Mémoire Fin d'Etudes de Master Académique***

Spécialité : Electrotechnique

Option : Machines Electriques

*Présenté par :*

**GUENDOUD Djedjiga**

**BELACEL Billal**

*Thème :*

# **Filtrage actif de puissance**

*Soutenu le :* 21/07/2016

*Devant le jury d'examen composé de :*

<b>M. REZGUI Slimane</b>	Maître assistant classe A UMMTO	<b>Président</b>
<b>M. DICHE Arezki</b>	Maître assistant classe A UMMTO	<b>Rapporteur</b>
<b>M. GHEDAMSI Kaci</b>	Professeur UAMB	<b>Co-Rapporteur</b>
<b>M. NAMANI Farid</b>	Maître assistant classe A UMMTO	<b>Examineur</b>
<b>Mme. BOUALI-DJADEL Ferroudja</b>	Maître assistante classe A UMMTO	<b>Examinatrice</b>

Nous remercions :

Monsieur A.DISHE, Maître assistant classe A à l'Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, pour l'honneur qu'il nous fait d'encadrer ce mémoire, sa disponibilité, ses conseils et sa tolérance. Nous tenons aussi à lui exprimer notre sincère reconnaissance pour l'aide précieuse qu'il nous a apporté et notre profond respect à son égard.

Monsieur S. REZGUI, Maître assistant classe A à l'Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, pour nous avoir fait l'honneur d'accepter la présidence du jury d'examen de ce mémoire.

Messieurs F.NAMANI, Maître assistant classe A à l'Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, F.BOUALI-DJADEL, Maître assistante classe A à l'Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, pour avoir accepté de faire partie du jury d'examen de ce mémoire.

Particulièrement Monsieur K.GHEDAMSI, Professeur à l'Université Abderrahmane MIRA de Bejaïa, pour sa sympathie, sa serviabilité et pour les conditions très favorable qu'il nous a procuré pour mener à bien ce mémoire.

Nous souhaitons témoigner toute notre gratitude et notre reconnaissance à notre encadreur à l'entreprise électro-industrie madame S.HEDJAZE pour sa disponibilité, sans oublier tout l'ensemble du personnel pour leur accueil sympathique et leur coopération professionnelle tout au long de notre stage.

# Dédicaces

Nous dédions ce travail à toutes nos familles, nos amis  
et en particulier à nos parents

# Sommaire

<b>Introduction générale</b>	1
Chapitre I : Origine des harmoniques et leurs effets sur le réseau d'alimentation	
<b>I.1 Introduction</b>	3
<b>I.2 Définition de l'harmonique</b>	3
I.2.1 Harmonique de Courant et de tension	5
I.2.2 Le taux Individuel de distorsion	6
I.2.3 Le taux Global de distorsion	6
I.2.4 Propagation des harmoniques	7
I.2.5 Les résonances	7
<b>I.3 Origines et sources des harmoniques</b>	9
I.3.1 Emission en tension	9
I.3.2 Emission en courant	10
<b>I.4 Indésirables des harmoniques sur les installations</b>	11
I.4.1 Effets instantanés	11
I.4.2 Effets différés	11
I.4.3 Effets à court terme	12
I.4.4 Effets à long terme	12
<b>I.5 Normes</b>	12
<b>I.6 Conclusion</b>	18
Chapitre II : solutions de dépollution es réseaux	
<b>II.1 Introduction</b>	19
<b>II.2 Solutions de dépollution traditionnelles</b>	19
II.2.1 Rééquilibrage des courants du réseau électrique	19
II.2.2 Utilisation une inductance (selfs) série	19
II.2.3 Transformateur à couplage spécial	19
II.2.4 Renforcement de la puissance de court-circuit	20
II.2.5 Compensation de la puissance réactive	20
II.2.6 Filtrage passif	20
II.2.7 Filtre passif résonant	21
II.2.8 Filtre passif amorti	21

<b>II.3 Solutions de dépollution modernes</b>	22
II.3.1 Filtres actifs	22
II.3.2 Types de filtres actifs	22
II.3.2.1 Filtre actif série	22
II.3.2.2 Filtre actif parallèle	23
II.3.2.3 La combinaison parallèle-série actifs (UPQC)	24
II.3.2.4 Filtre actif hybride	24
II.3.2.4.1 Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles	25
II.3.2.4.2 Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles	25
II.3.2.4.3 Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle	26
<b>II.4 Comparaison des différents filtrages</b>	26
<b>II.5 Conclusion</b>	27
Chapitre III: Etude et modélisation d'un filtre actif parallèle	
<b>III.1 Introduction</b>	28
<b>III.2 Description du système</b>	28
III.2.1 Modélisation du Réseau d'Alimentation	29
III.2.2 Modélisation de la Charge	29
III.2.3 Modèle du filtre actif	30
<b>III.3 Etude du filtre actif</b>	31
III.3.1 Partie puissance	31
III.3.1.1 Modélisation de l'onduleur de tension	31
III.3.1.2 Source de tension continue	32
III.3.1.3 Filtre de sortie	32
III.3.2 Partie commande	33
III.3.2.1 Détermination des courants de référence	33
III.3.2.1.1 Généralités sur les méthodes d'identification	33
III.3.2.1.2 Identification des courants perturbateurs par la méthode des puissances instantanées	34
III.3.2.2 Commande de l'onduleur	36
III.3.2.2.1 Commande par MLI	36
III.3.2.2.2 Commande par hystérésis	37
<b>III.4 Conclusion</b>	37
Chapitre IV : Simulation et interprétations des résultats	
<b>IV.1 Introduction</b>	38

<b>IV.2 (Réseau / charge non linéaire) et (Réseau / charge non linéaire/ filtre actif)</b>	38
<b>IV.3 Conclusion</b>	43
<b>Conclusion générale</b>	44
<b>Bibliographie</b>	

### Introduction générale

Depuis de nombreuses années, les fournisseurs d'énergie électrique s'efforcent d'en garantir la qualité. Les premiers efforts se sont portés sur la continuité de service afin de rendre toujours disponible l'accès à l'énergie chez l'utilisateur.

En se propageant à travers les réseaux électriques, les tensions et les courants sont idéalement des ondes sinusoïdales à la fréquence fondamentale du réseau. Cependant, selon les travaux de recherches publiées, nous constatons que la qualité de l'onde électrique est loin d'être parfaite, à cause d'une large utilisation de charges non linéaires, telles que des redresseurs à diodes ou thyristors, des alimentations à découpage, etc.

En effet, ces charges non linéaires génèrent des harmoniques de courant et consomment de la puissance réactive, ce qui conduit à des conséquences directes sur la forme des ondes de tension et de courants qui deviennent non sinusoïdaux et donc un dysfonctionnement de plusieurs appareils sensibles à ce genre de problèmes tels que les appareils médicaux, ordinateurs, automates programmables, machines tournantes...etc. Par conséquent, il est nécessaire de réduire les harmoniques dominants en dessous de 5% comme spécifié dans la norme harmonique IEEE 519 (1992).

Pour faire face à ce problème, la solution classique qui est connue depuis bien longtemps consiste en l'utilisation des filtres passifs. Cette solution est la plus répandue et pratiquement la plus simple et la moins chère, mais elle présente deux inconvénients majeurs. Le premier est lié au phénomène de résonance avec le réseau qui est à l'origine de l'amplification de tout harmonique à fréquence voisine de celle du réseau. Le deuxième inconvénient est la dépendance des performances du filtre passif des caractéristiques du réseau sur lequel il est connecté.

Cependant, les progrès remarquables réalisés au cours des dernières années, dans le domaine des semi-conducteurs de puissance entièrement commandables, les thyristors et les transistors en particulier, ont permis de concevoir des dispositifs d'élimination des harmoniques auto-adaptables appelés compensateurs actifs d'harmoniques, ou encore filtres actifs dont l'objectif est l'élimination des problèmes intrinsèques des filtres passifs.

Le filtre actif est un onduleur de tension ou de courant qui injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci conduisant ainsi à des courants sinusoïdaux courant côté réseau. Ainsi

## Introduction générale

---

l'objectif du filtre actif parallèle consiste à empêcher les courants harmoniques produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif.

Dans ce mémoire nous avons étudié le filtrage actif des harmoniques générés par un redresseur triphasé à diodes en pont de Graëtz. Nous avons ensuite procédé à la simulation numérique. Pour ce faire, le travail présenté est réparti en quatre chapitres.

Le premier chapitre du mémoire recense les perturbations qui peuvent apparaître dans un réseau électrique basse tension et expose leurs origines, leurs analyses et leurs conséquences ainsi que les normes visant à diminuer leurs proliférations.

Dans le second chapitre, nous présenterons les solutions de dépollution des réseaux électriques existantes, tant traditionnelles que modernes. L'utilisation du filtre actif parallèle a été retenue pour la suite de nos travaux.

Le troisième chapitre fait l'objet de l'étude et modélisation d'un filtre actif parallèle.

Le quatrième chapitre est consacré à l'interprétation des résultats de la simulation sous Matlab/Simulink de système réseau, charge et filtre actif parallèle commandé par hystérésis.

Finalement, nous terminons notre travail par une conclusion générale.

## CHAPITRE I : Origine des harmoniques et leurs effets sur le réseau d'alimentation

### 1.1.Introduction

Le distributeur d'énergie doit fournir à l'ensemble de ses clients et utilisateurs une énergie de bonne qualité. Idéalement, l'électricité serait distribuée sous une forme de tension sinusoïdale parfaite d'amplitude et de fréquence constante.

La qualité de cette énergie dépend de celle de la tension aux points de raccordement. Toutefois, 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 nombreuses. Outre les incidents relatifs à la nature physique et matérielle des organes d'exploitation du réseau, il existe aussi des causes intrinsèques spécifiques au fonctionnement de certains récepteurs particuliers.

L'un des phénomènes les plus influents sur la qualité de l'énergie électrique distribuée au consommateur est le phénomène des harmoniques.

Afin d'éviter le dysfonctionnement, voire la destruction des composants du réseau électrique ou des récepteurs finaux, il est indispensable de comprendre l'origine des harmoniques et de chercher les solutions adéquates pour les supprimer.

### 1.2.Définition de l'harmonique

Un harmonique est défini comme étant une composante sinusoïdale d'un signal périodique, ayant une fréquence multiple de l'onde 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  $h=40$ ). Mais, on peut observer des sous-harmoniques ou des inter-harmoniques à des fréquences non multiples entières de la fréquence fondamentale [9,10].

Toute fonction périodique peut être représentée par une série de Fourier sous la forme :

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

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

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

$Y_0$  : Valeur moyenne ou composante continue du signal  $y(t)$ .

$\omega$  : Pulsation fondamentale ( $2\pi.f = 2\pi/T$ ).

h : rang de l'harmonique.

### 1.2.1. Harmonique de Courant et de tension

Les harmoniques présents sur les réseaux électriques proviennent de l'utilisation de charges non linéaires. Quand elles sont connectées au réseau d'une certaine fréquence, elles absorbent un courant non sinusoïdal mais de même fréquence [9].

Ces charges se comportent comme des sources de courant harmonique, c'est-à-dire que le courant est fixé par la charge et non par la tension du réseau. Ces courants provoquent, dans le réseau, des chutes de tensions harmoniques selon la loi d'Ohm :

$$V_h = Z_h I_h \quad \text{I.2}$$

$V_h$ : Tension harmonique de rang h ;

$Z_h$ : Impédances harmoniques de rang h ;

$I_h$ : Courant harmonique de rang h.

Soit par exemple la figure suivante représentant la forme de l'onde d'un courant pollué avec, en même temps, l'image des différents courants harmoniques le constituant qu'on peut exprimer grâce à une représentation en série de Fourier du courant global :

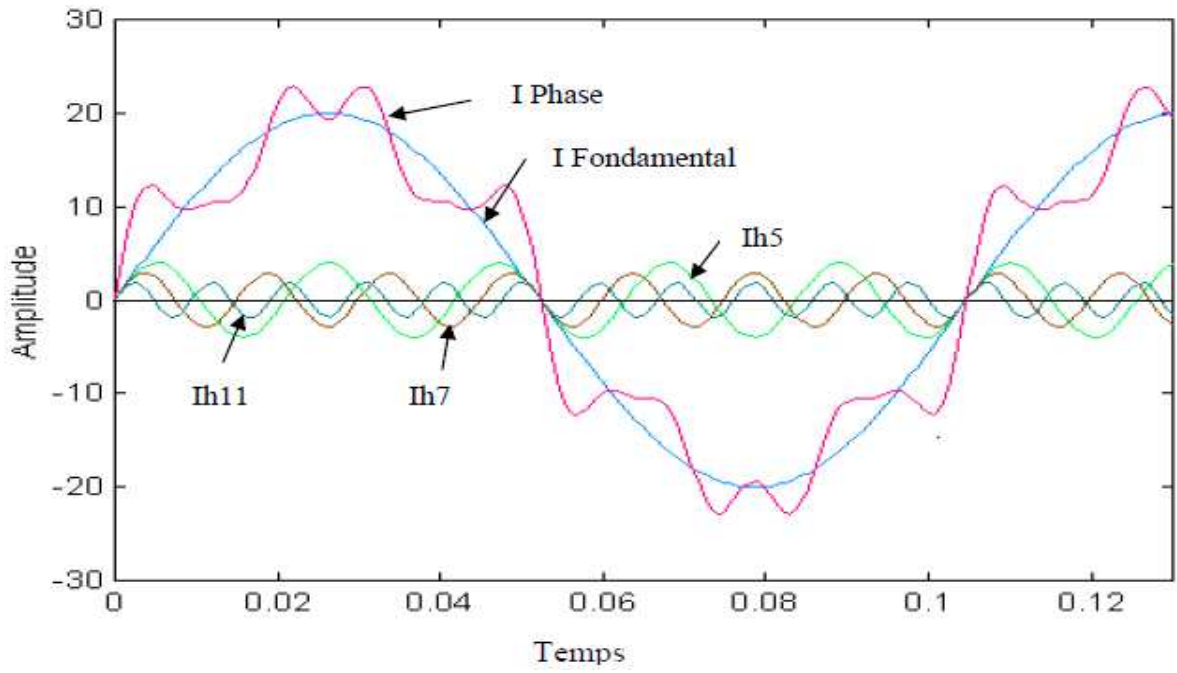


Fig.I.1 La représentation de la forme de l'onde d'un courant déformé avec les différents courants harmoniques le constituant.

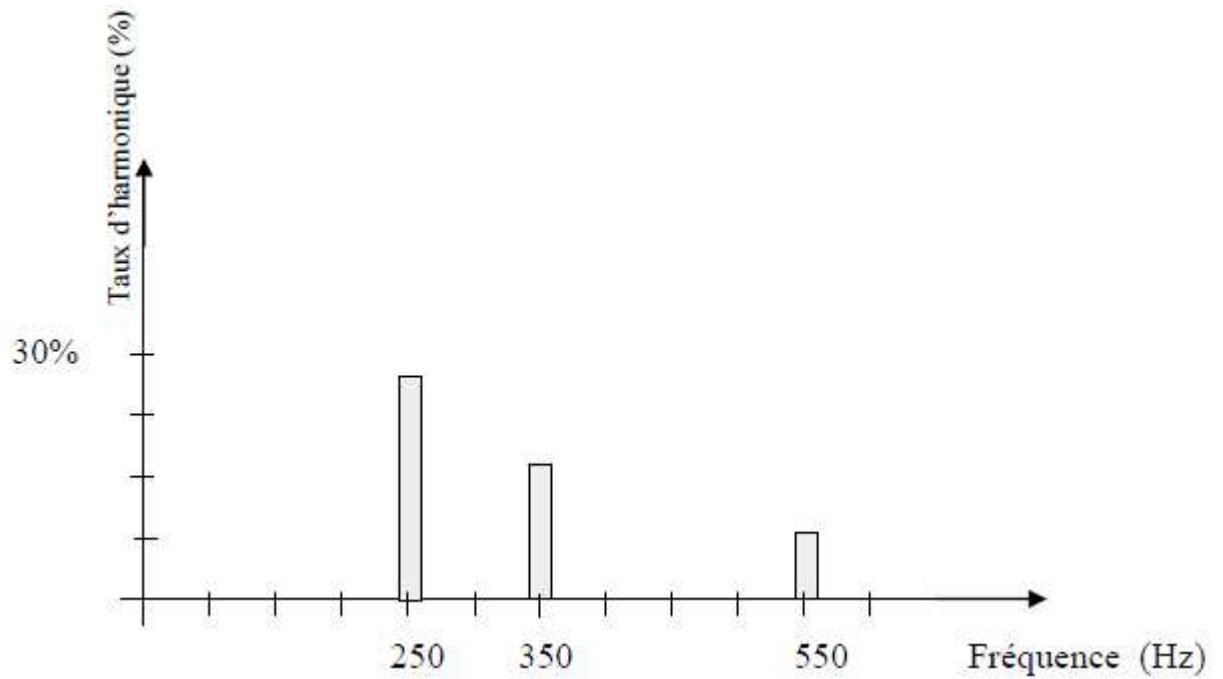


Fig.I.2 Représentation spectrale des harmoniques

### 1.2.2. Le taux Individuel de distorsion

Mesure l'importance de chaque rang par rapport au fondamental.

$$D(\%) = \frac{Y_h}{Y_1} \cdot 100 \quad \text{I.3}$$

### 1.2.3. Le taux Global de distorsion

Le taux global de distorsion en courant ou THDI (Total Harmonic Distorsion - I pour courant), mesure l'importance des harmoniques de tous les rangs par rapport au fondamental.

$$THD(\%) = \frac{\sqrt{\sum_2^{\infty} Y_h^2}}{Y_1} \quad \text{I.4}$$

Il faut préciser s'il s'agit d'un *THD* de courant : *THDI* ou de tension : *THDV*. Contrairement au niveau de courant, le niveau de tension est une valeur fixe et prédéfinie pour un réseau. On définit donc les contraintes en termes de *THDV*.

Le fait d'exprimer l'amplitude de chaque harmonique en valeur efficace, permet de quantifier l'effet thermique de l'ensemble.

En effet, supposons que ce courant  $i(t)$  traverse une résistance  $R$ , la puissance dissipée par effet Joule est :

$$P_j = R * I^2 = R * I_1^2 + R * I_5^2 + R * I_7^2 + R * I_{11}^2 + \dots \quad \text{I.5}$$

Ce qui permet de calculer :

$$I_{eff} = \sqrt{\sum_1^{\infty} I_h^2} \quad \text{I.6}$$

### 1.2.4. Propagation des harmoniques

La susceptibilité de la plupart des équipements à la distorsion harmonique, dépend de la tension harmonique à ses bornes. Cette tension est obtenue par le produit du courant harmonique et de l'impédance harmonique du réseau à la fréquence du courant injecté (rang h).

$$V_h = Z_h \cdot I_h \quad \text{I.7}$$

De ce fait, la tension harmonique peut atteindre un niveau élevé si le courant harmonique rencontre à une fréquence donnée, une impédance élevée ou un niveau faible dans le cas contraire [10,20].

Les ouvrages qui composent les réseaux de distribution (lignes, transformateurs) sont très souvent inductifs aux fréquences harmoniques de rang faible ( $= < 7$ ), comme à la fréquence fondamentale. Le problème de propagation des harmoniques vers l'amont se ramène à l'état d'un simple diviseur de courant. La charge non linéaire génératrice d'harmoniques apparaît comme une source de courant, celui-ci se répartit entre les charges voisines et les lignes conduisant au poste source.

Sur les réseaux de transport, l'étude de la propagation des harmoniques est plus complexe, car les lignes ne sont plus inductives. De plus, elles sont disposées selon une structure maillée.

Généralement, les tensions s'atténuent lorsque l'on remonte vers les niveaux de tensions élevées et s'atténuent très peu dans l'autre sens. Dans certains cas cependant, on peut observer localement des amplifications de tensions harmoniques à des fréquences particulières. Ces amplifications sont généralement dues à des résonances entre l'inductance qui représente le réseau et les condensateurs de compensation implantés, soit en réseau, soit chez les clients. Dans ce cas, l'impédance  $Z_h$  du réseau devient élevée à cette fréquence particulière appelée de résonance [9,21].

### 1.2.5 Les résonances

Sur les réseaux, on rencontre deux types de résonances (résonance parallèle et résonance série). La présence de résonances entraîne des contraintes supplémentaires sur certains matériels, et notamment sur les condensateurs, qui peuvent alors se détériorer rapidement. Certaines précautions doivent donc être prises lors de l'installation de ces matériels, de manière à ne pas amplifier les courants et les tensions harmoniques présents sur les réseaux [25].

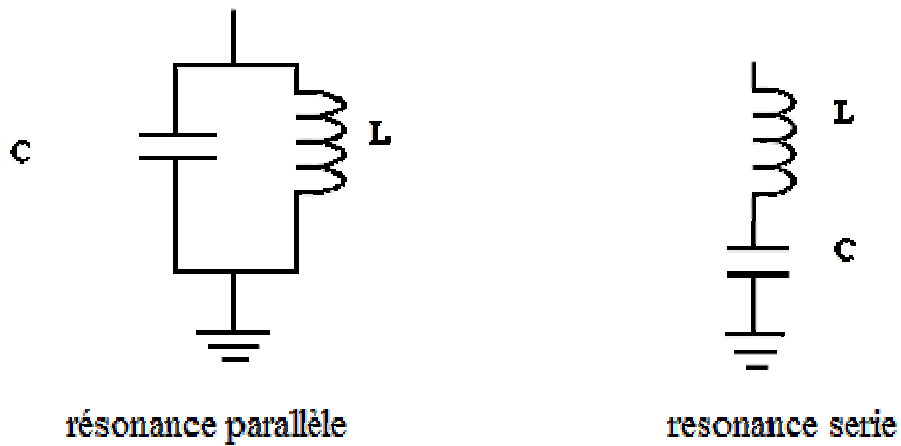


Fig.I-3 Différents types de résonance rencontrés sur le réseau

♦ L'impédance d'une inductance et d'une capacité mises en parallèle est donnée par la fonction suivante :

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{j\omega L} + j\omega C} \tag{I.8}$$

La fréquence de résonance est alors donnée par :

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \tag{I.9}$$

L'impédance prend une valeur infinie,  $Z = \infty$

♦ L'impédance d'une capacité et d'une inductance montées en série est donnée par :

$$Z = j\omega L + \frac{1}{j\omega C} \tag{I.10}$$

Lorsque  $Z = 0$ , l'impédance prend une valeur nulle. La fréquence de résonance est alors donnée par :

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \tag{I.11}$$

### I-3 Origines et sources des harmoniques

Dans la plupart des cas, les harmoniques de tensions ou de courants présents sur les réseaux électriques proviennent de l'utilisation des charges non linéaires, tels que les convertisseurs statiques.

#### I-3-1 Emission en tension

L'émission harmonique en tension due aux matériels du réseau entre pour une faible part, et avec des taux généralement faible, dans la distorsion du réseau. Elle est due aux imperfections de construction (dissymétrie, distribution non sinusoïdale du champ dans les alternateurs, saturation des circuits magnétiques...) des bobinages des machines tournantes, des moteurs, des transformateurs.

##### I-3-1-1 Alternateurs

Les alternateurs des centrales de production fournissent une tension d'alimentation qui contient très peu d'harmoniques ( $<0.5\%$  selon la norme harmonique IEEE 519 (1992)). Le contenu harmonique de la tension générée par les alternateurs est lié à la qualité du bobinage et des pièces polaires qui assurent la forme sinusoïdale de l'onde. Sur un groupe électrogène, le taux de distorsion harmonique en tension est généralement inférieur à 5% à vide et inférieur à 1% lorsque le groupe électrogène débite à pleine puissance sur une charge linéaire.

##### I-3-1-2 Transformateurs

Les transformateurs peuvent être générateurs de tensions harmoniques lorsqu'ils fonctionnent en régime saturé. Sur les réseaux, le taux de distorsion harmonique en tension dû à ces appareils reste toujours inférieur au pourcent.

##### I-3-1-3 Alimentations statiques ininterrompibles (ASI)

Ces dispositifs ont des performances très intéressantes pour la protection du matériel contre les creux de tension et les coupures. En revanche, ils ont parfois des limitations dans le domaine harmonique qu'il convient de connaître pour bien les maîtriser. En effet, le réseau protégé alimente généralement des charges non linéaires comme du matériel informatique.

Pour une ASI d'une puissance de 80KVA, le taux de distorsion harmonique en tension est inférieur à 4% pour une charge linéaire, est inférieur à 7% pour une charge non linéaire.

En général, le taux de distorsion harmonique en tension diminue avec l'augmentation de la puissance de l'ASI.

Il faut bien noter qu'en charge, le taux de tension harmonique est dû essentiellement aux courants harmoniques créés par les charges non linéaires qui sont alimentées par l'ASI.

### **I-3-2 Emission en courant**

Les charges non linéaires consomment un courant qui n'est pas sinusoïdal. Elles représentent les principales sources d'émission en courants harmoniques sur les réseaux.

#### **I-3-2-1 Le redresseur triphasé à thyristors**

Le redresseur triphasé à thyristors, ou pont de Graëtz, constitue l'un des montages de l'électronique de puissance les plus répandus dans le secteur industriel. Il représente 55% de la puissance des matériels électroniques de puissance. Dans le domaine de la vitesse variable, les redresseurs triphasés à thyristors sont la principale source de pollution harmonique dans le secteur industriel.

#### **I-3-2-2 Les charges non linéaires passives**

On distingue trois types de charges passives non linéaires. Ce sont, d'une part, les lampes et les petits moteurs dans les secteurs tertiaire, domestique et industriel et, d'autre part, les fours à arc dans le secteur industriel.

##### **• Les lampes**

Deux types de lampes produisent des courants harmoniques :

Les lampes fluorescentes et les lampes à vapeur haute pression. Elles représentent les deux tiers de la puissance consommée par l'éclairage.

La génération d'harmoniques dans ces lampes est liée à la nature fortement non linéaire du phénomène entraînant l'illumination, ainsi qu'à la présence d'un ballast.

##### **• Les appareils à arc électrique**

Les appareils à arc électrique regroupent les fours à arc à courant alternatif, dont la puissance peut atteindre plusieurs dizaines de MW, et les machines de soudure à l'arc, à courant alternatif ou continu [2,10].

### **I-4 Effets indésirables des harmoniques sur les installations**

Les tensions et courants superposés à l'onde fondamentale conjuguent leurs effets sur les appareils et les équipements utilisés. Ces grandeurs harmoniques ont des effets différents selon les récepteurs rencontrés [1,9].

#### **I-4-1 Effets instantanés**

Les effets instantanés sont les effets immédiats sur le fonctionnement d'un appareil comme le bruit qui peut apparaître dans un appareil téléphonique.

Les effets instantanés concernent les appareils produisant une image électronique (écran d'ordinateur, téléviseur), les appareils produisant un son censé être de bonne qualité (chaîne HI-FI, téléphone) ou la précision des appareils de mesure. Les harmoniques peuvent entraîner le mauvais fonctionnement des systèmes électroniques utilisant la tension comme référence. Les compteurs d'énergie présentent des erreurs supplémentaires en présence d'harmoniques. Les courants harmoniques génèrent des vibrations et bruits acoustiques, dans les appareils électromagnétiques tels que les transformateurs, inductances et machines tournantes [10].

Des perturbations surviennent lorsqu'une ligne à courant faible chemine le long d'une canalisation de distribution électrique avec courants et tensions déformés.

#### **I-4-2 Effets différés**

Les effets différés se manifestent après une exposition plus ou moins longue au phénomène. Ils se traduisent par une perte partielle de fonctionnalité, une indisponibilité ou même une destruction complète de l'appareil. Les effets différés peuvent être classés en fonction du délai avant détérioration. On distingue les effets à court terme (jusqu'à quelques secondes), les effets à moyen terme (de quelques secondes à quelques heures) et les effets à long terme (de quelques heures à quelques années).

Les effets différés sont souvent liés à un sur-échauffement plus ou moins important. Ces effets sont dus essentiellement à deux phénomènes :

- l'échauffement des conducteurs ou des composants traversés par les courants harmoniques ;
- le vieillissement des isolants qui peut être dû soit à une contrainte en tension consécutive à la présence de tensions harmoniques, et donc à une augmentation locale des courants de fuite, soit à

l'échauffement exagéré des conducteurs. L'impact d'une perturbation harmonique sur un appareil donné est fonction des constantes de temps et d'échauffement mises en jeu et du niveau de perturbation.

### **I-4-2-1 Effets à court terme**

Ils concernent essentiellement deux types d'équipement :

- les composants à faible constante de temps thermique comme les étages d'alimentation des appareils électroniques,
- les éléments susceptibles d'entrer en résonance ou situés sur le trajet d'un courant amplifié par une résonance, comme les condensateurs, les disjoncteurs ou les petits transformateurs.

### **I-4-2-2 Effets à moyen et long terme**

Pour les effets à moyen et long terme, on trouve les câbles qui peuvent être le siège de suréchauffement du neutre, les organes de sectionnement, les équipements bobinés comme les transformateurs ou les moteurs. Pour les effets à moyen terme, il y a en général des niveaux de tension harmonique significatifs sur le réseau qui permettent un diagnostic relativement aisé.

Les effets à long terme concernent tous les types d'équipements et sont liés à la présence de niveaux d'harmoniques moins importants. Ils se traduisent par un vieillissement prématuré des moteurs, des transformateurs, des câbles et des parasurtenseurs. Les effets à long terme ne sont pas faciles à relier de manière certaine à la présence d'harmoniques.

## **I-5 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 réalisent la principale activité de normalisation dans le domaine des perturbations électriques au niveau mondial mais n'ont pas une uniformité de critères en ce qui concerne la définition des interactions entre le réseau et les charges connectées.

L'objectif des normes et des réglementations est de limiter les dysfonctionnements occasionnés par les harmoniques. La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) définit le

niveau des courants et des tensions harmoniques à ne pas dépasser par une série de normes de compatibilité électromagnétique (CEI 61000). Nous pouvons citer à titre d'exemple:

**La norme CEI 61000-2-2:** elle définit les niveaux de compatibilité de tension harmoniques sur les réseaux publics basse tension. Elle est représentée sur le tableau 1.2. Cette norme vise à protéger les équipements raccordés sur un réseau basse tension déformé.

Rangs impairs		Rangs impairs		Rangs pairs	
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
13	3	21	0,2	8	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 1.2 :** Niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux publics basse tension (norme CEI 61000-2-2)

**La norme CEI 61000-3-2:** cette norme (tableau 1.3) fixe la limitation des courants injectés dans le réseau public pour des équipements dont le courant par phase est inférieur à 16A. Il s'agit des appareils du domaine domestique.

Rang harmonique	Courant harmoniques maximal autorisé (A)
<b>Harmoniques impairs</b>	
<b>3</b>	2,3
<b>5</b>	1,14
<b>7</b>	0,77
<b>9</b>	0,40
<b>11</b>	0,33
<b>13</b>	0,21
<b><math>15 \leq h \leq 39</math></b>	$0,15 * 15/h$
<b>Harmoniques pairs</b>	
<b>2</b>	1,08
<b>4</b>	0,43
<b>6</b>	0,3
<b><math>8 \leq h \leq 40</math></b>	$0,23 * 8/h$

**Tableau 1.3 :** Limite des composantes harmoniques en courant (norme CEI 61000-3-2)

Deux sociétés de l'IEEE travaillent aussi dans des domaines liés à la qualité de l'énergie, IAS (Industrial Applications Society) et PES (Power Engineering Society). Leurs activités de normalisation sont gérées par le comité SCC-22 (Standards Coordinating Committee on Power Quality). Les deux normes principales de l'IEEE sont:

**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 1.4, 1.5) [2,23].

**IEEE 1159:** 1995, IEEE 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 1.6) [2,19].

Tension au point de raccordement ( $V_n$ )	Distorsion Harmonique Individuelle (%)	THD $V_n$ (%)
$V_n \leq 69\text{kV}$	3,0	5,0
$69\text{kV} < V_n \leq 161\text{kV}$	1,5	2,5
$V_n > 161\text{kV}$	1,0	1,5

**Tableau 1.4 :** Limite IEEE pour la distorsion harmonique de la tension

$V_n \leq 69\text{kV}$						
Icc/Ich	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
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

<b>100-1000</b>	12.0		5.0	2.0	1.0	15.0
<b>&gt;1000</b>	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
<b>69kV &lt; V<sub>n</sub> ≤ 161kV</b>						
<b>&lt;20</b>	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
<b>20-50</b>	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
<b>50-100</b>	5.0	2.25	2.0	1.25	0.35	6.0
<b>100-1000</b>	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
<b>&gt;1000</b>	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0
<b>V<sub>n</sub> &gt; 161kV</b>						
<b>&lt;50</b>	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
<b>≥50</b>	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0

**Tableau 1.5** : Limite IEEE des émissions de courants harmoniques

		Durée	Magnitude de tension
<b>Variations de courte durée</b>			
<b>Instantané</b>	Creux	0,5 – 30 cycles	0,1 – 0,9 p.u
	Surtension	0,5 – 30 cycles	1,1 – 1.8 p .u
	Coupure	0,5 cycles – 3s	< 0,1 p.u
<b>Momentané</b>	Creux	30 cycles – 3s	0,1 – 0,9 p.u
	Surtension	30 cycles – 3s	1,1 – 1.8 p .u
	Coupure	3s – 1 min	< 0,1 p.u
<b>Temporaire</b>	Creux	3s – 1 min	0,1 – 0,9 p.u
	Surtension	3s – 1 min	1,1 – 1.8 p .u
<b>Variations de longue durée</b>			
	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 1-6** : Classification IEEE des perturbations électromagnétiques.

### I-6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons illustré le phénomène des harmoniques, leurs caractéristiques, leurs conséquences, leurs sources et les différentes origines des perturbations affectant les réseaux électriques.

Le développement croissant des appareils générateurs d'harmoniques entraînera une hausse sensible des perturbations injectées par les clients, ce qui inquiète au plus haut point les producteurs, les distributeurs ainsi que les grands utilisateurs de l'énergie électrique.

Si cet état de fait persiste, sans qu'un plan de dépollution ne soit envisagé, les niveaux de compatibilité seront dépassés d'une manière certaine. Aussi, une réglementation de prévention et de répression (économique) doit être élaborée afin de «contraindre» les grands utilisateurs et les fabricants de convertisseurs à respecter les limites d'injection harmoniques sur les réseaux électriques, cela permettra d'assurer un niveau de compatibilité en tout point du réseau.

### Chapitre II : Solutions de dépollution des réseaux

#### II.1.Introduction

Il existe aujourd'hui plusieurs méthodes et solutions pour compenser toutes les perturbations harmoniques qui peuvent être séparées en deux types : courant et tension. Deux groupes de solution de dépollution, traditionnelle et moderne, vont être étudiées.

#### II.2. Solutions de dépollution traditionnelles

Ce sont des techniques qui apportent une solution facile et rapide pour certains cas de perturbations bien localisées.

On a plusieurs solutions de dépollution traditionnelles des réseaux électriques

##### II.2.1. Rééquilibrage des courants du réseau électrique

C'est une solution qui permet de répartir les charges d'une manière identique sur les trois phases. En effet, les charges monophasées et biphasées mal réparties engendrent des courants déséquilibrés dans un réseau électrique basse tension [1,2].

##### II.2.2 Utilisation une inductance (selfs) série

Cette solution utilisée pour les entraînements à vitesse réglable (variateurs de vitesse) et les redresseurs triphasés, consiste à introduire une inductance série en amont d'une charge non linéaire. La self a cependant une efficacité limitée. Il faut installer une par charge non linéaire. La distorsion en courant est divisée approximativement par deux [10,24].

##### II .2.3 Transformateur à couplage spécial

Il s'agit de limiter la circulation des courants harmoniques à une partie aussi petite que possible de l'installation à l'aide de transformateurs à couplage approprié. L'utilisation d'un transformateur d'isolement, de rapport 1/1 à couplage triangle-étoile ou triangle zigzag, empêche la propagation des courants harmoniques de rang 3 et leurs multiples circulant dans le neutre, ce procédé n'a aucun effet sur les autres rangs harmoniques [10,24].

### II.2.4 Renforcement de la puissance de court-circuit

La diminution de l'impédance totale en amont de la charge non linéaire permet de réduire la tension créée par les harmoniques de courant, et donc de diminuer le taux de distorsion harmonique en tension au point de raccordement. Cependant, les courants harmoniques ne sont pas atténués [2].

### II.2.5 Compensation de la puissance réactive

La puissance réactive est majoritairement consommée par les moteurs asynchrones et plus récemment par des dispositifs à base d'électronique de puissance. Différentes méthodes de compensation sont utilisées pour relever le facteur de puissance. La plus simple consiste à placer des batteries de condensateurs en parallèle avec le réseau. L'inconvénient de cette méthode réside dans le fait que la puissance réactive fournie par les condensateurs est constante et qu'elle ne s'adapte pas à l'évolution du besoin [1].

### II.2.6. Filtrage passif

Le filtrage passif est basé sur l'utilisation de circuits électriques RLC (résistance, inductance, capacité) dit filtre passif, dont le principe est de modifier localement l'impédance du réseau, de façon à dériver les courants et à éliminer les tensions harmoniques. On associe des éléments capacitifs et inductifs de manière à obtenir une résonance série accordée à une fréquence choisie. 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, car plusieurs types de filtres passifs sont utilisés pour différentes dépollutions à réaliser [13].

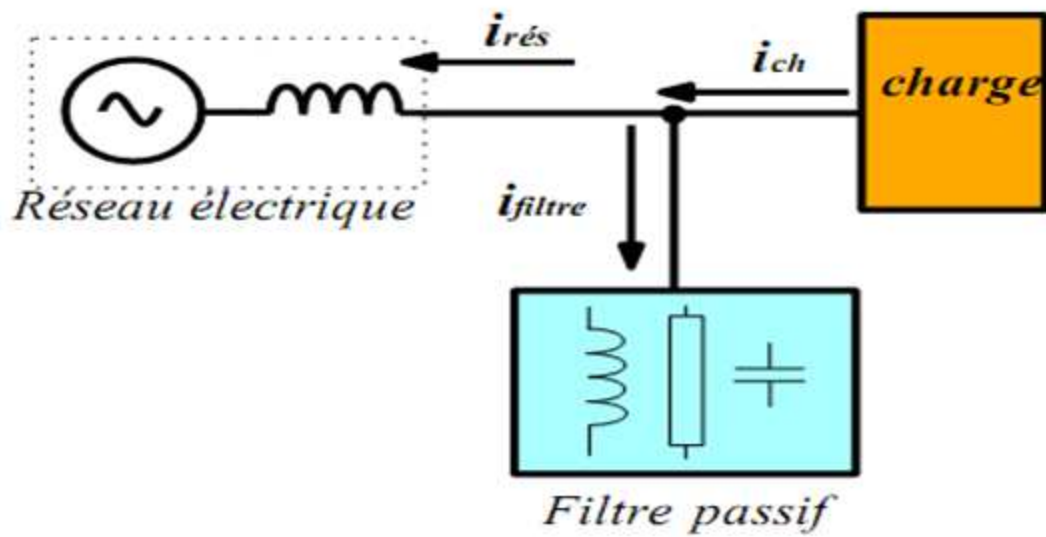


Figure II -1- Raccordement d'un filtre passif.

### II.2.7. Filtre passif résonant

C'est un filtre sélectif constitué d'une résistance, d'un condensateur et d'une bobine en série, comme décrit sur la figure II-2, son impédance équivalente est :

$$Z_{eq}(\omega) = \frac{1-LC\omega^2 + jRC\omega}{jC\omega}$$

I-1

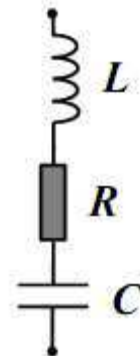


Figure II-2 -Filtre passif résonant.

### II.2.8. Filtre passif amorti

C'est un filtre passe haut constitué d'une inductance en parallèle avec une résistance, le tout en série avec un condensateur comme décrit sur la figure II-3 .Son impédance équivalente est :

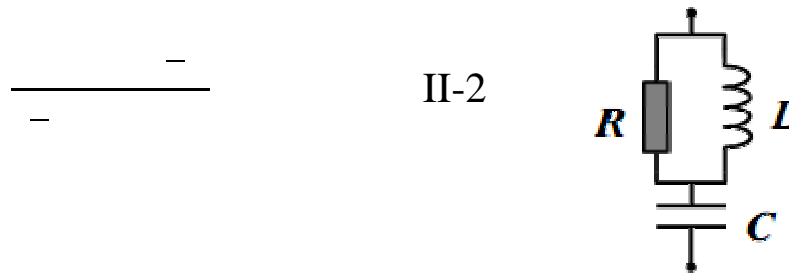


Figure II-3-Filtre passif amorti.

### II.3. Solutions de dépollution modernes

Les solutions de dépollution traditionnelle ne répondant plus à l'évolution des réseaux électriques et des charges à protéger, on opte alors à des solutions plus efficaces qui sont les filtres actifs.

#### II.3.1. Filtres actifs

Ce sont des sources de courant ou de tension qui éliminent les perturbations harmoniques en injectant en série ou en parallèle sur le réseau des courants, des tensions, ou les deux à la fois, en opposition par rapport aux perturbations existantes [10].

#### II.3.2 Types de filtres actifs

Selon le mode de raccordement du filtre actif au réseau électrique, on distingue plusieurs types de filtres actifs à savoir les filtres actifs parallèles, séries, combinés (parallèle – série) et hybrides (filtre actif – filtre passe bas).

##### II.3.2.1 Filtre actif série

Le filtre actif série est connecté en série sur le réseau comme le montre la figure II-4. Il s'insère entre le réseau perturbé et la charge à protéger par l'intermédiaire d'un transformateur d'injection de tension.

Il compense les tensions harmoniques en fournissant une tension qui s'oppose à la tension harmonique venant du côté source et du côté charge non linéaire, et fait ainsi protéger les charges sensibles contre les perturbations de tension du réseau électrique.

Par contre, le filtre actif série présente quelques difficultés et inconvénients, exemple : il ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge.

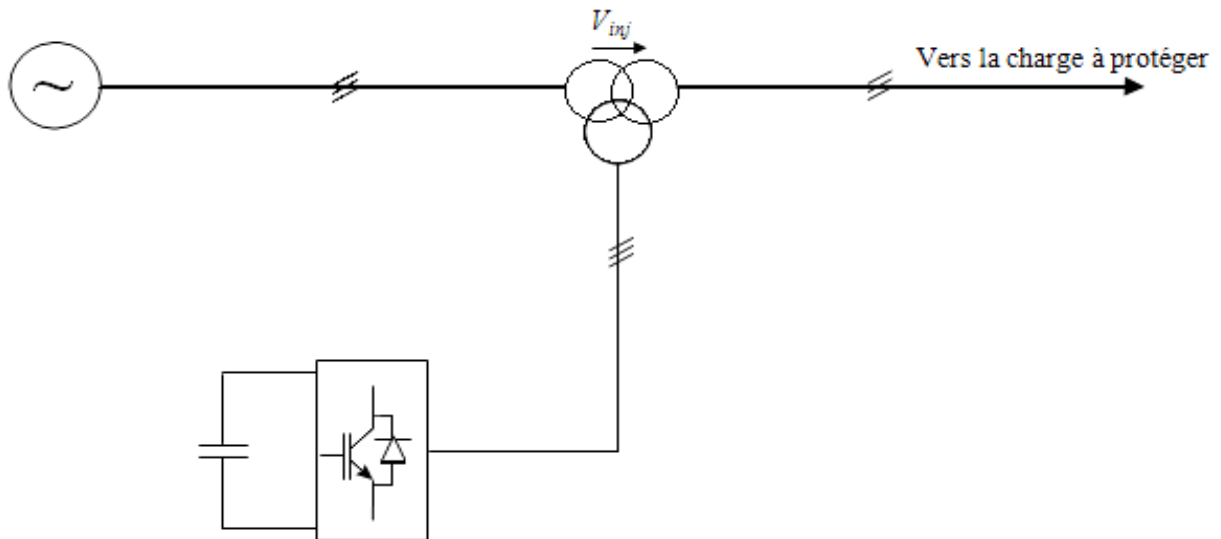


Figure II-4. Filtre actif série

### II.3.2.2 Filtre actif parallèle

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau, comme le montre la figure II-5. Ce filtre génère des courants équivalents en amplitude avec les courants harmoniques générés par la charge mais en opposition de phase afin que la somme avec ceux-ci soit nulle.

Alors, l'ensemble charge/filtre se présente comme une charge propre, on obtient alors des courants sinusoïdaux au niveau du réseau. Par conséquent, il améliore le taux de distorsion en courant et en tension.

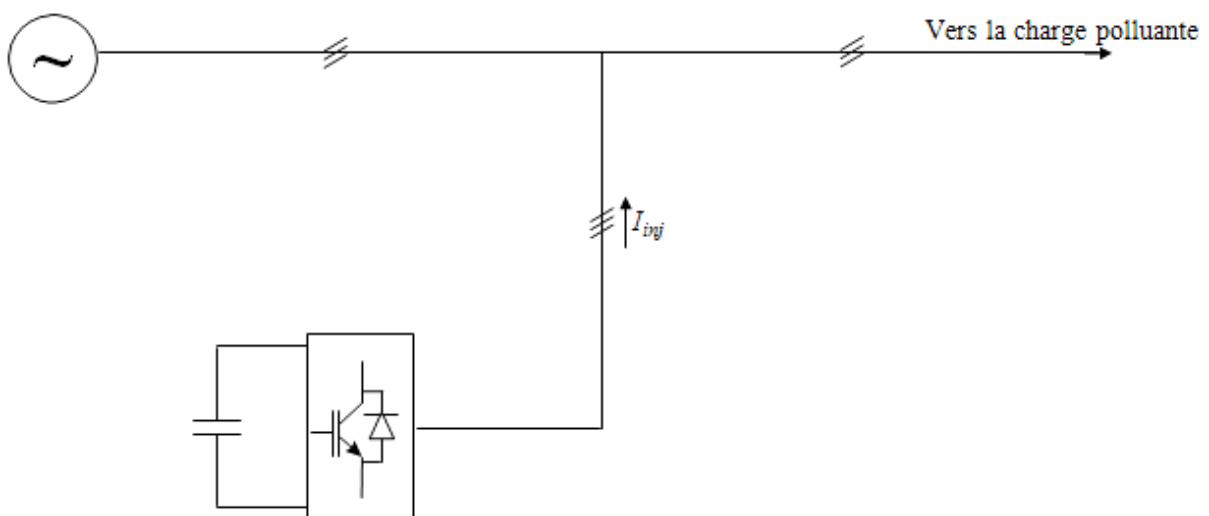


Figure II-5. Filtre actif parallèle

### II-3.2.3 La combinaison parallèle-série actifs (UPQC)

La combinaison parallèle-série actifs, aussi appelée *Unified Power Quality Conditioner (UPQC)* en anglais, résulte de l'association des deux *filtres* actifs parallèle et série, comme le montre la figure II-6. Ce type de dispositif est capable à la fois de régler la tension du réseau et d'éliminer les harmoniques. Il est considéré comme le plus puissant dispositif et il est capable d'effectuer efficacement toutes les tâches de conditionnement de puissance [1,13].

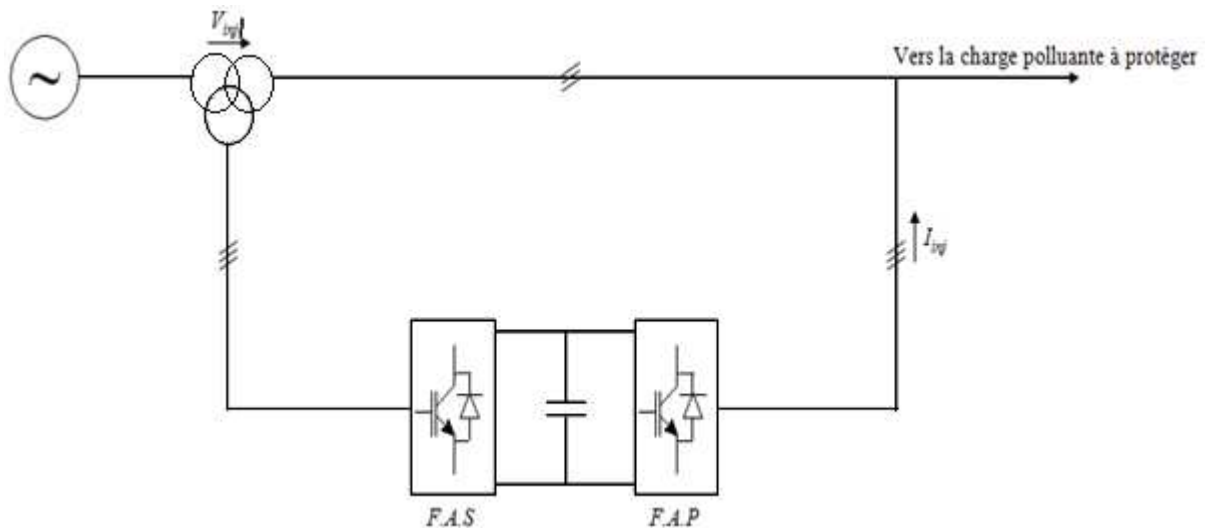


Figure II-6. Combinaison parallèle-série actifs (UPQC)

### II-3.2.4 Filtre actif hybride

Afin de réduire le dimensionnement et par conséquent le prix des filtres actifs, l'association de filtres actifs de faible puissance à des filtres passifs peut être une solution. Dans ce cas, les filtres passifs ont pour rôle d'éliminer les harmoniques prépondérants permettant de réduire le dimensionnement des filtres actifs qui ne compensent que le reste des perturbations. Plusieurs configurations ont été présentées dans la littérature, les plus étudiées étant :

- le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles
- le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles
- le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle [2,24]

### II-3.2.4.1 Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles

Le rôle du FAS dans ce cas est d'empêcher les courants harmoniques de circuler vers le réseau et de les obliger à passer par les filtres passifs raccordés à leurs fréquences comme le montre la figure II-7 [1,12].

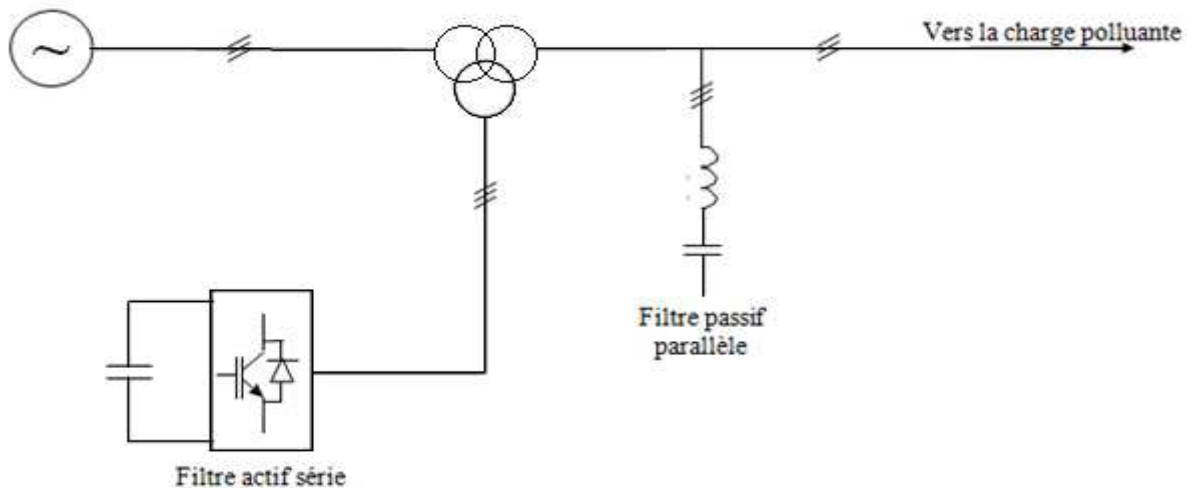


Figure II-7. Filtre actif série et filtre passif parallèle

### II-3.2.4.2 Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles

Le principe de fonctionnement de cette configuration, présentée en figure II-8, est la même que la précédente avec l'avantage de réduire encore le dimensionnement du FAS, car le courant qui le traverse est plus faible. De plus, le FAS est à l'abri d'un éventuel court-circuit de la charge [1,12].

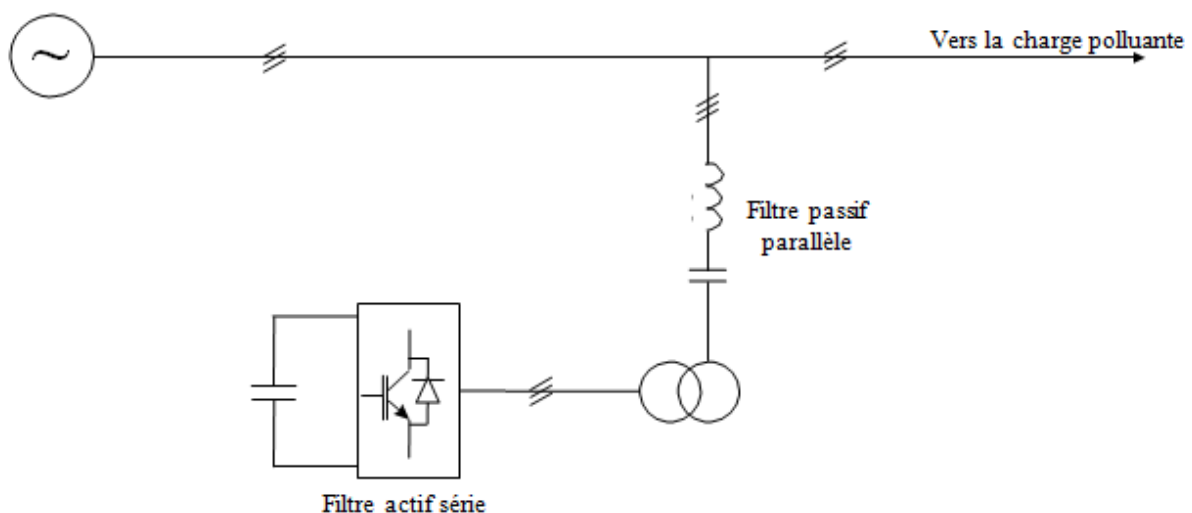


Figure II-8 Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle

### II-3.2.4.3 Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

Le rôle du filtre actif parallèle dans cette configuration, montrée en figure II-9, est la compensation des courants harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante. Le filtre passif accordé sur une fréquence élevée, élimine les harmoniques hautes fréquences y compris ceux créés par celui-ci. Ce type de filtrage a déjà été appliqué à la compensation des courants harmoniques émis par un cyclo-convertisseur de forte puissance [1,12].

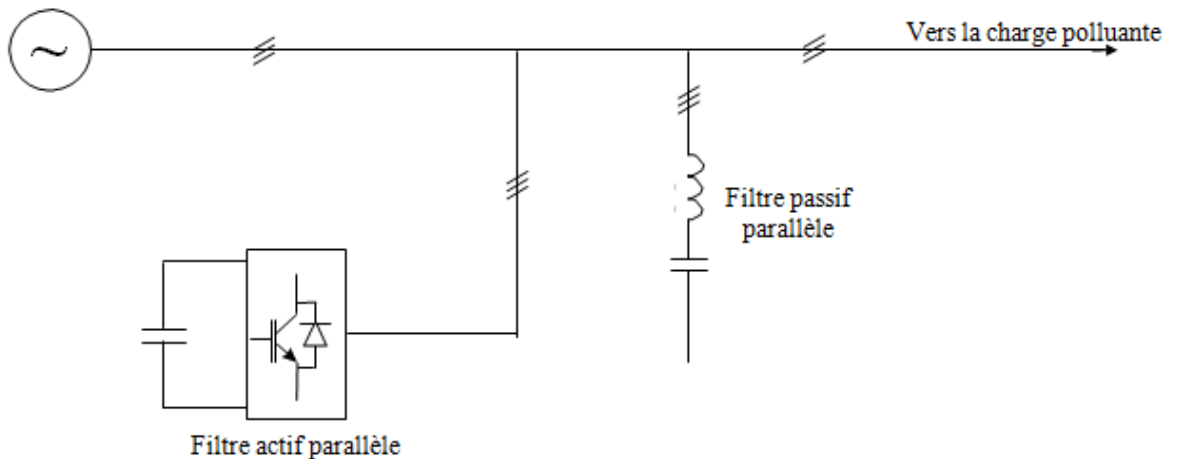


Figure II-9. Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

## II-4 Comparaison des différents filtrages

Le tableau (1.6) montre un récapitulatif des avantages et inconvénients du filtrage passif, filtrage actif série, filtrage actif parallèle et du filtrage actif parallèle-série [11].

Principes	Avantages	Inconvénients
<b>Filtrage passif</b>	Amélioration de la forme du courant	Risque de résonance, pas d'adaptabilité, encombrant.
<b>Filtrage actif parallèle</b>	Amélioration de la forme du courant, adaptabilité aux variations de la charge et du réseau.	Amélioration de la forme de la tension pas toujours évidente.

## Chapitre II : Solutions de dépollution des réseaux

---

<b>Filtrage actif série</b>	Amélioration de la forme de la tension, adaptabilité aux variations de la charge et du réseau	Pas d'amélioration de la forme du courant.
<b>La combinaison parallèle-série actifs</b>	Amélioration de la forme du courant, amélioration de la forme de la tension, adaptabilité aux variations de charge et du réseau	Réalisation difficile.

### II-5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons illustré les différents types de solutions de dépollution des réseaux électriques.

Plusieurs solutions traditionnelles et modernes de dépollution ont été présentées.

Nous avons vu que la solution classique à base de filtres passifs a des inconvénients en termes d'encombrements et de résonance.

Par contre, la solution moderne à base de filtres actifs parallèles et séries avec leurs combinaisons semble meilleure jusqu'à ce jour, pour tous types de perturbations capables d'apparaître dans le réseau électrique.

Dans ce contexte et pour la suite du présent travail, nous avons retenu l'application du filtrage actif parallèle.

## Chapitre III : Etude et modélisation d'un filtre actif parallèle

### III.1. Introduction

Dans ce chapitre nous présentons la description générale des différentes parties du système étudié tel que le modèle du réseau d'alimentation, la charge et le filtre actif.

Le filtre actif est divisé en deux parties, la partie puissance et la partie commande. Dans la partie puissance, nous introduisons les trois principaux blocs de cette structure, à savoir l'onduleur de tension, la source de tension continue et le filtre de sortie. Dans la partie contrôle-commande, nous aborderons les principaux blocs, soit l'identification des courants perturbés, la commande de l'onduleur.

### III.2. Description du système

Le système étudié dans cette partie est composé d'une source triphasée équilibrée, d'une charge non linéaire (redresseur triphasé à diode), et d'un filtre actif parallèle formé d'un onduleur de tension à trois bras avec des semi-conducteurs (IGBT) avec un filtre de raccordement de nature inductive et résistive pour filtrer les courants hautes fréquences. L'énergie du côté continu est assurée par une source de tension continue. En plus d'un système de commande pour le filtre actif parallèle.

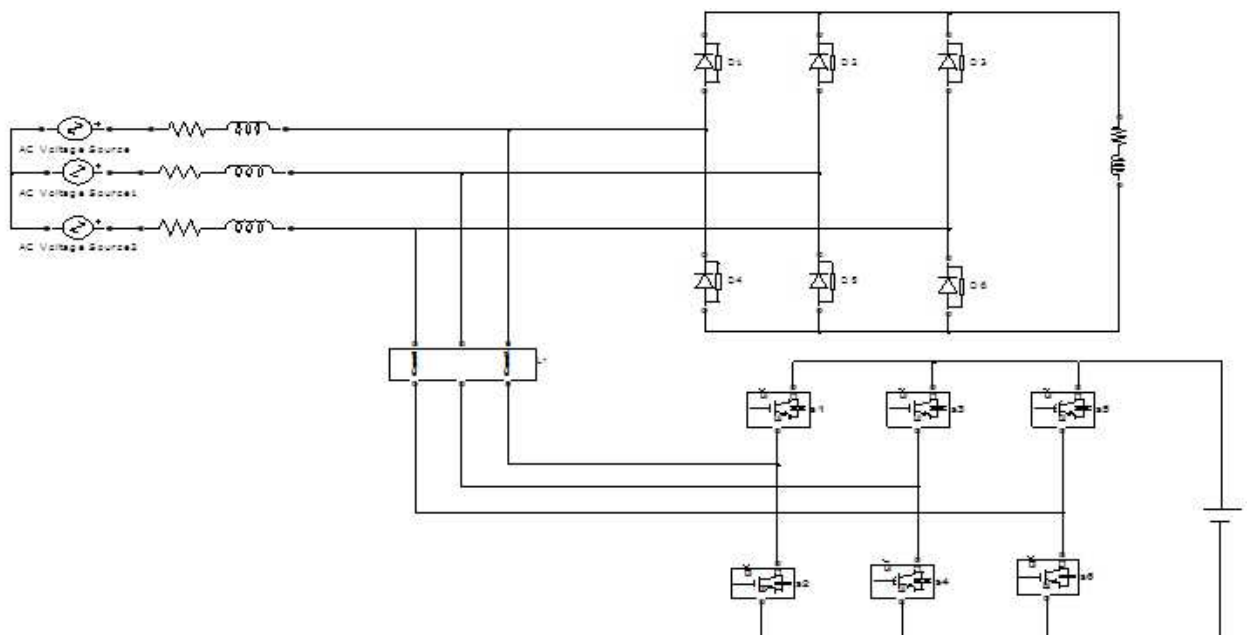


Fig-III.1- : schéma du système global

### III.2.1. Modélisation du Réseau d’Alimentation

Le réseau est représenté par une source de tension triphasée sinusoïdale et équilibrée  $V_s(t)$  en série avec l'impédance du réseau  $Z_r$ , [1,2] comme le montre la figure (III.2):

Il est exprimé par l'équation (III.1) :

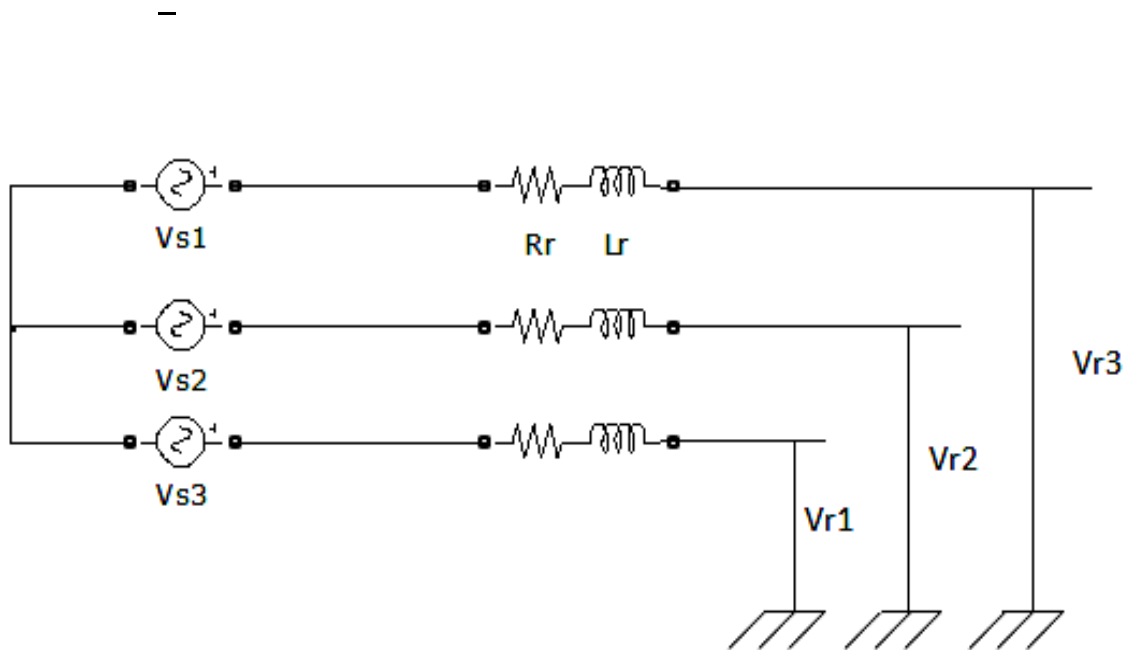


Fig-III.2- : schéma du réseau triphasé

### III.2.2. Modélisation de la Charge

La charge utilisée dans ce système est une charge non linéaire. Elle représente un redresseur triphasé à diode « pont de Grêtz » associé à une charge résistive et inductive. Cette charge est modélisée comme étant sources de courants parfaites (les semi-conducteurs sont considérés parfaits) [2,4]. La figure(III.3) montre le schéma de la charge polluante.

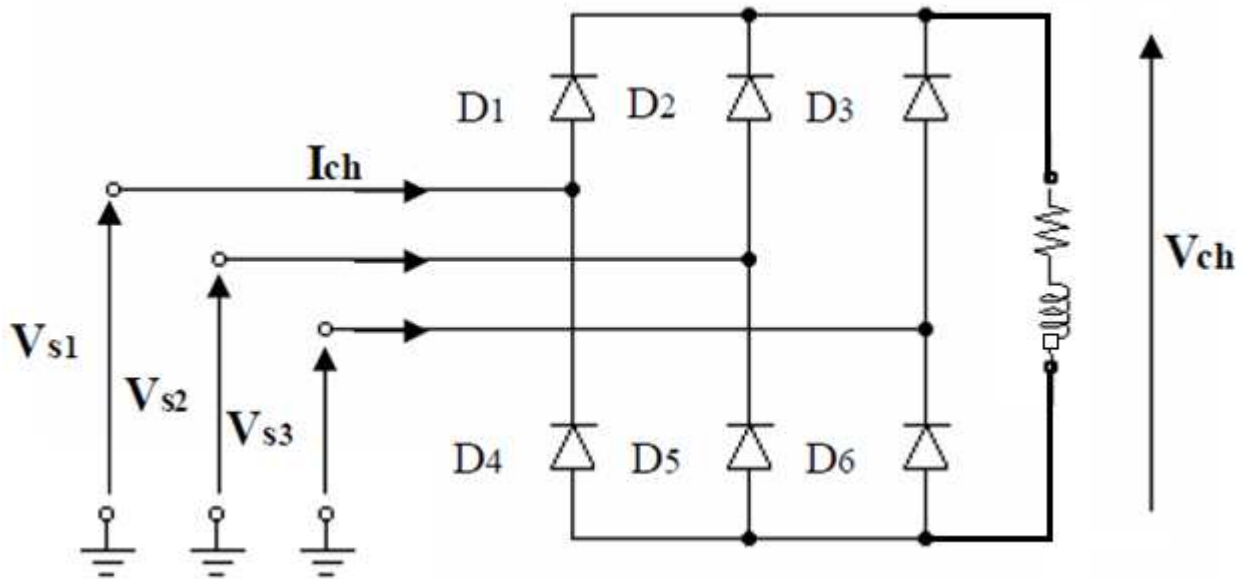


Figure-III.3- : redresseur triphasé

### III.2.3. Modèle du filtre actif

La structure des filtres actifs se compose essentiellement de deux parties, une partie puissance et une partie commande (Figure-III.4-). La partie puissance se compose d'un onduleur, d'un filtre de couplage et d'une source de tension continue. La partie contrôle-commande, sert à contrôler la commutation des semi-conducteurs formant l'onduleur [1].

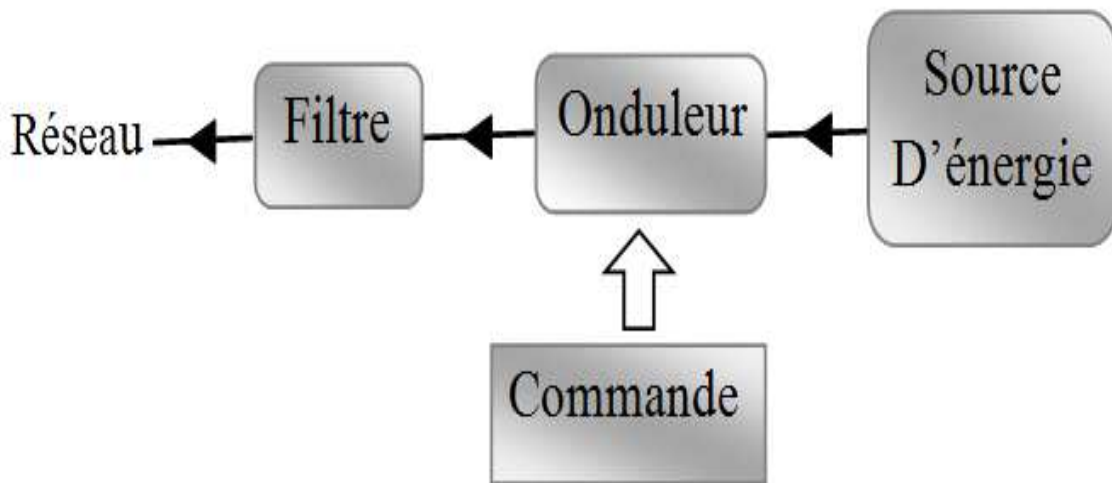


Figure-III.4- : Structure d'un filtre actif parallèle

➤ **La partie puissance :**

Est constituée d'un onduleur de tension; d'une source de tension continue, et d'un filtre à la sortie de l'onduleur comme le montre la figure (III.5).

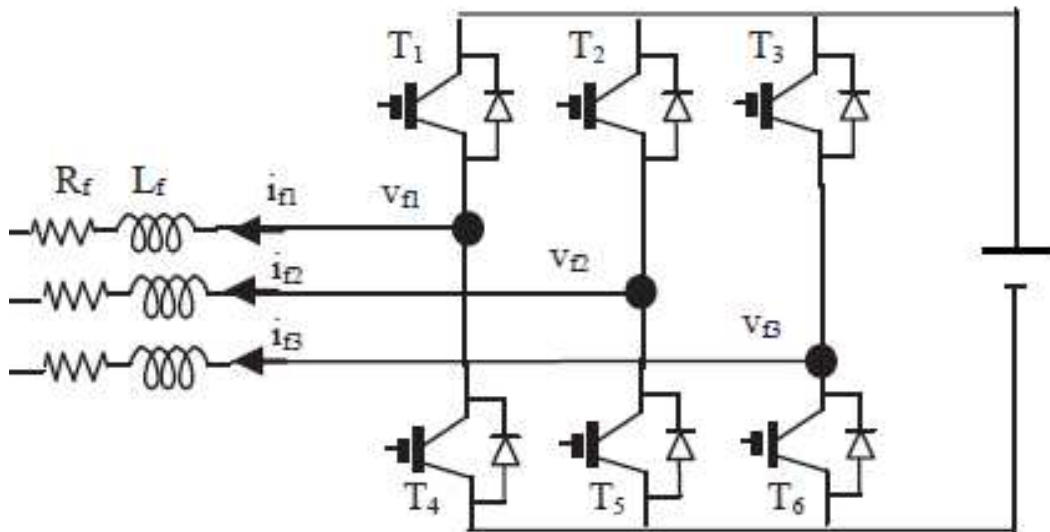


Figure-III.5- : onduleur de tension et filtre de sortie

➤ *La partie commande :*

Elle est constituée de l'algorithme de détection de courant de référence et de la commande de l'onduleur de tension [14].

### III.3. Etude du filtre actif

#### III.3.1. Partie puissance

##### III.3.1.1. Modélisation de l'onduleur de tension

L'onduleur triphasé utilisé dans notre système est constitué d'interrupteurs bidirectionnels en courant qui sont réalisés par des semi-conducteurs commandables à l'amorçage et au blocage (de type IGBT) monté en antiparallèle avec une diode [7]. La conduction de l'un entraînant le blocage de l'autre. Pour éviter de court-circuiter l'onduleur.

Pour cette structure, on doit respecter les contraintes suivantes :

- A un instant donné, un seul interrupteur d'un même bras doit conduire afin d'éviter tout court-circuit de la source de tension,
- Le courant de ligne doit toujours trouver un chemin possible d'où la mise en antiparallèle de diodes au niveau des interrupteurs [4,14].

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur de la Figure (III.5) dépendent de l'état des signaux de commande ( $u_a, u_b, u_c$ ), comme défini ci-dessous [1, 12] :

$$u_a = \begin{cases} 1 & T_1 \text{ fermé et } T_4 \text{ ouvert} \\ 0 & T_1 \text{ ouvert et } T_4 \text{ fermé} \end{cases}$$

$$u_b = \begin{cases} 1 & T_2 \text{ fermé et } T_5 \text{ ouvert} \\ 0 & T_2 \text{ ouvert et } T_5 \text{ fermé} \end{cases}$$

$$u_c = \begin{cases} 1 & T_3 \text{ fermé et } T_6 \text{ ouvert} \\ 0 & T_3 \text{ ouvert et } T_6 \text{ fermé} \end{cases}$$

### III.3.1.2. Source de tension continue

Le choix de la tension  $V_0$  aux bornes de l'onduleur affecte la dynamique et la qualité de compensation du filtre actif parallèle. En effet, une tension  $V_0$  élevée améliore la dynamique du filtre actif. De plus, les ondulations de la tension continue  $V_0$  causées par les courants engendrés par le filtre actif, peuvent dégrader la qualité de compensation du filtre actif parallèle.

### III.3.1.3. Filtre de sortie

Le filtre de sortie est un filtre passif utilisé pour connecter l'onduleur de tension au réseau. Ce filtre limite certes la dynamique du courant mais réduit en même temps la propagation sur le réseau électrique des composantes dues aux commutations [4]. Dans ce travail, nous avons utilisé un filtre qui se compose d'une inductance  $L_f$  de résistance interne  $R_f$ , comme le montre la figure(III.5).

Le filtre de sortie est dimensionné pour satisfaire les deux critères suivants :

- assurer la dynamique du courant :

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{di_h}{dt} \quad \text{III.2}$$

Avec :

$i_h$  : le courant harmonique de la charge

$i_f$  : le courant du filtre actif,

- empêcher les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau électrique.

Nous avons employé au cours de notre étude un filtre de sortie du premier ordre [5, 12, 15].

### **III.3.2. Partie commande**

La commande est mise en œuvre en deux étapes. Dans la première étape, on détermine le courant de référence à partir des méthodes d'identifications approuvées. Dans la deuxième étape de commande, les signaux de commutation de semi-conducteur de l'onduleur de l'FAP sont générés en utilisant l'hystérésis ou par MLI.

#### **III.3.2.1. Détermination des courants de référence**

##### **III.3.2.1.1. Généralités sur les méthodes d'identification**

Plusieurs algorithmes d'identification des grandeurs harmoniques de référence et de nombreuses techniques de commande et de régulation ont été développés depuis la mise en place des premiers filtres actifs [3].

Les différentes méthodes d'identification de courant perturbateur peuvent être regroupées en deux familles d'approche.

La première utilise la transformée de Fourier rapide dans le domaine fréquentiel, pour extraire les harmoniques du courant. Cette méthode est bien adaptée aux charges où le contenu harmonique varie lentement. Elle donne aussi l'avantage de sélectionner les harmoniques individuellement et de ne choisir de compenser que les plus prépondérants. Il est à noter que cette méthode nécessite une grande puissance de calcul afin de réaliser, en temps réel, toutes les transformations nécessaires pour extraire les harmoniques.

La deuxième famille est basée sur le calcul des puissances instantanées dans le domaine temporel. Certaines de ces méthodes se basent sur le calcul des puissances harmoniques de la charge non linéaire. D'autres peuvent être utilisées pour compenser à la fois les courants harmoniques et la puissance réactive, en se basant sur la soustraction de la partie fondamentale active du courant total.

Récemment, de nouvelles méthodes d'identification ont été présentées pour donner le choix de compenser un, plusieurs ou même tous les types de courants perturbateurs. En effet, en se basant sur la régulation de la tension continue et sur celles du réseau électrique aux points de raccordement, nous pouvons compenser à la fois tous les courants perturbateurs, tout en offrant la possibilité de réguler la tension de la charge. Cette méthode, qui ne peut être implantée que numériquement, ne garantit pas une compensation parfaite de la puissance réactive, de même que la régulation de tension n'assure pas toujours une bonne qualité à la tension de la charge.

Une autre méthode, appelée la méthode de détection synchrone et reposant sur la transformée de Park, a été proposée. Cette méthode se base essentiellement sur le calcul de la pulsation fondamentale obtenue par une boucle à verrouillage de phase « PLL » (Phase Locked Loop). Cela exige une précision parfaite du calcul de cette pulsation afin de ne pas avoir des courants identifiés erronés [1,10].

Aussi il y a lieu de signaler dans notre étude la méthode des puissances fluctuantes basées sur la matrice des composantes symétriques.

Dans ce travail on s'intéresse à la méthode d'identification des courants harmoniques par la méthode des puissances instantanées.

### III.3.2.1.2. identification des courants perturbateurs par la méthode des puissances instantanées

Cette méthode introduit par H. Akagi qui est une méthode temporelle. Elle était utilisée afin d'éviter les difficultés dues au nombre élevé de calcul lors de la mise en œuvre de méthodes fréquentielles telle que la transformée de Fourier (Transformées de Fourier rapide ou discrète), exploite la transformation de Concordia de tensions simples et courants de ligne, afin de calculer les puissances réelle, imaginaire et homopolaire instantanées. Elle permet de transformer la composante fondamentale en une composante continue et les composantes harmoniques en composantes alternatives. Cette transformation est nécessaire si nous voulons éliminer facilement la composante continue [5,15].

On note respectivement les vecteurs des tensions simples au point de raccordement  $[V_s]$  et des courants de charge  $[i_c]$  d'un système triphasé et équilibré par :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} v_{s1} \\ v_{s2} \\ v_{s3} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [i_c] = \begin{bmatrix} i_{c1} \\ i_{c2} \\ i_{c3} \end{bmatrix} \quad \text{III.3}$$

La transformation des valeurs triphasées instantanées de la tension et du courant dans le repère des cordonnées  $\alpha$ - $\beta$  est donnée par les expressions suivantes :

$$\begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s1} \\ v_{s2} \\ v_{s3} \end{bmatrix} \quad \text{III.4}$$

Et pour les courants :

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c1} \\ i_{c2} \\ i_{c3} \end{bmatrix} \quad \text{III.5}$$

Cette transformation n'est valide que si les tensions sont équilibrées et sinusoïdales. Dans le repaire de Concordia, la puissance réelle et la puissance imaginaire sont données par la matrice suivante:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad \text{III.6}$$

Dans le cas général, chacune des puissances  $p$  et  $q$  comporte une partie continue et une partie alternative, ce qui nous permet d'écrire l'expression ci-dessous :

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad \text{III.7}$$

Avec :

- $\bar{p}$  : une puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant et de la tension.
- $\bar{q}$  : une puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant et de la tension.
- $\tilde{p}$  et  $\tilde{q}$  : des puissances alternatives liées à la somme des composantes perturbatrices du courant et de la tension.

### ➤ Calcul des courants perturbateurs

On posant :

$$\Delta = v_{s\alpha}^2 + v_{s\beta}^2 \quad \text{On a:}$$

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \left\{ \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & -v_{s\beta} \\ v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \right\} \quad \text{III.8}$$

En considérant les équations (III-7) et (III-8), nous pouvons séparer le courant dans le repère ( $\alpha$ - $\beta$ ) en trois composantes, active et réactive à la fréquence fondamentale et les harmoniques. Ceci conduit à:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & -v_{s\beta} \\ v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & -v_{s\beta} \\ v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & -v_{s\beta} \\ v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad \text{III.9}$$

Cette expression montre donc que l'identification des différentes composantes du courant dans le repère ( $\alpha$ - $\beta$ ) revient à séparer des termes continus des puissances réelle et imaginaire instantanées. Les courants perturbateurs triphasés qui représentent les courants identifiés, *dits courants de référence* ( $I_{ref}$ ), sont calculés à partir de la transformation ( $\alpha$ - $\beta$ ) inverse donnée par la relation (III-10) :

$$\begin{bmatrix} i_{ref1} \\ i_{ref2} \\ i_{ref3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} \quad \text{III.10}$$

Avec  $I_{\alpha}$ ,  $I_{\beta}$  courants perturbateurs calculés dans le repère  $\alpha$ - $\beta$  à partir des courants réactifs et harmoniques de la relation (III-9). [1, 2, 3, 4, 9, 10,12].

### III.3.2.2. commande de l'onduleur

Le but de la commande de l'onduleur est de permettre la meilleure reproduction des courants de référence, à travers les ordres de commande appliqués aux interrupteurs de puissance. Les deux principales familles de commande des convertisseurs statiques sont : la commande par hystérésis et la commande par modulation de largeur d'impulsion MLI [1,10].

#### III.3.2.2.1. Commande par MLI

La plus simple et la plus connue des modulations de largeur d'impulsion est sans doute la MLI à échantillonnage naturel, dite *MLI intersective*. Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur (modulatrice) à partir de l'écart entre le courant mesuré et sa référence. Cette dernière est ensuite comparée avec un signal triangulaire (porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs [1]. Le schéma de principe est donné par la Figure (III.6).

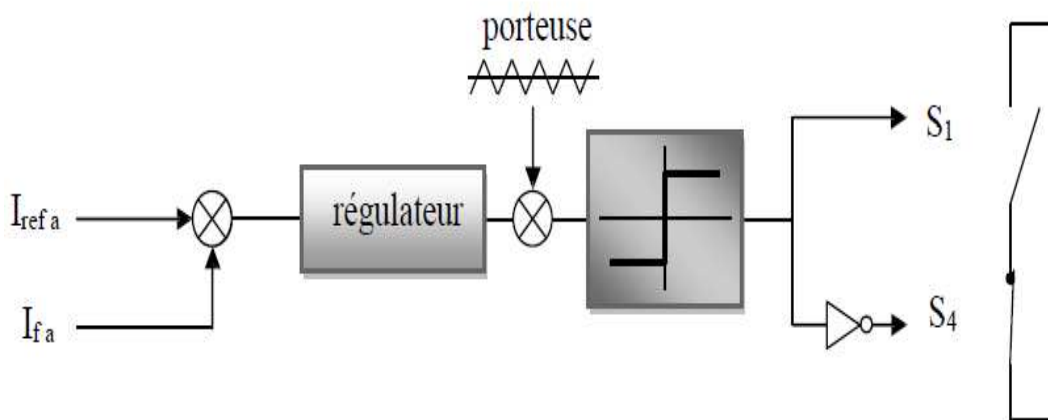


Figure-III.6- : principe de commande par MLI

### III.3.2.2.2. Commande par hystérésis

La commande conventionnelle par hystérésis est très couramment utilisée de par sa simplicité d'utilisation et sa robustesse. En fait, cette stratégie assure un contrôle satisfaisant du courant sans exiger une connaissance poussée du modèle du système à contrôler ou de ses paramètres. Son principe consiste à établir dans un premier temps le signal d'erreur, différence entre le courant de référence et le courant produit par l'onduleur. Cette erreur est ensuite comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis afin de fixer les ordres de commande des interrupteurs [15].

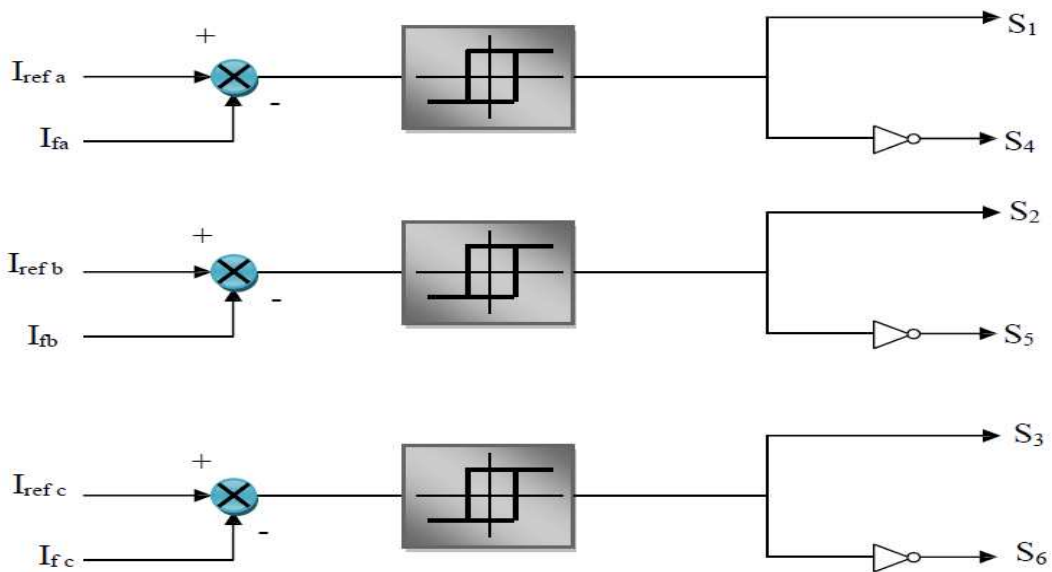


Figure -III.7- : principe de la commande par hystérésis

### III.4. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté et défini les éléments constituant le système avec filtre actif parallèle, de plus on a expliqué les différentes stratégies de commande des filtres actifs. Dans notre étude on a choisi d'identifier les courants harmoniques par la méthode d'identification des courants harmoniques par hystérésis.

## Chapitre IV : simulation et interprétations des résultats

### IV.1. Introduction

Dans ce chapitre nous effectuons une simulation globale du comportement du filtre actif et de sa commande par hystérésis en vue de la compensation des courants harmoniques absorbés par un redresseur en pont triphasé à diode. Le programme de simulation est conçu avec le logiciel Matlab/Simulink.

#### Paramètres de simulation :

Source : Tension efficace  $V_s = 220$  V et fréquence  $f = 50$  Hz

Impédance du réseau :  $R_r = 0.25$  m $\Omega$  et  $L_r = 194$   $\mu$ H

Côté continue de la charge polluante :  $R_{ch} = 12$   $\Omega$  et  $L_{ch} = 100$  mH

Filtre de sortie :  $R_f = 0.88$   $\Omega$  et  $L_f = 1.25$  mH

Côté continue de l'onduleur :  $V_o = 900$  V

### IV.2. (Réseau / charge non linéaire) et (Réseau / charge non linéaire/filtre actif)

La figure IV -1- et IV -2- représente la forme d'onde du courant de charge et son analyse spectrale, on remarque que le courant de charge est très riche en harmoniques ainsi son taux de distorsion harmonique est de (THD =29.34%).

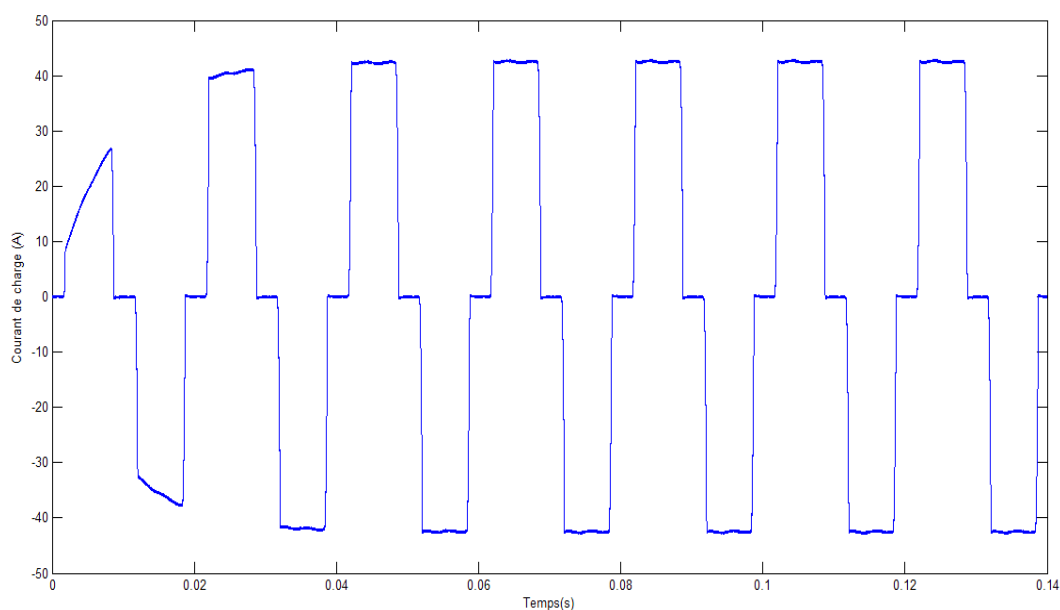


Figure -IV.1- Forme d'onde du courant de charge non linéaire

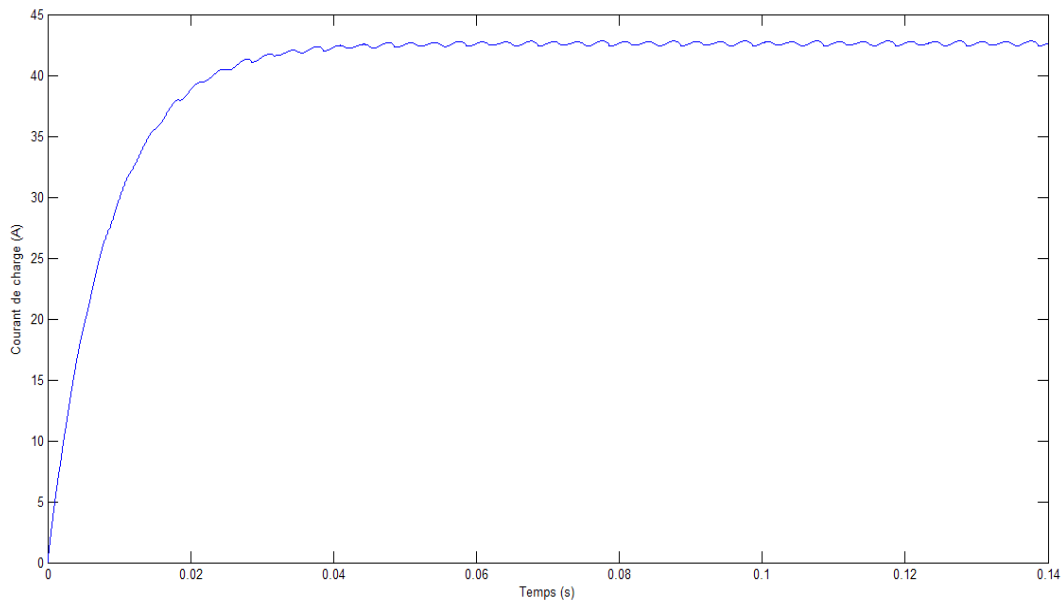


Figure -IV.2- : Forme d'onde du courant de charge RL

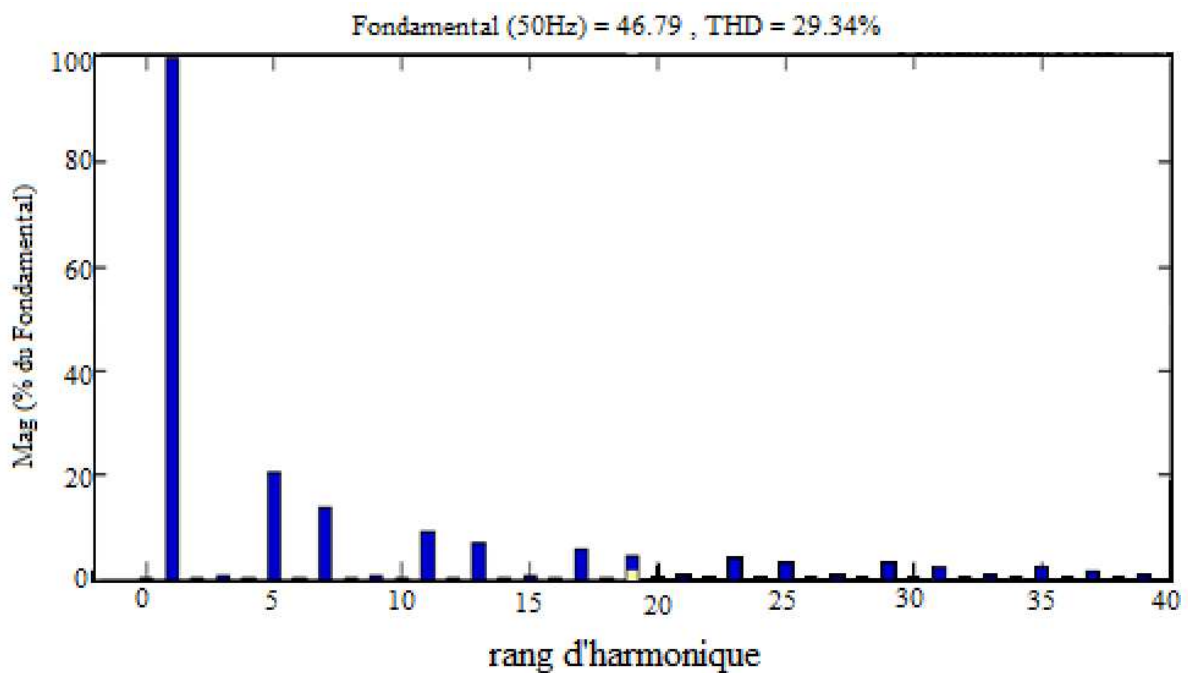


Figure -IV.3- : Spectre harmonique du courant de charge

La forme d'onde référence du courant sur la phase (1) qui doit poursuivre l'onduleur pour effectuer la compensation des courants harmoniques prélevés par la charge est représentée sur la figure(IV.4), ainsi le courant du filtre actif est représenté par la figure (IV.5)

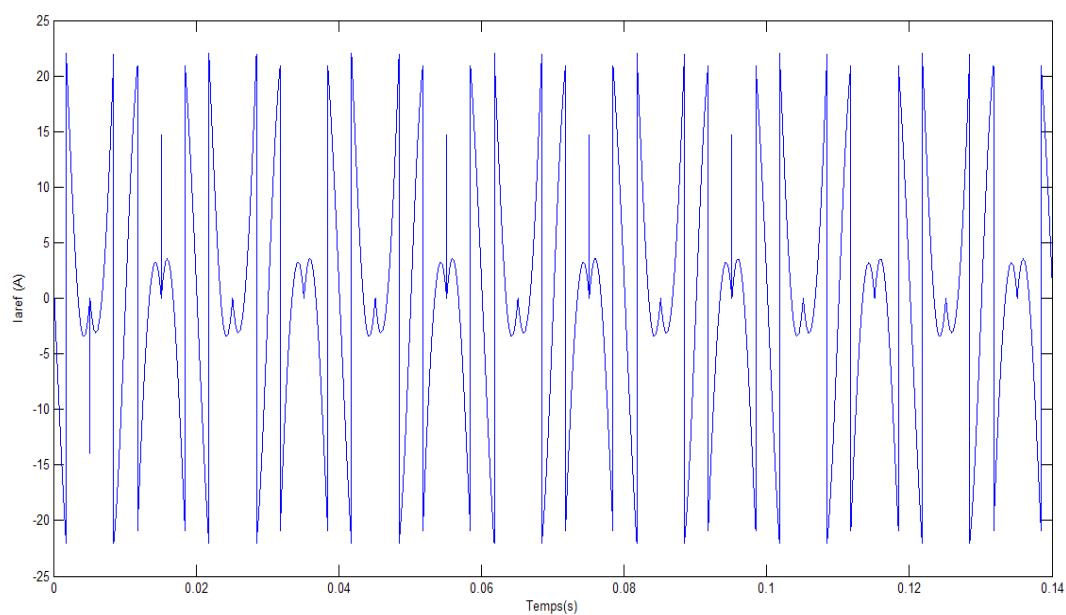


Figure IV -4- Forme d'onde du courant de référence du filtre actif

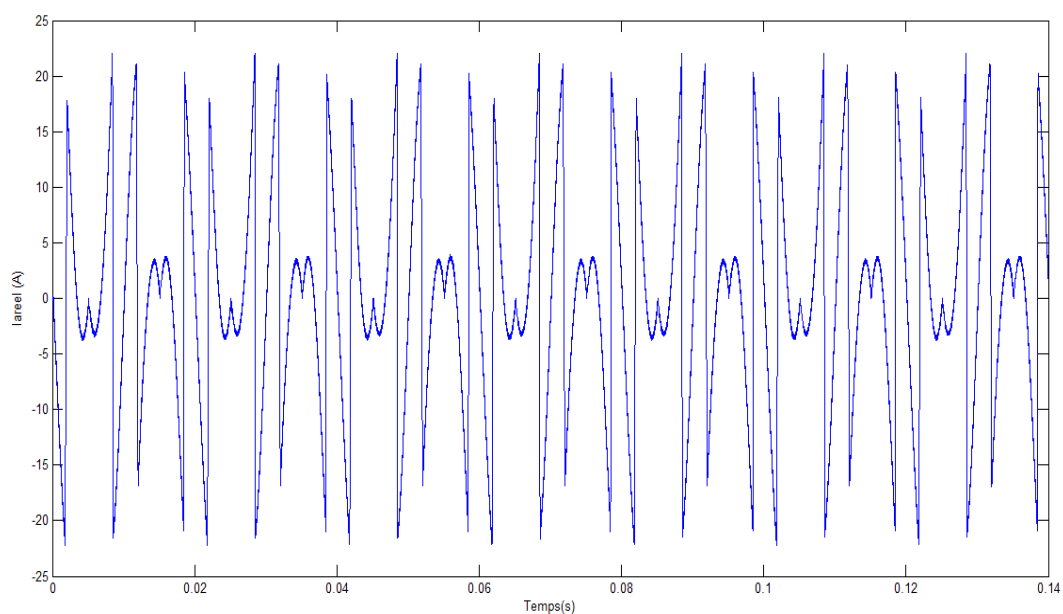


Figure -IV.5- Forme d'onde du courant du filtre actif avec hystérésis

D'après les figures (IV.4)et (IV.5)on remarque que le courant du filtreactif suit bien sa référence.

On remarque d'après la figure IV -6- que l'allure du courant du réseau après filtrage présente une forme sinusoïdale avec un THD de 4.95%. La figure IV -9- présente l'analyse spectrale de la phase une du réseau après filtrage.

Les résultats obtenus montrent l'efficacité et les bonnes performances du filtre actif de puissance, qui a réduit la THD à une valeur inférieure à 5% correspondant aux recommandations et normes internationales.

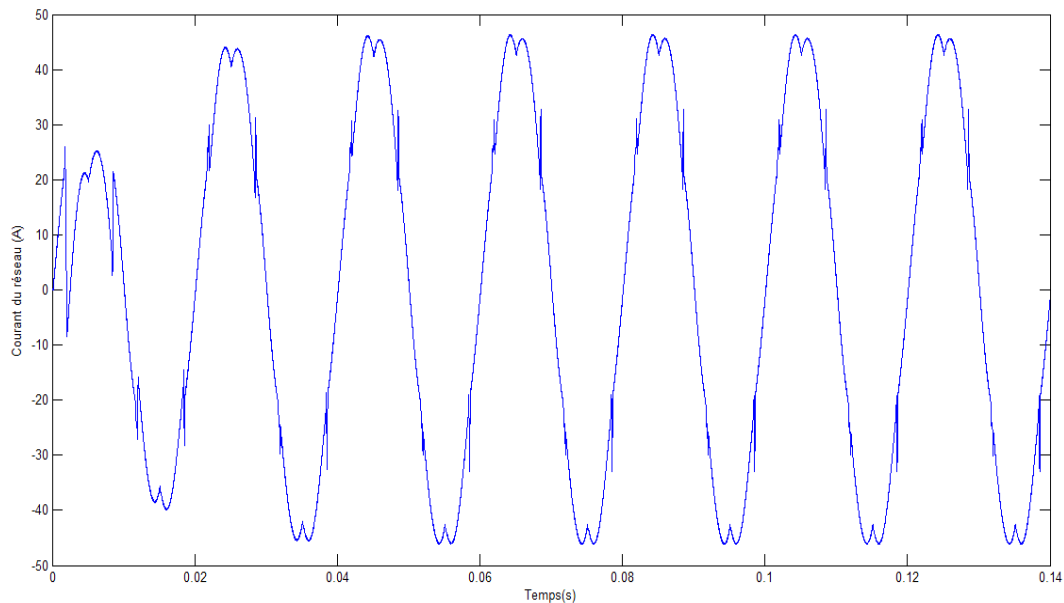


Figure IV -6- Forme d'onde du courant du réseau après filtrage

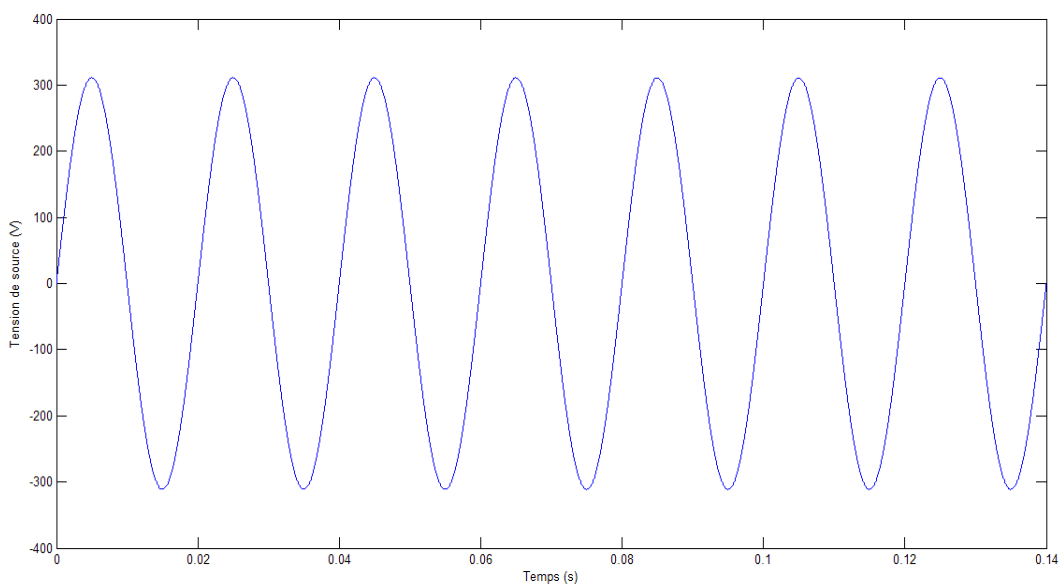


Figure IV -7- Forme d'onde de la tension de la source

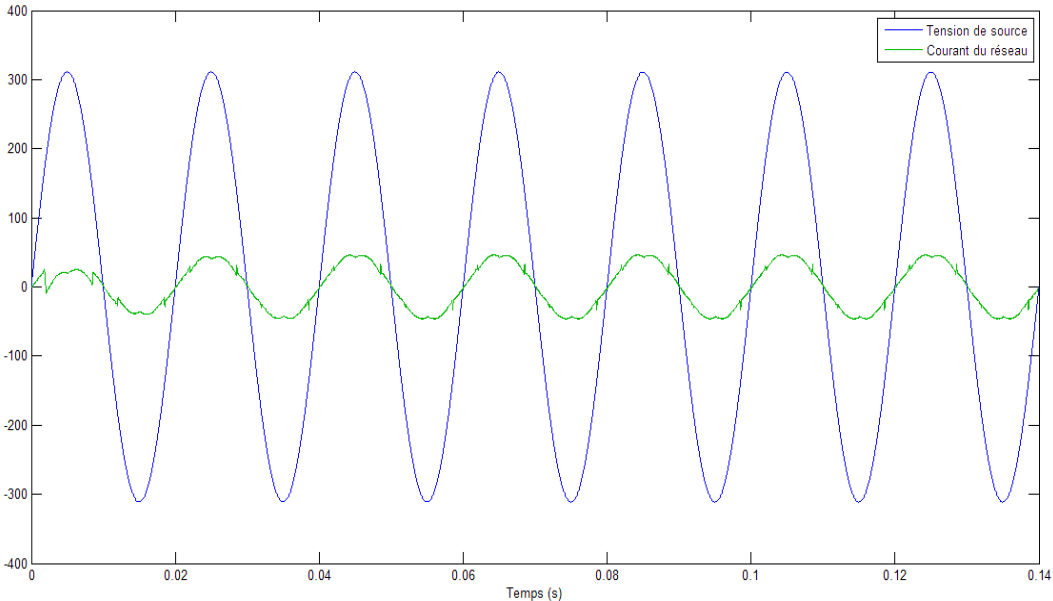


Figure IV -8- Forme d'onde de la tension et du courant réseau

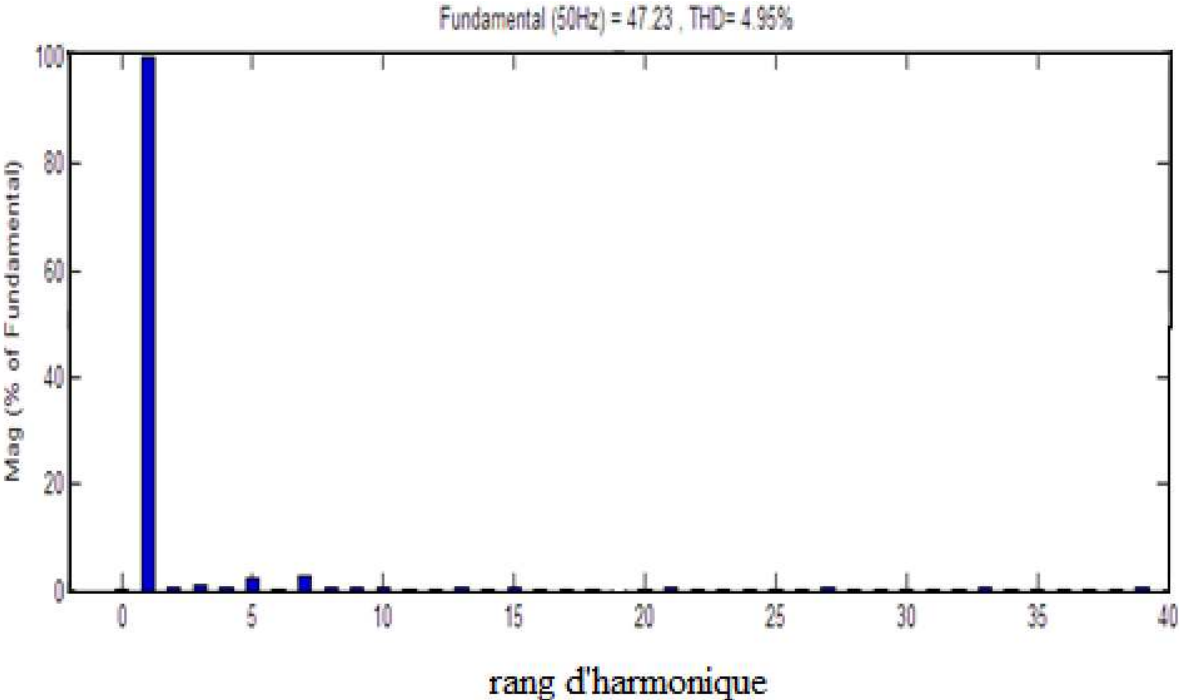


Figure IV -9- Spectre harmonique du courant de charge

### IV.3 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats de la simulation de l'ensemble réseau-charge polluante et filtre actif triphasé commandé par hystérésis. Le programme de simulation de l'ensemble formé par le système de puissance et le système de commande du filtre actif est réalisé grâce au logiciel Matlab/Simulink.

Ces résultats de simulation ont confirmé le filtrage du courant réseau  $I_r$ , son THD passe de 29.34% à 4.95% ainsi que son spectre harmonique qui montre l'atténuation de tous les harmoniques autre que le fondamental.

### Conclusion générale

Les harmoniques engendrées par les charges non linéaires circulent dans les réseaux électriques et perturbent sérieusement le fonctionnement normal de certains équipements électriques pouvant même engendrer leur destruction. Ces effets néfastes peuvent apparaître instantanément, mais peuvent également se produire à long terme tant pour le distributeur que pour les exploitants.

Ce travail a été consacré à l'étude d'une stratégie de dépollution des réseaux électriques, appelée filtrage actif de puissance, principale solution aux problèmes engendrés par la pollution harmonique dans les réseaux de distribution.

Dans le premier chapitre, on a montré les différentes perturbations dans les réseaux et leurs effets sur les appareils électriques, soit à court ou à long terme. Ainsi que les normes internationales donnant les limites acceptables pour ces perturbations.

Puis on a présenté, dans le deuxième chapitre les solutions traditionnelles pour les réduire, notamment le filtrage passif. Le filtrage actif est une nouvelle solution pour la dépollution harmonique.

Afin d'aborder cette étude, on a présenté dans la première partie du 3<sup>ème</sup> chapitre la structure générale du système réseau, charge non linéaire et filtre actif, puis le modèle de chaque partie seule.

Dans la deuxième partie du chapitre, on a recensé un nombre d'algorithmes utilisés pour la détection des grandeurs harmoniques de référence, la transformé de Fourier, la méthode de détection synchrone, la méthode des puissances fluctuantes et la méthode des puissances instantanées qu'on a choisi pour identifier les courants harmoniques utilisés pour la commande de l'onduleur.

Les deux principes de commande pour contrôler le courant du filtre, MLI et hystérésis, sont étudiés. La commande par hystérésis est très simple à mettre en œuvre, pour cela on l'a utilisé dans cette étude.

Le dernier chapitre a exposé les résultats de simulation avec le logiciel Matlab/simulink des différentes grandeurs avant et après filtrage. D'après les résultats obtenus, on remarque que le THD est amené de 29.34% à 4.95% après filtrage, nous confirmant ainsi que ce filtre est très adéquat pour l'élimination des harmoniques.

- [1] **M.A.E.ALALI**, « Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension », Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur-Strasbourg I, 2002.
- [2] **A.OMEIRI**, « Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant ».  
Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, 2007.
- [3] **H. Djeghloud**, « Filtrage actif de puissance »  
Thèse de Doctorat, Université Mentouri Constantine, 2007.
- [4] **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, 2008.
- [5] **S. Karimi**, « continuité de service des convertisseurs triphasés de puissance et prototypage 'FPGA in the loop' : application au filtre actif parallèle.  
Thèse de doctorat, Université Henri Poicaé, Nancy-I.
- [6] **N.K.Nguyen**, « Approche neuromimétique pour l'identification et la commande des systèmes électriques : application au filtrage actif et aux actionneurs synchrones.  
Thèse de doctorat, Université de Haute-Alsace, 2010. »
- [7] **N. Belhaouchit**, « Fonctionnement à fréquence de commutation constante des convertisseurs de puissance en utilisant des techniques de commande avancées.  
Application : amélioration de la qualité de l'énergie. »  
Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas Setif, 2011.
- [8] **S.CHENAI**, « Etude, modélisation et commande des filtres actifs : apport des techniques de l'intelligence artificielle. »  
Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2013
- [9] **R.KifoucheRezki**, « Identification des harmoniques et génération du courant de référence "application au convertisseur statique ».  
Mémoire de Magister, Université M'hamedBouguarraBoumerdes, 2005.
- [10] **L. Zellouma**, « Filtrage actif parallèle des harmoniques du courant générés par un pont redresseur triphasé non commandé. »  
Mémoire de Magister, Université d'Annaba 2006
- [11] **S.KEBIRI**, « Modélisation et simulation d'un filtre actif multiniveaux. »  
Mémoire de magistère, Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, 2009.

- [12] **I.Ghadbane**, « Commande d'un filtre actif triphasé parallèle par différents régulateurs. »  
Mémoire de Magister, Université de Biskra, 2011.
- [13] **Sahli**, « Filtrage actif et contrôle de puissances : application aux systèmes photovoltaïques interconnectés au réseau. »  
Mémoire de magistère, Université Ferhat Abbas de Sétif, 2012.
- [14] **D. Nekkar**, « Contribution à l'étude des stratégies de commande des filtres actifs triphasés. »  
Mémoire de Magister, Université de Souk Ahras, 2014.
- [15] **H. Salem**, « Commande d'un Filtre actif parallèle à quatre bras par des techniques avancées. »  
Mémoire de magister, Université Mohamed Khider – Biskra, 2015.
- [16] **S. Tadjer**, « étude d'un système de compensation d'harmonique en utilisant un générateur photovoltaïque 'GPV'. »  
Mémoire de magister, Université M'Hamed Bougara de Boumerdes
- [17] **G. Seguiet**, « Les convertisseurs de l'électronique de puissance : La conversion alternatif- continu. »  
Volume 1, 2ème édition.  
Technique et documentation LAVOISIER, 1992
- [18] **IEEE STD 519-1992**, «IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems», IEEE 519 working Group, 1992.
- [19] **IEEE STD 1159-1995**, «IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality», 1995
- [20] **F. LABRIQUE, G. SEGUIER, R. BAUSIERE**, « Les convertisseurs de l'électronique de puissance : La conversion continu –alternatif. »  
Volume 4, 2ème édition.  
Technique et documentation LAVOISIER, 1995.
- [21] **R. Azouaou**, « Ecoulement de puissance harmonique dans les réseaux arborescents et maillés »  
Sonelgaz Conférence sur les perturbations harmoniques. Avril 2001

- [22] **S. Rechka**, « Étude de méthodes de filtrage des harmoniques dans les réseaux électriques de distribution »  
Maître es science, Université du Québec à Trois-Rivières, 2002
- [23] **J. Mignard, C. Pin**, « L'électronique de puissance : les redresseurs. »  
Edition ellipses, 2010.
- [24] « Chapitre II- Principes de Compensation des harmoniques »
- [25] **R. Ott**, « Qualité de la tension Harmonique Techniques de l'ingénieur, traité Génie électrique, D 4 264 »



## **Résumé :**

L'objectif de cette thèse est l'étude théorique et par simulation numérique des systèmes de filtrage active des harmoniques générés par un redresseur triphasé à diodes en pont de Graëtz. Dans un premier temps nous avons présentés les différentes perturbations qui peuvent avoir lieu dans les réseaux électriques basse tension, les normes standards internationales ainsi que les solutions de dépollution existantes, traditionnelles et modernes. En particulier le Filtre Actif Parallèle (FAP), le Filtre Actif Série (FAS), et le filtre hybride. Dans un deuxième temps, l'étude a été focalisée sur le FAP dédié à la compensation des harmoniques de puissance. Notre travail porte sur l'étude conjointe de l'identification des harmoniques et de la commande de l'onduleur. L'étape d'identification des courants harmoniques est fondamentale dans le processus de filtrage. La technique d'identification développée est la méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées, celle-ci offre l'avantage de choisir la perturbation à compenser avec précision, rapidité et facilité d'implantation. En suite on a passé à la commande qui est la commande par MLI. Enfin on a présenté les résultats de simulation sous Matlab/Simulink.

## **Mots-clefs :**

Filtre actif

Harmonique

Filtre passif

Filtrage de puissance

Méthode des puissances instantanées

Compensation harmonique

Perturbations harmoniques

Filtrage des harmoniques