

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



## Mémoire de Fin d'Étude

Présenté à

**L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued**

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

En vue de l'obtention du diplôme de

### **MASTER ACADEMIQUE**

En Réseaux électriques

Présenté par :

**BEN HAOUA LARBI DAOULI**

# Thème

**Compensation des harmoniques dans un réseau  
électrique triphasé**

Soutenu le .../09/2020. Devant le jury composé de :

Mr. Président

Mr. MAHNI Tidjani Maitre de conférences Rapporteur

Mr. Examineur

**Année Universitaire 2019/2020**



## REMERCIEMENTS

Louange A Dieu Qui Nous A Donné La Foi, Le  
Courage, La Patience Et La Volonté Pour  
Réaliser Ce Modeste Travail Dans Des  
Meilleures Circonstances Et En Bon Etat

Nos premiers remerciements iront à monsieur MAHNI  
Tidjani pour nous avoir encadrés  
durant toute la période d'étude.

Nous remercions aussi les membres du Jury :

OUBAIDI Nabil

et

BEN HAOUA Bachir

d'avoir accepté

de juger notre travail.

Nos vifs remerciements vont également à tous nos amis  
pour leur soutien moral tout au long de la préparation  
de ce mémoire.

Nous ne pouvons pas clôturer nos remerciements sans  
se

Retourner vers les personnes les plus chers à nous ; nos  
parents

qui ont eu un rôle essentiel et continu dans notre  
réussite.

***BEN HAOUA larbi daouli***



## *Dédicace*

je dédie ce fruit de travail :

A ma très chère maman, pour sa  
tendresse, sa bienveillance, son

Encouragement, pour ce qu'elle a fait depuis  
mon enfance jusqu'à ce jour.

A mon cher père pour sa générosité, sa bonté, je  
te remercie.

A mes frères et A mes chères sœurs

Et à tous les membres de ma grande famille.

En fin à tout ce qui nous aime et qu'on aime

BEN HAOUA Larbi Daoudi

## Résumé:

Les convertisseurs statiques sont de plus en plus utilisés grâce aux avantages énormes qu'ils offrent. Cependant ces convertisseurs polluent les réseaux électriques en introduisant des courants et des tensions harmoniques et en consommant parfois l'énergie réactive. Les harmoniques circulent dans les réseaux électriques et peuvent perturber le fonctionnement normal de certains équipements électriques voir même engendrer leur destruction.

Afin d'éliminer les courants harmoniques engendrés par les convertisseurs statiques plusieurs solutions existent.

Dans ce travail, la solution classique, qui consiste à éliminer les harmoniques par des filtres passifs est présentée. Ensuite, la solution moderne à l'aide d'un filtre actif parallèle est traitée. Les différents éléments constituant le réseau électrique-charge non linéaire-filtre sont présentés.

Dans les simulations, ces deux types de filtres sont utilisés pour éliminer les courants harmoniques générés par un pont redresseur. Les résultats des simulations sont présentés et interprétés.

**Mots clés :** Charge non linéaire, Filtre actif, Filtre passif, Taux de distorsion harmonique, Identification des courants harmoniques.

## ملخص:

يتم استخدام المحولات الثابتة أكثر فأكثر بفضل المزايا الهائلة التي تقدمها. ومع ذلك، فإن هذه المحولات تلوث الشبكات الكهربائية عن طريق إدخال تيارات وفولتية توافقية واستهلاك الطاقة التفاعلية أحياناً. تنتشر التوافقيات في الشبكات الكهربائية ويمكن أن تعطل التشغيل العادي لبعض المعدات الكهربائية أو حتى تؤدي إلى تدميرها. من أجل القضاء على التيارات التوافقية الناتجة عن المحولات الثابتة، توجد عدة حلول. في هذا العمل، يتم تقديم الحل الكلاسيكي، والذي يتمثل في القضاء على التوافقيات بواسطة المرشحات السلبية. ثم تتم معالجة الحل الحديث باستخدام مرشح نشط متوازي. يتم عرض العناصر المختلفة التي تشكل شبكة كهربائية - مرشح الحمل غير الخطي. في عمليات المحاكاة، يتم استخدام هذين النوعين من المرشحات للتخلص من التيارات التوافقية الناتجة عن جسر المعدل. يتم عرض نتائج المحاكاة وتفسيرها.

**الكلمات المفتاحية:** الحمل غير الخطي، الفلتر النشط، الفلتر السلبي، معدل التشويه التوافقي، تحديد التيارات التوافقية.

## LISTE DES SYMBOLES

f	Fréquence
$f_h$	Fréquence de la composante harmonique de rang h
$f_1$	Fréquence de la composante fondamentale
THD	Taux de Distorsion Harmonique
D	Puissance Déformante
P	Puissance active
Q	Puissance réactive
S	Puissance apparente
FP	Facteur de puissance
$I_f$	Valeur efficace du courant injecté par le FAP
$I_{1h}$	Valeur efficace du Courant harmonique du rang h
$V_1$	Valeur efficace de la tension de l'harmonique de rang h
$V_h$	Valeur efficace de la tension du fondamental
p	indice de pulsation
L	Inductance
C	Capacité
R	Résistance
IGBT	Insolâted Gâte Bipolaire Transistor
MLI	modulation de largeurs d'impulsions
FAP	Filtre actif parallèle
Fp	Filtre passif
$R_s$	Résistance du réseau coûté source ( $\Omega$ ).
$L_s$	Inductance coûté source (H).
$R_c$	Résistance coûté de charge ( $\Omega$ ).
$L_c$	Inductance coûté source (H).
$L_f$	Inductance de filtre
$C_{dc}$	Condensateur du bus continue
$I_s$	Courant du source
$I_f$	Courant du filtre
$I_h$	Courant harmonique de la charge
$i_\alpha^*, i_\beta^*, i_c^*$	le courant d'identifie
$i_{ca}, i_{cb}, i_{cc}$	le courant de line
$\tilde{p}, \tilde{q}$	Composantes Alternatives de la puissance réelle et imaginaire respectivement
$\alpha$ - $\beta$	Axes du repaire de Concordia
$\Delta T$	La période de variation du courant du filtre
$w_h$	la pulsation du rang h
$T_i$	Etat de l'interrupteur i (ouvert ou fermé)

<b>Ic1</b>	la valeur efficace du courant fondamental
<b>Ici</b>	Les valeurs efficaces des différentes harmoniques du courant. Le domaine
<b>i<sub>sref</sub></b>	Le courant de référence de la source
<b>i<sub>h</sub></b>	Le courant harmonique
<b>Ic</b>	la valeur efficace du courant de la charge
<b>L<sub>ch</sub></b>	L'inductance de charge
<b>L<sub>f</sub></b>	L'inductance de filtre
<b>R<sub>ch</sub></b>	Résistance de charge
<b>R<sub>f</sub></b>	La résistance de filtre
<b>f<sub>r</sub></b>	La fréquence de résonance du filtre
<b>f<sub>max</sub></b>	La fréquence maximale de commutation
<b>f<sub>p</sub></b>	La fréquence de la porteuse
<b>V<sub>s</sub></b>	La tension de réseau
<b>VDC</b>	La tension continue
<b>V<sub>ref</sub></b>	La tension de référence
<b>W</b>	Pulsation
<b>E</b>	Tension instantanée de phase du réseau
<b>Sa,b,c</b>	États de commutation des interrupteurs du convertisseur de tension
<b>V<sub>ab</sub></b>	les tensions d'entrée du redresseur
<b>V<sub>ref</sub></b>	La tension de référence
<b>V<sub>tria</sub></b>	la tension de la porteuse triangulaire
<b>E<sub>m</sub></b>	Tension de phase maximale du réseau
<b>M</b>	L'indice de modulation
<b>r</b>	Le coefficient de réglage ou le taux de modulation
<b>V<sub>m</sub></b>	L'amplitude de la tension de référence
<b>U<sub>pm</sub></b>	L'amplitude de la porteuse
<b>ε<sub>k</sub></b>	la valeur efficace du courant fondamental
<b>Δi</b>	Les valeurs efficaces des différentes harmoniques du courant. Le domaine
<b>k<sub>p</sub></b>	L'écart entre le courant réel et sa référence
<b>k<sub>i</sub></b>	La bande d'hystérésis
<b>I<sub>inj</sub></b>	Paramètre proportionnel

<b><math>V\omega, V\beta</math></b>	Paramètre intégrateur
<b><math>I\omega, I\beta</math></b>	:Le courant injecté par le filtre
<b><math>\Delta</math></b>	Les composantes orthogonales du repère ( $\alpha$ - $\beta$ )
<b><math>Ic1</math></b>	Les composantes orthogonales du repère ( $\alpha$ - $\beta$ )
<b><math>Ici</math></b>	Constant dans l'hypothèse d'une tension sinusoïdale équilibrée
<b><math>i_{sref}</math></b>	L'écart entre le courant réel et sa référence

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure -I.1</b> : Creux et coupures de tension	<b>4</b>
<b>Figure-I.2</b> : Fluctuation de tension	<b>4</b>
<b>Figure -I.3</b> : Déséquilibre du système triphasé de tension.	<b>5</b>
<b>Figure -I.4</b> :Variation de la fréquence	<b>5</b>
<b>Figure-I.5</b> : Décomposition d'un signal périodique	<b>7</b>
<b>Figure -I.6</b> : Représentation spectrale d'un signal polluée	<b>8</b>
<b>Figure -I.7</b> : Diagramme de Fresnel des puissances	<b>13</b>
<b>Figure -II.1</b> :Raccordement d'une inductance anti-harmonique.	<b>17</b>
<b>Figure -II.2</b> : Filtre passif résonant.	<b>18</b>
<b>Figure -II.3</b> :Filtre passif amortide 2 <sup>ème</sup> ordre.	<b>19</b>
<b>Figure -II.4</b> :Autres types desFiltre passif amorti	<b>20</b>
<b>Figure -II.5</b> : Schéma bloc avant le filtrage.	<b>22</b>
<b>Figure-II.6</b> : Les allures des courants de la source avant le filtrage	<b>23</b>
<b>Figure-II.7</b> : Le spectre d'harmonique et Le THD de courant avant le filtrage.	<b>23</b>
<b>Figure -II.8</b> : Schéma du pont a diodes avec filtre résonnant accordé sur le rang 5.	<b>24</b>
<b>Figure -II.9</b> : Allures des courants de la source après le filtrage de l'harmonique 5.	<b>24</b>
<b>Figure -II.10</b> : le spectre d'harmonique après le filtrage de l'harmonique et le THD de courant	<b>25</b>
<b>Figure -II.11</b> : Allures des courants de la source après le filtrage de l'harmonique 7	<b>25</b>
<b>Figure -II.12</b> : Le spectre d'harmonique après le filtrage de l'harmonique 7 et le THD de courant	<b>26</b>
<b>Figure -II.13</b> : Schéma du pont a diodes avec filtre résonnant accordé sur le rangs 5 et 7.	<b>26</b>
<b>Figure -II.14</b> : Allures des courants de la source après le filtrage de l'harmoniques 5 et 7	<b>27</b>
<b>Figure -II.15</b> : Le spectre d'harmonique après le filtrage des harmoniques 5 et 7	<b>27</b>
<b>Figure -III.1</b> : Schéma de principe du filtrage actif.	<b>30</b>
<b>Figure. -III.2</b> : Structure générale du filtre actif parallèle	<b>32</b>
<b>Figure -III-3</b> : Structure d'un onduleur de tension triphasé.	<b>33</b>
<b>Figure -III.4</b> : Schéma de principe d'identification des courants harmoniques	<b>36</b>
<b>Figure -III. 5</b> : schéma représentant le pricipice de séparation (Y= p ou q)	<b>38</b>

<b>Figure -III. 6:</b> Algorithme d'identification des harmoniques	<b>39</b>
<b>Figure -III.7 :</b> commande par hystérésis sous Matlab- Simulink.	<b>40</b>
<b>Figure -III.8 :</b> Schéma de la Régulation de la tension du bus continu du filtre actif parallèle.	<b>41</b>
<b>Figure -III. 9 :</b> schéma bloc du filtre actif parallèle commandé par hystérésis.	<b>42</b>
<b>Figure -III.10 :</b> Allure du courant du côté de la charge.	<b>43</b>
<b>Figure -III.11 :</b> Allures des courants de la source après compensation.	<b>43</b>
<b>Figure -III.12 :</b> Allure du courant injecté par le filtre actif.	<b>43</b>
<b>Figure -III.13 :</b> Allures du courant et de la tension de la source.	<b>44</b>
<b>Figure -III.14 :</b> le THD de courant de la source avant compensation.	<b>44</b>
<b>Figure -III.15 :</b> le THD de courant de la source après compensation.	<b>44</b>
<b>Figure -III.16 :</b> Allures des courants de la source durant la variation de charge	<b>45</b>
<b>Figure -III.17 :</b> Allure du courant de la charge durant la variation de charge	<b>45</b>
<b>Figure -III.18:</b> Allures du courant harmonique de référence $I_{ah-ref}$ et $I_{ainj}$ le courant injecté par le filtre actif durant la variation de charge.	<b>45</b>

## **LISTE DES TABLEAUX**

<b>Tableau I.1</b> : Limites des tensions harmoniques selon IEEE-519	<b>14</b>
<b>Tableau I.2</b> : CEI 61000-2-2 : Niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux publics basse tension.	<b>14</b>
<b>Tableau I.3</b> -Limite des composantes harmoniques en courant	<b>15</b>
<b>Tableau -II.1</b> : Les paramètres de simulation.	<b>22</b>
<b>Tableau -III.1</b> : Les paramètres de simulation.	<b>42</b>

## Liste des abréviations

**THD** : Taux de distorsion harmonique

**FP** : Le facteur de puissance.

**$F_{dis}$**  : Le facteur de distorsion.

**CEM** : Les normes définissent les règles relatives à la compatibilité électromagnétique.

- **CEI** : au niveau international.
- **CENELEC** : au niveau européen.
- **l'UTE et le CEF** : au niveau français.

**FAP** : filtre actif parallèle.

**FP** : filtres passifs.

**MLI** : Modulation en largeur d'impulsions.

**GTO** : Le thyristor à extinction par la gâchette, en anglais *Gâte Turn-Off Thyristor*.

**IGBT** : Le transistor bipolaire à grille isolée, en anglais *Insulated Gate Bipolar Transistor*.

## SOMMAIRE

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Perturbations des réseaux électriques</b>	
1- Introduction.....	3
I-2- Les perturbations électriques .....	3
I-2.1- Creux et coupures de tension .....	3
I-2.2- Fluctuations de tension.....	4
I-2.3- Déséquilibre du système triphasé de tension.....	4
I-2.4-Variation de fréquence.....	5
I-2.5- Harmoniques.....	5
I-2.5.1- Définition des perturbations harmoniques.....	5
I-2.5.2- Origine des harmoniques.....	8
I-2.5.3- Effets des perturbations harmoniques.....	9
I-2.5.3.1- Effets instantanés.....	10
I.2.5.3.2-Effets à long terme .....	10
I-3-Characterisation des perturbations harmoniques.....	11
I-3.1-Le taux de distorsion harmoniques THD.....	11
I.3.2- Facteur de puissance.....	11
I-4- les normes imposées sur le THD.....	13
I-5- conclusion.....	15
<b>Chapitre II : Filtrage passif</b>	
II.1 Introduction.....	16
II.2 Principe deFiltrage passif.....	16
II.3Types des filtres passifs.....	16
II.4Avantages et inconvénients des filtres passifs.....	20
II.5Simulation du filtre passif.....	22
II.6Interprétation des résultats.....	28
II.7Conclusion.....	29
<b>Chapitre III : filtre actif parallèle</b>	
III.1. Introduction.....	30
III.2. Principe de filtrage actif parallèle.....	30
III.3.Différentstypes du filtrage actif parallèle.....	31
III.4. Structure du filtre actif parallèle.....	31
III.5. Commande du filtre actif parallèle.....	34

III.6. Résultats des simulations.....	42
III.7. Interprétation des résultats.....	46
III.8. Conclusion.....	46

**Conclusion Générale**

**Bibliographie**

# **Introduction générale**

### Introduction générale :

L'utilisation croissante dans l'industrie de systèmes commandés à base d'électronique de puissance entraîne de plus en plus de problèmes de perturbation au niveau des réseaux électriques. Ainsi, on assiste à une augmentation régulière, de la part des utilisateurs, des taux d'harmonique des courants, ainsi qu'à une importante consommation de la puissance réactive. La circulation de ces grandeurs perturbées va également provoquer des harmoniques de tension, lesquels vont se superposer à la tension nominale du réseau électrique.

Plusieurs solutions de dépollution harmonique dans les réseaux électriques ont été déjà proposées dans la littérature. Celles qui répondent le mieux aux contraintes industrielles sont les filtres actifs.

Dans le premier chapitre de ce mémoire nous allons présenter d'une manière générale les perturbations électriques et leur influence sur le réseau. Nous focalisons sur les perturbations harmoniques, leurs causes, leurs conséquences et les normes imposées.

Pour faire face aux perturbations harmoniques générées par les charges non-linéaires, la solution classique qui est connue depuis bien longtemps consiste en l'utilisation de filtre passif. Ce type de solution va être abordé au deuxième chapitre. Le principe de fonctionnement ainsi que les différents types du filtre passifs seront présentés. Une partie de ce chapitre sera réservée à la simulation du filtre passif résonant.

Le filtrage passif est la solution 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 aux caractéristiques du réseau sur lequel il est connecté.

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

Dans le troisième chapitre, nous allons étudier le filtre actif parallèle avec une structure d'un onduleur de tension en vue d'éliminer les courants harmoniques. Nous présentons son principe de fonctionnement, ces différents types et ces différents constituants. Les résultats de simulations d'un filtre actif parallèle à trois fils seront présentés et

## Introduction générale

---

commentés. Finalement, une conclusion générale est présentée, résumant les résultats obtenus.

**Chapitre I**  
**Perturbations des réseaux**  
**électriques**

### I.1 Introduction :

Généralement, l'énergie électrique est délivrée sous forme d'un système triphasé de tensions sinusoïdales. Les paramètres caractéristiques de ce système sont la fréquence, l'amplitude, la forme d'onde et la symétrie du système triphasé. Mais depuis l'évolution technologique des composants d'électronique de puissance les distributeurs d'énergie rencontrent plusieurs problèmes liés à l'accroissement du nombre de convertisseurs statiques raccordés aux réseaux de distribution d'énergie.

Dans ce chapitre nous allons présenter, les perturbations électriques, puis nous concentrons sur les harmoniques en donnant la définition des perturbations harmoniques, les origines des harmoniques, les effets des harmoniques et caractérisation des perturbations harmoniques ainsi que les normes.

### I.2. Perturbations électrique :

L'énergie électrique est délivrée sous forme de tension, La qualité de la tension peut être affectée, soit par des perturbations aléatoires à caractère accidentel, soit par des perturbations existantes en permanence ou pendant des instants de durées bien déterminées. Ces perturbations sont classées comme suit :

#### I.2.1. Creux et coupure de tension :

Le creux de tension est une diminution de son amplitude (entre 10% à 90% de la tension nominale) pendant un temps de 10 millisecondes jusqu'à quelques secondes. Les creux de tension sont dus en général à des défauts dans les réseaux publics ou ceux des utilisateurs. Ils apparaissent aussi lors des manœuvres d'enclenchement mettant en jeu des courants de fortes intensités (moteurs, transformateurs, etc.) [1].

Une coupure brève est une diminution de la tension pendant une courte durée qui n'excède pas une minute. Ces coupures sont dues au fonctionnement du système de protection des réseaux aériens évitant ainsi des coupures longues [1]. La figure I.1 montre un exemple d'un creux et d'une coupure de tension.

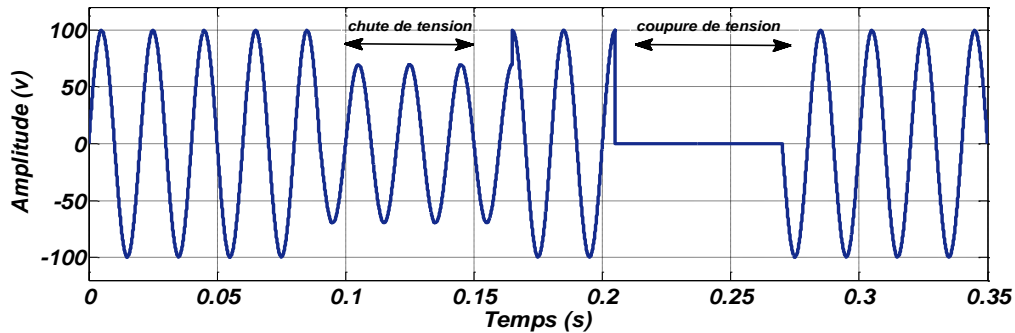
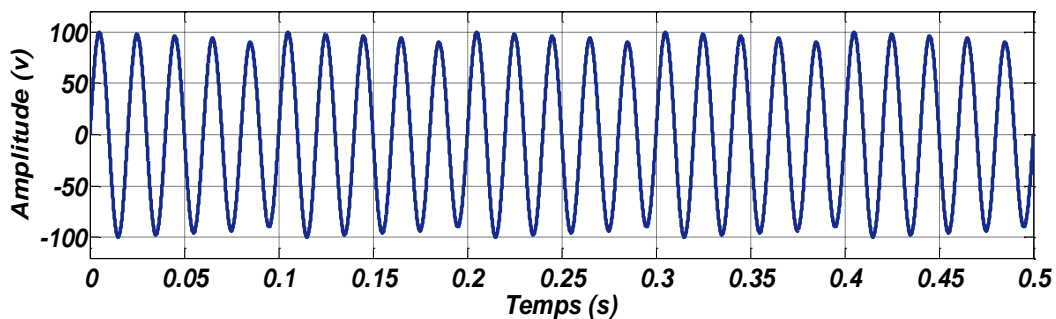


Figure I.1- Creux et coupures de tension

### I.2.2. Fluctuation de tension :

Les fluctuations de tension sont des variations périodiques ou erratiques de l'enveloppe de la tension qui se produisent à des intervalles de temps de quelques centièmes de secondes. L'amplitude de la tension doit se situer dans une bande de  $\pm 10\%$  de sa valeur nominale. Ces fluctuations entraînent des variations de flux lumineux pour les lampes à incandescence créant un papillotement de la lumière [1]. La figure I.2 montre un exemple d'une fluctuation de tension.



Figuer.I.2 : Fluctuation de tension.

### I.2.3. Déséquilibre du système triphasé :

Lorsque les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalées d'un angle de  $120^\circ$  les unes par rapport aux autres, on parlera du déséquilibre du système triphasé de tension. La figure I.3 représente, un exemple de déséquilibre de tensions d'un système triphasé.

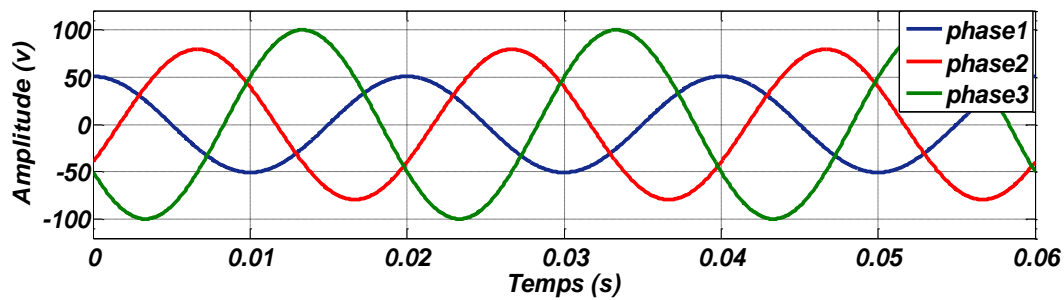


Figure I.3 - Déséquilibre du système triphasé de tension.

#### I.2.4. Variation de fréquence :

Les réseaux de distributions ou de transport ont une fréquence constante, sa variation est très rare sauf dans des circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau. Dans les conditions normales d'exploitations, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle de 50 Hz  $\pm$ 1%. La figure I.4 montre un exemple sur la variation de fréquence d'un réseau électrique.

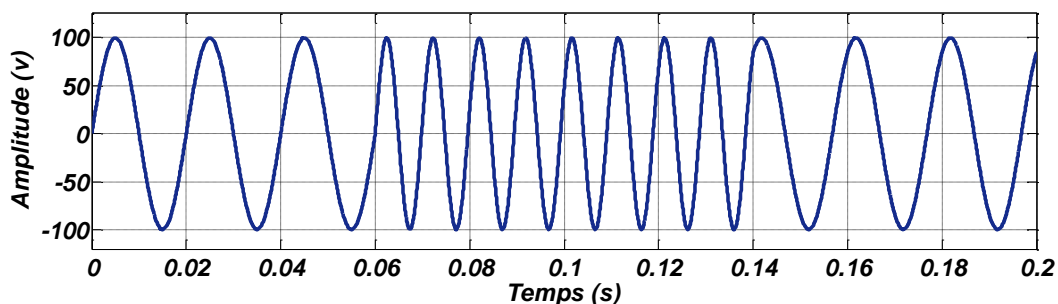


Figure I.4 - Variation de la fréquence

#### I.2.5 Harmoniques :

##### I-2.5.1. Définition des perturbations harmoniques :

Une charge non linéaire appelle du réseau électrique un courant déformé, lequel va modifier l'allure de la tension sinusoidale. Elle génère des courants harmoniques qui circulent à partir de la charge vers l'alimentation en empruntant le chemin de la moindre impédance.

Les courants harmoniques sont des ondes sinusoidales dont la fréquence est un multiple entier de la fréquence fondamentale (celle du réseau, 50 ou 60Hz). La superposition des

courants harmoniques sur le courant fondamental provoque les formes d'ondes non sinusoïdales associées aux charges non linéaires [2].

Les harmoniques sont des tensions ou courants sinusoïdaux dont la fréquence est un multiple entier de la fréquence du réseau, La distorsion harmonique est une forme de pollution du réseau électrique, susceptible de poser des problèmes si la somme des courants harmoniques est supérieure à certaines valeurs limites [1].

En général, les harmoniques pris en compte dans un réseau électrique sont supérieurs à  $100\text{ Hz}$  et inférieur à  $2500\text{ Hz}$ , c'est-à-dire des rangs 2 à 50.

La décomposition en série de Fourier d'un signal périodique (non sinusoïdale comme la montre la Figure. I.5) de fréquence  $f=50\text{Hz}$ , peut être représentée, selon la décomposition harmonique sous la forme d'une somme de fonction composée :

- D'un terme sinusoïdal à la fréquence  $f_1=50\text{Hz}$ . Ce terme est appelé fondamental.
- Des termes sinusoïdaux dont les fréquences sont égales à  $n$  fois la fréquence du fondamental ( $f_h=nf_1$ ) et de valeurs efficaces. Ces fréquences multiples du fondamental sont appelées harmoniques.
- D'une éventuelle composante continue d'amplitude.

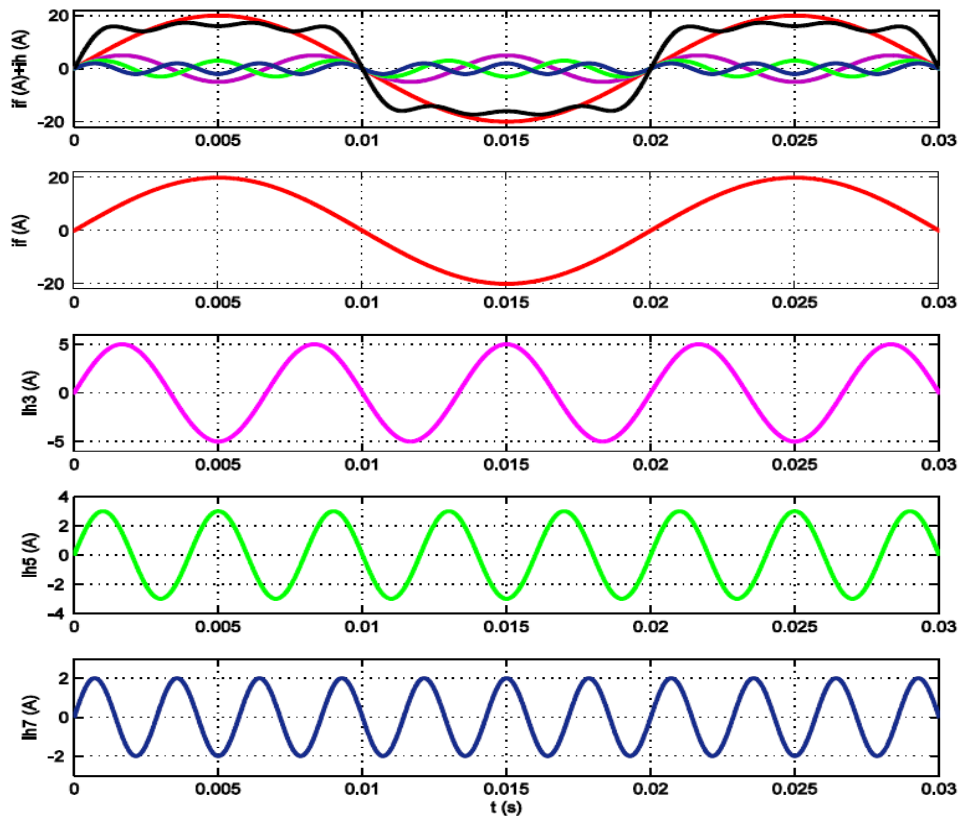


Figure. I.5. Décomposition d'un signal périodique

Dans le cas où il y a des variations périodiques ou aléatoires de la puissance absorbée par certains récepteurs, on notera qu'il existe d'autres composantes harmoniques tels que les inter-harmoniques et les infra-harmoniques qu'ils sont définis comme suite :

- **Inter-harmoniques** : Ce sont des composantes sinusoïdales d'une grandeur qui ne sont pas à des fréquences multiples entières de celle du fondamental : *130 Hz, 170 Hz, 220 Hz*.
- **Infra-harmoniques** : Ce sont des composantes sinusoïdales qui sont à des fréquences inférieures à celle du fondamental (*10 Hz, 20 Hz*).

La répartition des harmoniques, inter-harmoniques et infra-harmoniques est illustrée sur la Figure. I.6.

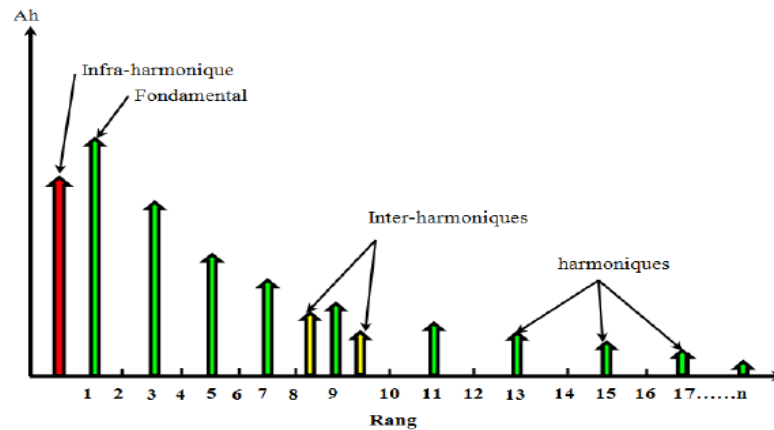


Figure I.6. : Représentation spectrale d'un signal polluée.

### I.2.5.2. Origine des harmoniques :

#### a. Les convertisseurs statiques:

Les convertisseurs statiques sont les sources d'harmoniques les plus gênantes du fait du nombre et de la puissance des dispositifs installés. On peut citer de manière non exhaustive :

- Les redresseurs monophasés et triphasés.
- Les gradateurs utilisés dans les entraînements.
- Les systèmes d'éclairage et de chauffage et les systèmes de conduite des réseaux.
- Les variateurs de vitesse électroniques constitués principalement d'un convertisseur statique et d'une partie électronique, destinés à commander la vitesse d'un moteur électrique.

#### b. L'éclairage :

L'éclairage, par lampes à décharge et tubes fluorescents, est générateur de courants harmoniques. Le taux individuel d'harmonique 3 peut même dépasser 100 % pour certaines lampes fluo-compactes modernes, d'où une attention particulière à porter à la détermination de la section et de la protection du conducteur neutre qui, véhiculant la somme des courants d'harmoniques 3 des trois phases, risque un échauffement important.

#### c. Les fours à arc :

Dans le cas du four à arc à courant alternatif l'arc est non linéaire, dissymétrique et instable. Il va induire des spectres possédant des raies impaires, paires et un spectre continu (bruit de fond à toutes les fréquences). Le niveau spectral est en fonction du type de four, de

sa puissance, de la période de fonctionnement considérée : fusion, affinage...Aussi seules des mesures peuvent déterminer le spectre de façon précise.

Dans le cas du four à arc à courant continu l'arc est alors alimenté par l'intermédiaire d'un redresseur. L'arc est plus stable qu'en courant alternatif. Le courant absorbé se décompose en un spectre semblable à celui d'un redresseur, et un spectre continu de niveau inférieur à celui d'un four à courant alternatif.

### **d. Les inductances saturées**

De telles inductances ont leur impédance fonction de l'amplitude du courant qui les traverse, et de fait elles provoquent des déformations notables de ce courant. C'est le cas, dans une certaine mesure, des transformateurs à vide soumis à une surtension permanente.

### **e. Les machines tournantes :**

Les machines tournantes donnent des harmoniques de denture de rangs élevés et d'amplitudes souvent négligeables [3][4].

### **I.2.5.3. Effets des perturbations harmoniques :**

De nombreux effets des harmoniques sur les installations et les équipements électriques peuvent être cités tels que la déformation des formes d'ondes entraînant des dysfonctionnements, l'augmentation des valeurs crêtes créant des claquages de diélectriques ou des valeurs efficaces induisant des échauffements et donc des pertes supplémentaires aussi bien en tension, ainsi qu'un étalement spectral provoquant des vibrations et des fatigues mécaniques. L'ensemble de ces effets ont un impact économique important à cause des surcoûts, de la dégradation du rendement énergétique, du surdimensionnement, des pertes de productivité ou des déclenchements intempestifs qu'ils entraînent.

Ces coûts de matériel, pertes énergétiques et perte de productivité entraînent une baisse de la compétitivité des entreprises. Les effets de ces perturbations peuvent se classer en deux types instantanés et à long terme [5-6].

### I.2.5.3.1. Effets instantanés :

On peut citer les effets instantanés des harmoniques comme suite :

- Dysfonctionnements des dispositifs de commande ou de régulation (détection du passage par zéro, ...etc.).
- Pertes de précision dans les appareils de mesure.
- Vibrations dans les moteurs électriques alternatifs à cause des couples mécaniques pulsatoires dus aux champs tournants harmoniques.
- Vibrations, bruits acoustiques dans les transformateurs ou les inductances dus aux efforts électrodynamiques proportionnels aux courants harmoniques.
- Perturbations induites dans les liaisons par courant faible sous forme de bruits par couplage électromagnétique (contrôle-commande, télécommunication, téléphonie, réseaux locaux, ...etc.).
- Interférences avec les systèmes de télécommande à distance utilisés par les distributeurs d'énergie.
- Déclenchement intempestif des circuits de protection.
- Effets de papillotement (flicker) au niveau des éclairages et des affichages des
- Appareils électroniques.

### I.2.5.3.2. Effets à long terme :

Les effets à long terme des harmoniques sont récapitulés comme suite :

- Vieillesse prématurée des moteurs électriques alternatifs du fait des pertes cuivre et fer supplémentaires, dû à la différence importante de la vitesse entre les champs tournants inducteurs harmoniques et le rotor.
- Échauffements et pertes joules supplémentaires des câbles et des équipements
- Entraînant des déclassements du matériel avec des surdimensionnements.
- Surchauffe du neutre.
- Échauffements supplémentaires des condensateurs par conduction et par hystérésis dans le diélectrique qui peuvent conduire au claquage.
- Pertes supplémentaires dans les transformateurs ou les inductances dues à l'effet de Peau dans le cuivre, à l'hystérésis et aux courants de Foucault dans le circuit magnétique.

- Fatigue mécanique des équipements à cause des vibrations et des couples pulsatoires.
- Vieillissement des isolants. Il 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 provoqué par l'échauffement des conducteurs.

### I-3 Caractérisation des perturbations harmoniques :

Différentes grandeurs sont définies pour caractériser la distorsion en régime déformé. Le taux global de distorsion harmonique (THD) et le facteur de puissance sont les plus employés pour quantifier respectivement la perturbation harmonique et la consommation de puissance réactive [7].

#### I-3.1 Taux de Distorsion Harmonique (THD) :

Notre étude se limite au cas où la source de tension est sinusoïdale et où le courant absorbé par la charge est entaché de composantes harmoniques. Dans ces conditions, le taux global de distorsion harmonique est bien adapté pour quantifier le degré de pollution harmonique sur les réseaux électriques. Le THD s'exprime par rapport à la fréquence fondamentale et caractérise l'influence des harmoniques sur l'onde de courant déformée. Il est donné par l'expression suivante :

$$THD(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n i_{ci}^2}}{i_{c1}} \quad (I.1)$$

Avec  $i_{c1}$  la valeur efficace du courant fondamental et  $i_{ci}$  les valeurs efficaces des différentes harmoniques du courant. Le domaine des fréquences qui correspond à l'étude des harmoniques est généralement compris entre 100 et 2000 Hz. Soit de l'harmonique de rang 2 jusqu'à l'harmonique de rang 40. Il est à signaler aussi que l'amplitude des harmoniques décroît généralement avec la fréquence [8].

#### I.3.2. Facteur de puissance :

Le facteur de puissance est défini, dans le cas général, par le rapport entre la puissance active et la puissance apparente.

$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} U_n \cdot I_n \cdot \cos(\phi_n)}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2} \cdot \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}} \quad \text{Avec} \quad \phi_n = \alpha_n - \beta_n \quad (I.2)$$

En présence des harmoniques, la puissance apparente  $S$  est composée de trois parties comme le montre l'équation suivante :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (I.3)$$

Avec

$\phi_n$  : le déphasage entre le courant et la tension entre  $P$  et  $S$ .

$P$  : la puissance active associée au courant fondamental.

$Q$  : la puissance réactive associée au courant fondamental.

$D$  : la puissance déformante due aux harmoniques du courant.

Où

$$P = 3 \cdot U \cdot I_{c1} \cdot \cos \phi = F_{dis} \cdot \cos(\phi) \quad (I.4)$$

Avec

$F_{dis}$ : présente le facteur de distorsion. Il vaut « 1 » lorsque le courant est parfaitement sinusoïdal, et, il décroît lorsque la déformation de l'onde s'accroît.

Par ailleurs :

$$Q = 3 \cdot U \cdot I_{c1} \cdot \sin \phi \quad (I.5)$$

et

$$D = 3 \cdot U \cdot \sqrt{\sum_{i=2}^{50} I_i^2} \quad (I.6)$$

Finalement :

$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \cos \phi_1 \cdot \cos \gamma = \cos \phi \quad (I.7)$$

Donc, on voit bien que les harmoniques affectent aussi le facteur de puissance[9].

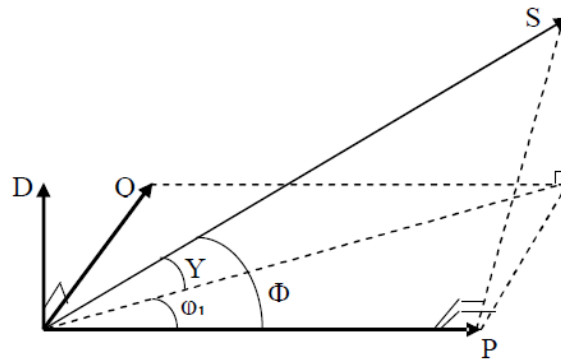


Figure I.7 : Diagramme de Fresnel des puissances

### I-4- Normes imposées sur le THD :

Les consommateurs ainsi que les distributeurs de l'énergie électrique sont conscients de l'importance d'une réglementation standard unique pour les problèmes de la pollution harmonique. Une telle réglementation universelle n'existe pas encore, cependant des organismes comme IEC (Commission Électrotechnique Internationale) en Europe [10,11] et IEEE en Amérique [12], élaborent des normes efficaces qui peuvent être regroupées en trois catégories :

1. Niveaux de compatibilité harmonique en amont du point commun de raccordement :

- IEEE 519-1992
- IEC 61000-2-2
- IEC 61000-3-6

2. Limites sur l'émission harmonique des équipements :

- IEC 61000-3-2 (appareils de moins de 16 A par phase)
- IEC 61000-3-4 (appareils de plus de 16 A par phase)

3. Guide pour la mesure des harmoniques :

- IEC 61000-4-7

La norme IEEE-519, par exemple, définit des limites pour les tensions et courants harmoniques au point commun de raccordement (PCC) pour assurer le bon fonctionnement

des récepteurs dans d'autres sites. À titre d'exemple, les taux individuels maximaux des tensions harmoniques ainsi que le THD à ne pas dépasser sont donnés dans le tableau I.1.

**Tableau I.1** : Limites des tensions harmoniques selon IEEE-519

Tension au jeu de barres	Composante harmonique individuelle maximale (%)	THD maximal (%)
69 kV et moins	3.0	5.0
115kV à 161 kV	1.5	2.5
Plus de 161 kV	1.0	1.5

D'autre part, les principales normes en matière de pollution harmonique basse tension sont définies au niveau international par la norme CEI 61000 [12].

➤ *CEI 61000-2-2* :

Cette norme fixe les limites de compatibilité pour les perturbations conduites basse fréquence et la transmission de signaux sur les réseaux publics d'alimentation basse tension. Les phénomènes perturbateurs incluent les harmoniques (tableau I.2), inter-harmoniques, fluctuations de tension, creux de tension, déséquilibres de tension transitoires, etc.

**Tableau I.2** : CEI 61000-2-2 : Niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux publics basse tension.

Harmoniques impairs non multiples de 3		Harmoniques impairs multiples de 3		Harmoniques pairs	
Rang harmonique h	Tension harmonique %	Rang harmonique h	Tension harmonique %	Rang harmonique h	Tension harmonique %
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+12.5/h				

**Tableau I.3** -Limite des composantes harmoniques en courant [13].

Harmoniques impairs		Harmoniques pairs	
rangs	Courant harmonique	rangs	Courant harmonique admissible maximale
3	0.30	2	1.08
5	1.14	4	0.43
7	0.77	6	0.30
9	0.40	8<n<40	0.23*8/n
11	0.33		
13	0.21		
15<n<39	0.15*15/n		

### I-5- Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents types de perturbations affectant l'onde de tension du réseau électrique. Comme nous avons pu le constater, les harmoniques et les déséquilibres de courant et de tension, les variations de la fréquence, les coupures et les creux de tension ont des effets néfastes sur les équipements électriques. Ces effets peuvent aller des échauffements et de la dégradation du fonctionnement jusqu'à la destruction totale de ces équipements.

Nous nous intéresserons dans les prochains chapitres aux différentes solutions de dépollutions des courants harmoniques.

# **Chapitre II**

## **Filtrage passif**

### II.1 Introduction :

L'installation des filtres passifs vise à réduire les tensions et les courants harmoniques dans les réseaux à des niveaux acceptables, d'autre part, elle vise à fournir tout ou une partie de la puissance réactive consommée. Il faut donc concevoir un filtre minimum; autrement dit un filtre qui supprime adéquatement les harmoniques à un coût minimal et qui fournit de la puissance réactive (pas nécessairement toute la puissance requise).

Dans ce chapitre nous allons aborder le filtrage passif des courants harmoniques. En effet, nous allons présenter, le principe de filtrage passif, les types des filtres passifs, les avantages et les inconvénients des filtres passifs et nous terminons par présenter les résultats des simulations d'un filtre résonant.

### II.2 Principe de 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 dévier 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[14].

### II.3 Types des filtres passifs :

#### a- Inductance anti-harmonique :

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

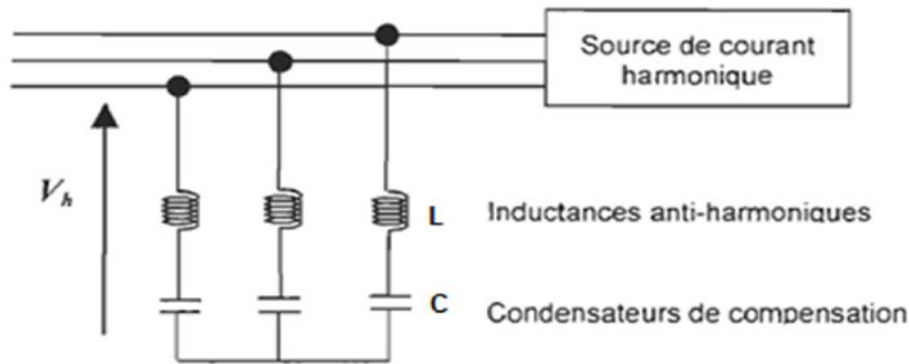


Figure (II.1) Raccordement d'inductances anti-harmonique.

Ce type de filtre a pour objectif essentiel de protéger les batteries de condensateurs d'une surintensité due aux harmoniques. Il a en outre pour effet de réduire les tensions harmoniques aux bornes de ces condensateurs. Il permet souvent de réduire les valeurs d'impédance harmonique du réseau, vues du point d'injection au voisinage de la fréquence d'accord et donc les tensions harmoniques sur le réseau.

La fréquence de résonance du filtre est donnée par :

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (II.1)$$

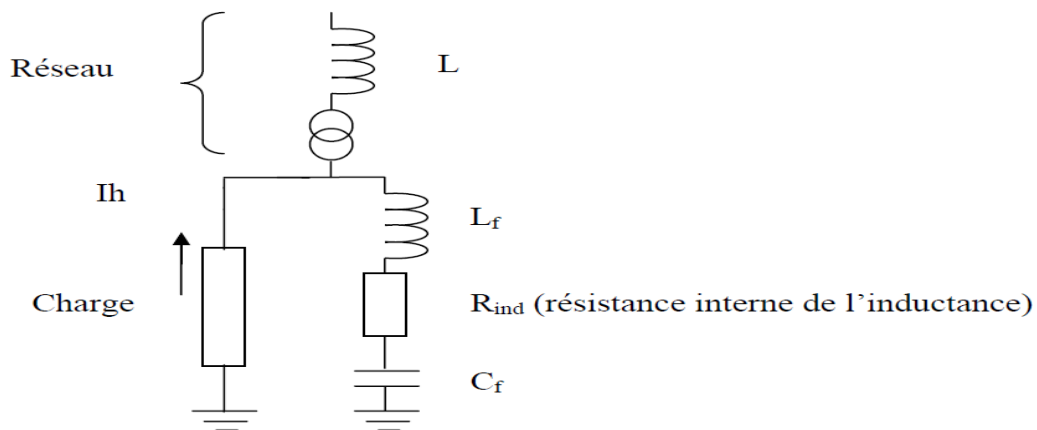
La fréquence d'anti-résonance  $f_{ar}$  est obtenue lorsque l'impédance équivalente à  $L_{cc}$  en parallèle à  $L, C$  tend vers l'infini :

$$f_{ar} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L + L_{cc})C}} \quad (II.2)$$

Pour éviter que ce filtre présente une résonance parallèle (anti-résonance) avec l'inductance du réseau sur lequel ils sont raccordés, on les accorde sur une fréquence inférieure à celle de la première injection de courant harmonique. A noter aussi que l'installation d'inductances anti-harmoniques accroît la tension permanente à la fréquence fondamentale aux bornes des condensateurs qui doivent donc être dimensionnés en conséquence[15].

**b- Filtre passif résonant :**

Un filtre passif résonant est un circuit RLC en série, accordé à la fréquence d'une harmonique généralement d'un rang inférieur. Le principe des filtres résonants est de présenter une impédance très faible au passage d'un courant harmonique d'un rang déterminé. On installe très souvent plusieurs filtres résonants en parallèle, correspondant aux différents rangs harmoniques à filtrer.



**Figure (II.2)** Filtre passif résonant.

L'impédance du filtre passif résonant est donnée par l'expression suivante :

$$Z = R + \frac{LC\omega^2 - 1}{C\omega} \quad (II.3)$$

La fréquence de résonance du filtre est donnée par :

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (II.4)$$

A la fréquence de résonance l'impédance du filtre est réduite à  $Z = R$  [16].

La fréquence d'anti-résonance  $f_{ar}$  est obtenue lorsque l'impédance équivalente à  $L$  en parallèle à  $C$  tend vers l'infini :

$$f_{ar} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L + L_{cc})C}} \quad (II.5)$$

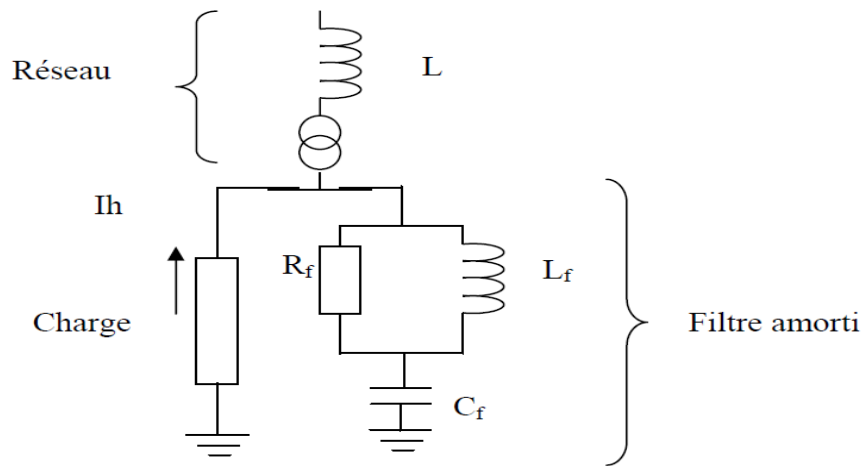
L'inductance du shunt possède par nature une résistance  $r_b$  (résistance de la bobine). On définit alors le facteur de qualité :

$$q = \frac{1}{r_b} \sqrt{\frac{L_f}{C_f}} \quad (II.6)$$

**c- Filtre passif amorti :**

Le filtre passif amorti est un circuit RLC constitué par la mise en série d'une capacité avec un ensemble constitué de la mise en parallèle d'une résistance dite résistance d'amortissement et d'une inductance.

On utilise les filtres amortis pour filtrer simultanément des harmoniques du rang supérieur, et non une harmonique d'un rang particulier. Il est recommandé lorsque les performances demandées ne sont trop élevées. On l'appelle aussi un filtre passe haut.



**Figure (II.3)** Filtre passif amorti de 2<sup>ème</sup> ordre.

Après quelques calculs, on montre que la fréquence de résonance de ce filtre est :

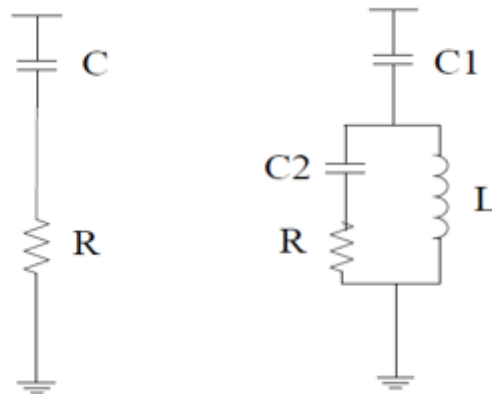
$$f_r = \frac{1 + qQ_f}{2\pi q \sqrt{L_f C_f (Q_f^2 - 1)}} \quad (II.7)$$

q est le facteur de qualité de la bobine.

$Q_f$  est le facteur de qualité du filtre.

$$q = \frac{1}{r_b} \sqrt{\frac{L_f}{C_f}} \quad (II.8)$$

$$Q_f = \frac{1}{r_f} \sqrt{\frac{L_f}{C_f}} \quad (II.9)$$



- (A) filtre amorti de 1er ordre

- (B) filtre amorti de 3ème ordre

**Figure (II.4)** Autres types de filtre passif amorti.

Le filtre amorti est moins sensible aux variations de ses éléments qu'un filtre résonant. L'utilisation des filtres amortis rend nécessaire le filtrage des rangs harmoniques inférieurs à  $f_r$ . D'ailleurs lors du choix des filtres, très souvent plusieurs filtres résonants pour les rangs harmoniques inférieurs et un filtre amorti sont utilisés, tous montés en parallèle avec la charge polluante [16].

## II.4 Avantages et inconvénients des filtres passifs :

### a- Avantages des filtres passifs :

Le filtrage passif a déjà largement fait ses preuves dans le milieu industriel grâce à son coût faible, son efficacité et son adaptation pour des réseaux de forte puissance.

Les filtres amortis offrent plusieurs avantages :

- Leurs performances sont moins sensibles aux variations de température, aux déviations de fréquence, aux tolérances des composantes, etc.
- Ils présentent une faible valeur d'impédance pour une large gamme de fréquences harmoniques.
- L'usage de multiples filtres résonants peut provoquer des résonances parallèles entre les filtres et l'admittance du réseau. Dans ce cas, l'usage d'un ou de plusieurs filtres amortis est préférable[17].

### **b- Inconvénients des filtres passifs :**

- La présence sur un même réseau de deux filtres passifs accordés sur un rang théoriquement égal, mais en pratique légèrement différent, provoque entre eux la circulation de courants harmoniques très importants qui provoque rapidement leur destruction. Ce cas se rencontre facilement en raison du fait que la fréquence d'accord varie lentement avec le vieillissement des éléments du filtre. Il faut absolument éviter de raccorder des filtres harmoniques de même rang sur un même réseau.
- La mise en parallèle d'un filtre anti-harmonique et d'une batterie de condensateurs provoque une contrainte pouvant amener la destruction des condensateurs.
- Lorsqu'il y a plusieurs rangs harmoniques à filtrer, il est nécessaire de mettre autant de filtres accordés sur les rangs correspondants.
- 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, nécessaire à l'étude, lorsqu'il est de grande dimension.
- 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.
- Les variations de l'impédance du réseau peuvent détériorer les performances du filtre,

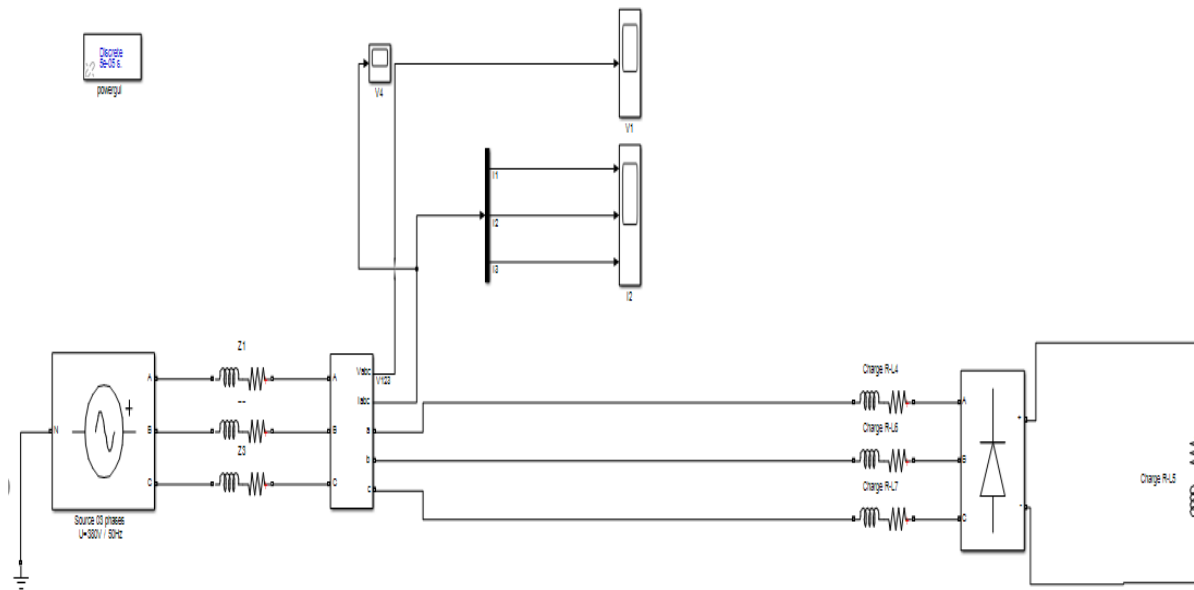
- Les filtres résonants présentent l'inconvénient d'être sensibles aux variations de l'inductance ou de la capacité ce qui entraîne un désaccord de l'ensemble [16].
- Les pertes dans la résistance sont généralement élevées.
- Le filtre de premier ordre n'est pas très utilisé, car il exige une grande capacité et présente une perte de puissance excessive à la fréquence fondamentale. Le filtre de second ordre fournit de meilleures performances de filtrage, mais avec des pertes plus élevées à la fréquence fondamentale que le filtre de troisième ordre [17].

### II.5 Simulation du filtre passif :

Les paramètres de simulation sont résumés au tableau suivant :

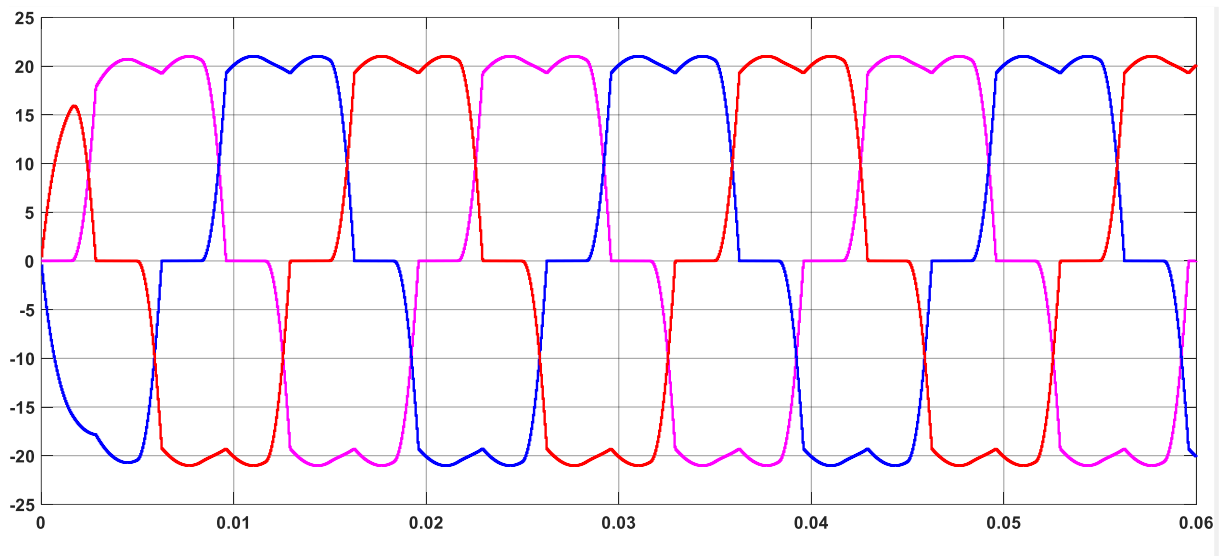
Tension de réseau	380 V
Fréquence de tension de réseau	50 Hz
Résistance de la ligne de réseau	0.42 $\Omega$
Inductance de la ligne de réseau	2.3 mH
Résistance côté continu de charge	23.5 $\Omega$
Inductance côté continu de charge	21.1 mH
Résistance côté alternative de charge	1 m $\Omega$
Inductance côté alternative de charge	1 mH
Résistance de filtre (filtrage de l'harmonique 5, 7)	0.1 $\Omega$
Inductance de filtre (filtrage de l'harmonique 5)	0.004 H
Inductance de filtre (filtrage de l'harmonique 7)	0.001 H
Condensateur de filtre (filtrage de l'harmonique 5)	101.32 $\mu$ F
Condensateur de filtre (filtrage de l'harmonique 7)	206.78 $\mu$ F

**Tableau -II.1** : Les paramètres de simulation.



**Figure -II.5 :** Schéma bloc avant le filtrage.

La figure II.6 montre les courants du réseau avant filtrage, et la figure II.7 montre leur THD. Ces courants sont déformés. Cette déformation est traduite par le THD (phase 1) qui est égale à 22.70 %.



**Figure-II.6 :** Les allures des courants de la source avant le filtrage.

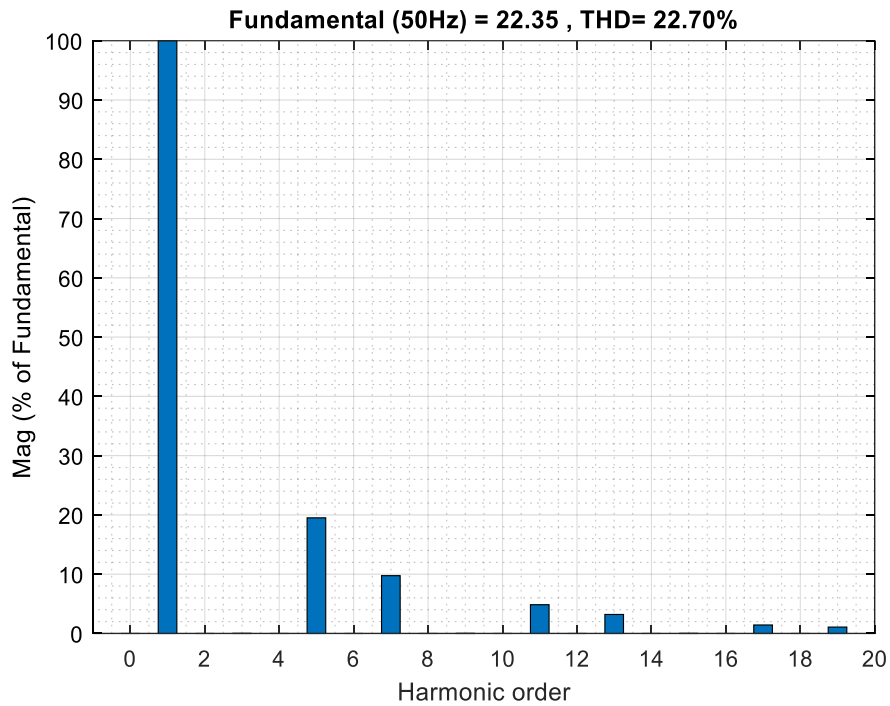


Figure-II.7 : Le spectre d'harmonique et Le THD de courant avant le filtrage.

a- Filtre résonant accordé sur le rang 5 :

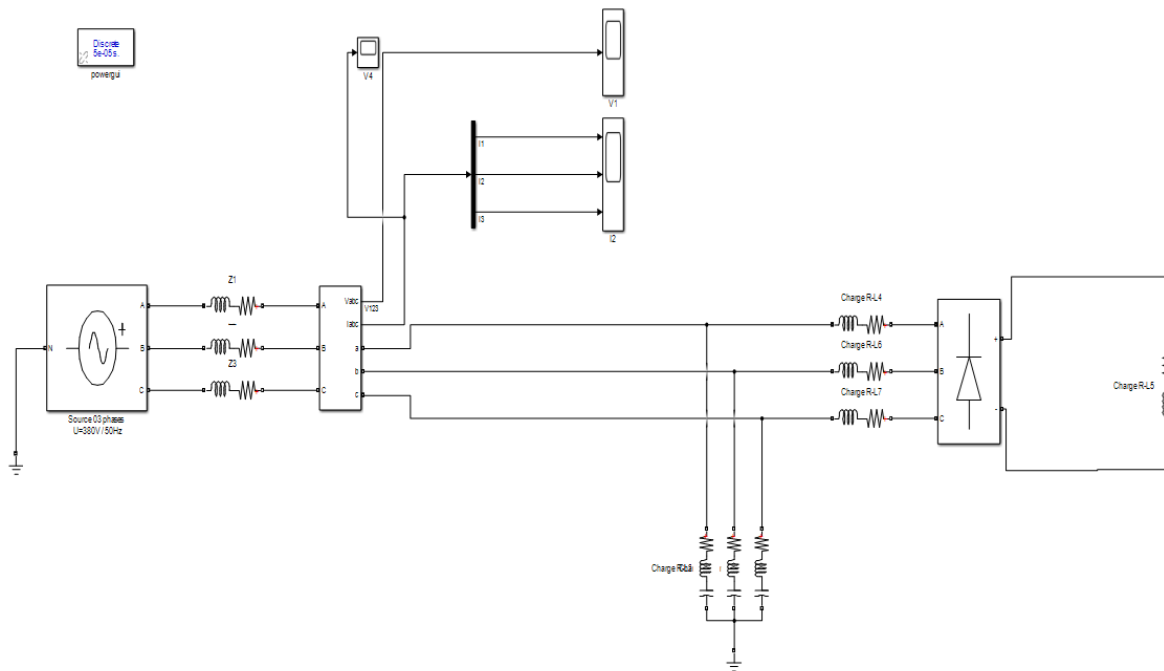


Figure -II.8 : Schéma du pont à diodes avec filtre résonnant accordé sur le rang 5.

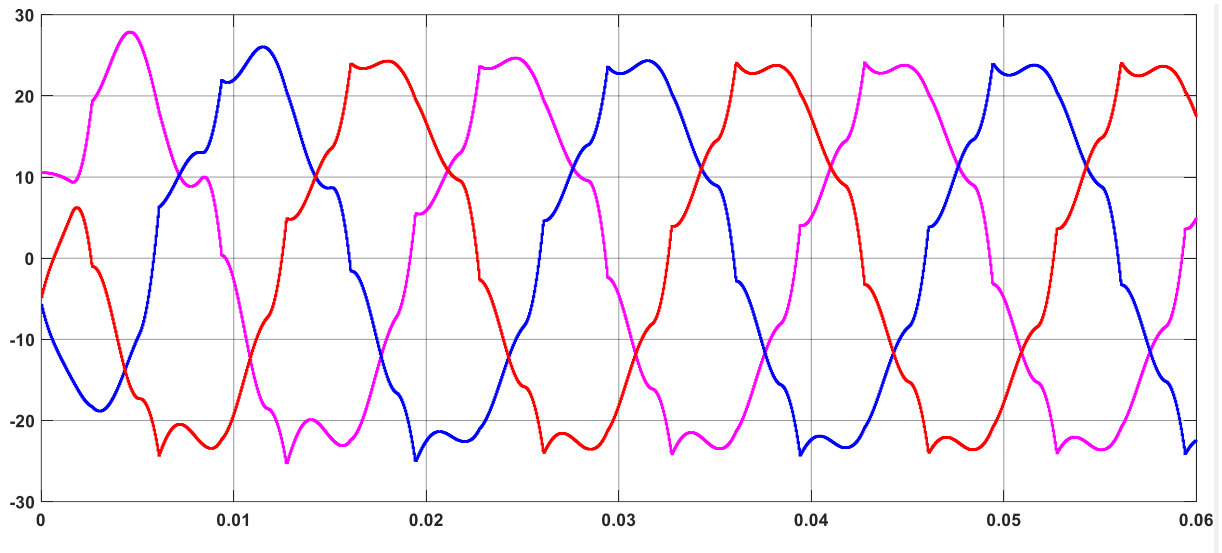


Figure -II.9 : Allures des courants de la source après le filtrage de l'harmonique 5.

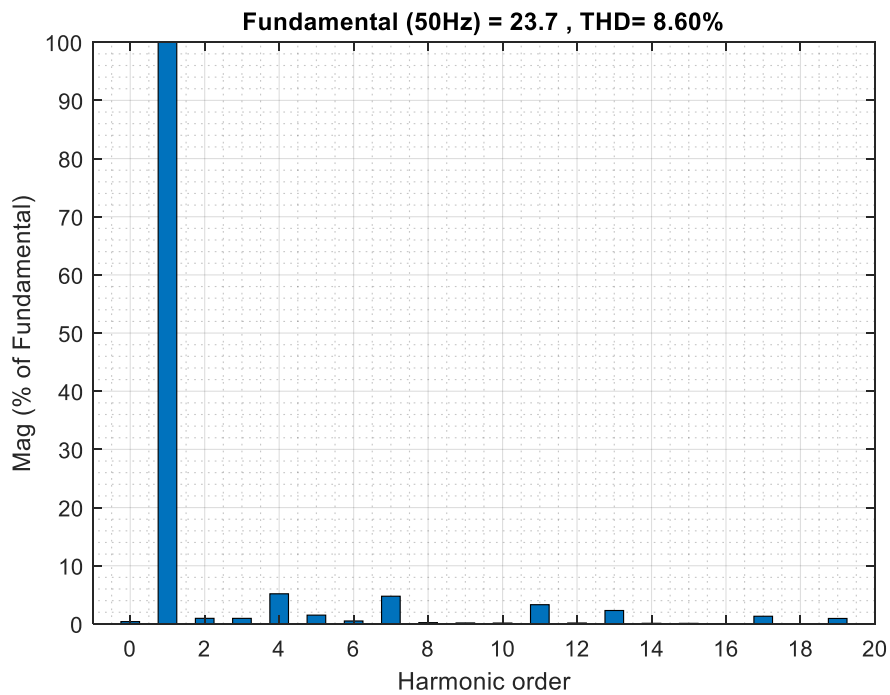


Figure -II.10 : le spectre d'harmonique après le filtrage de l'harmonique 5 et le THD de courant

**b- Filtre résonant accordé sur le rang 7**

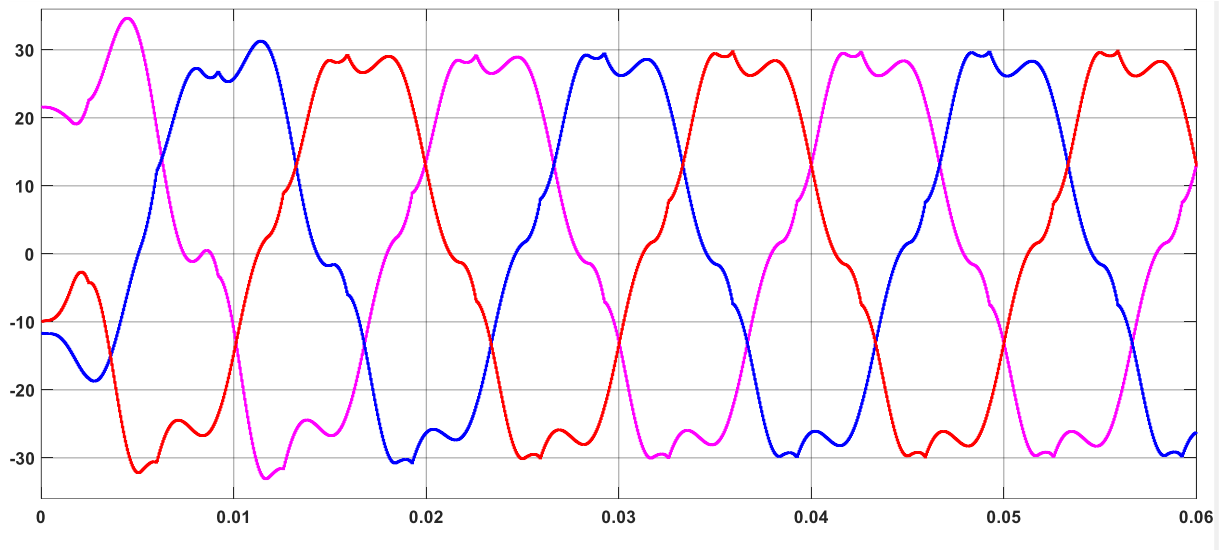


Figure -II.11 : Allures des courants de la source après le filtrage de l'harmonique 7

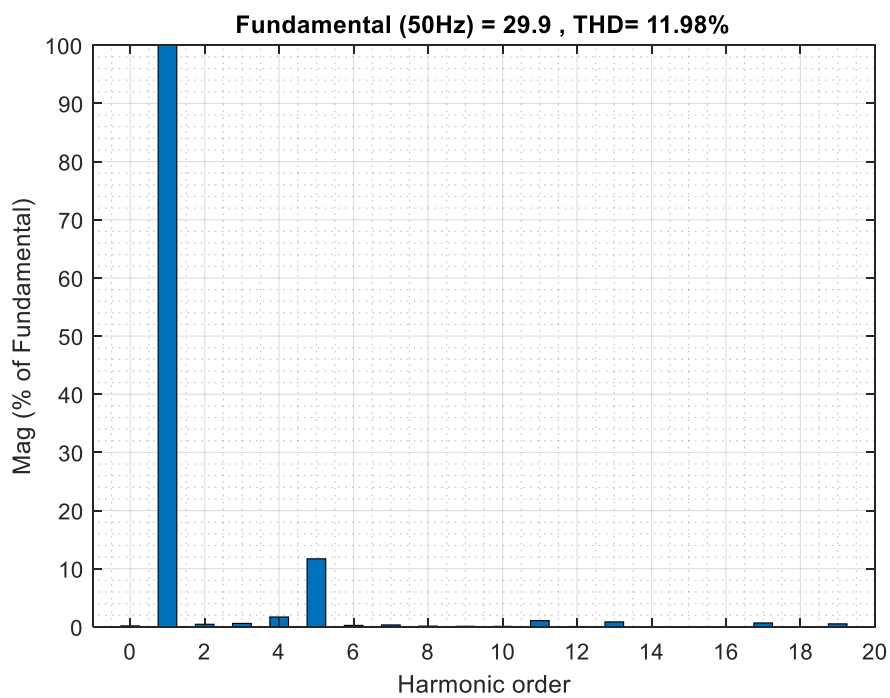


Figure -II.12 : Le spectre d'harmonique après le filtrage de l'harmonique 7 et le THD de courant

c- Filtre résonant accordé sur les rangs 5 et 7 :

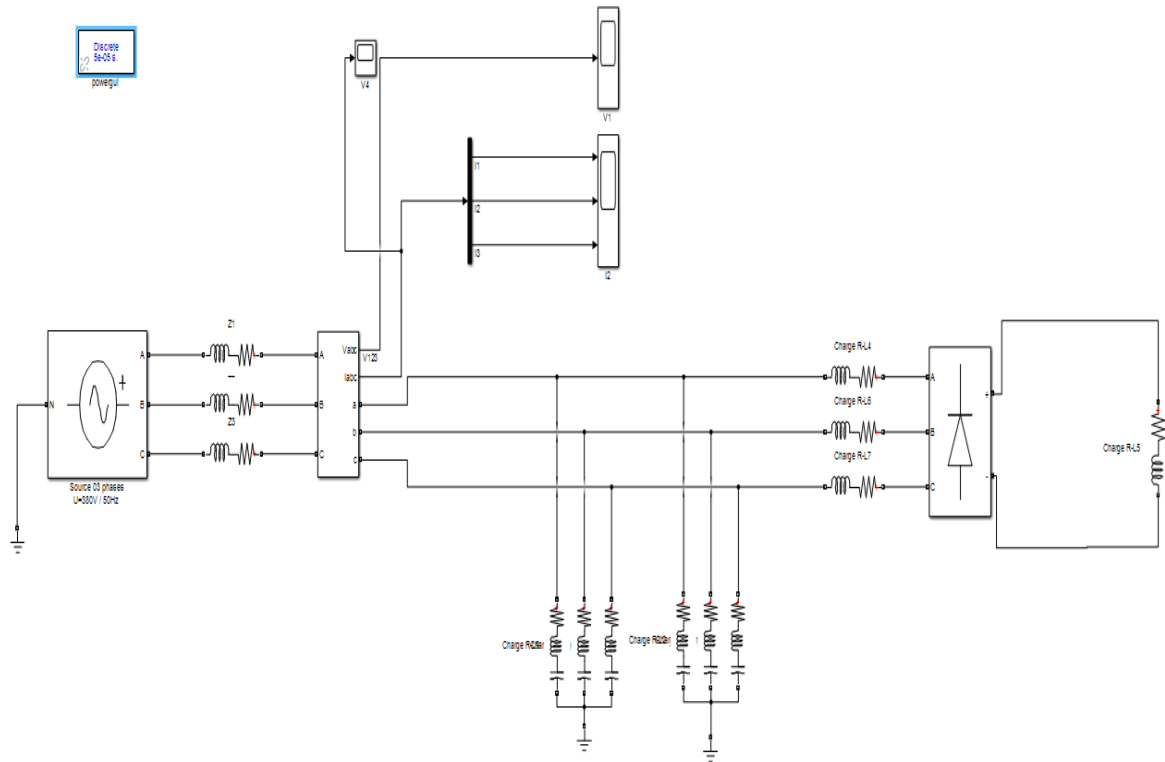


Figure -II.13 : Schéma du pont à diodes avec filtre résonnant accordé sur les rangs 5 et 7.

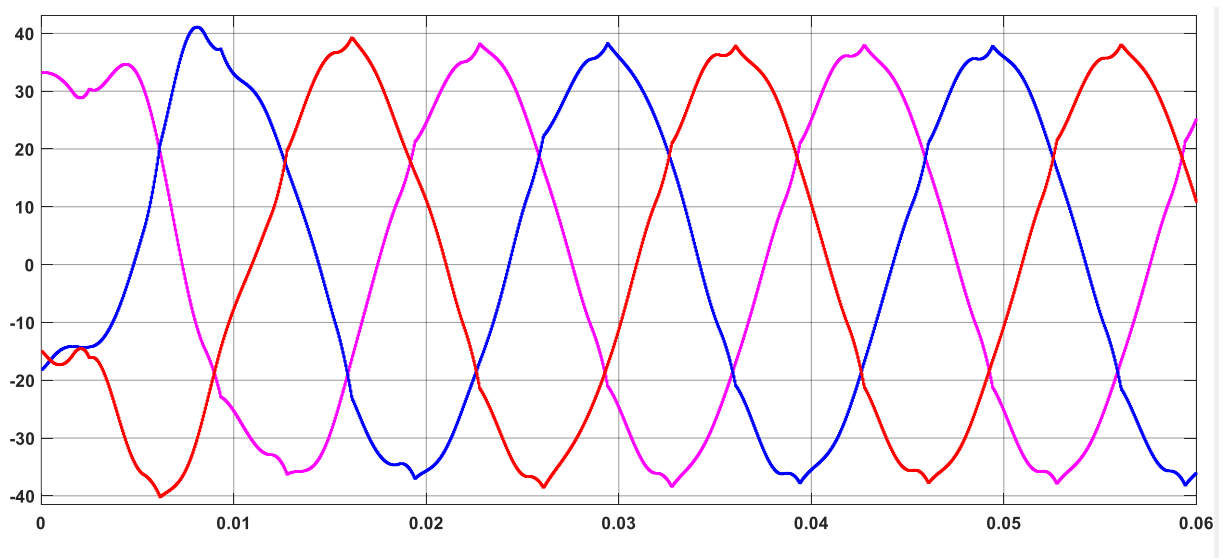
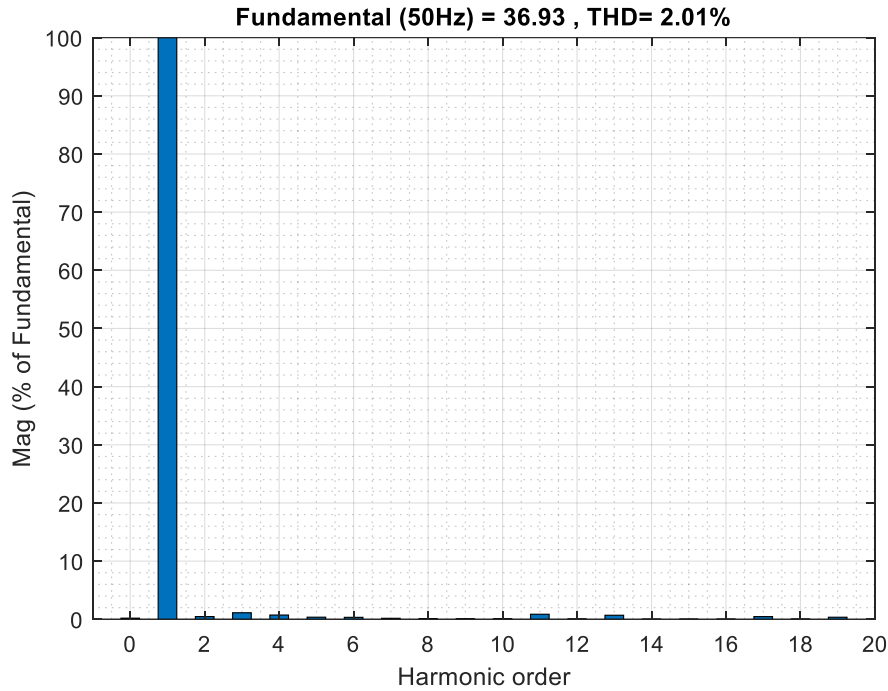


Figure -II.14 : Allures des courants de la source après le filtrage des harmoniques 5 et 7



**Figure -II.15 :** Le spectre d'harmonique après le filtrage des harmoniques 5 et 7

### II.6 Interprétation des résultats:

#### a- Avant le filtrage :

La figure (II.6) représente la forme d'onde des courants d'alimentation. On remarque une distorsion des courants ce qui rend la présence des harmoniques dans le réseau.

La figure (II.7) représente le spectre d'harmonique de courant avant le filtrage, on remarque la présence des harmoniques 5,7 et 11. Le redresseur absorbe donc un courant non sinusoïdal et se comporte comme une charge non linéaire. Le THD de courant du réseau avant le filtrage est 22.70%.

#### b- Après le filtrage :

##### - 1<sup>er</sup> cas : Filtre résonant accordé sur le rang 5 :

La figure (II.9) représente la forme d'onde des courants d'alimentation après le filtrage de l'harmonique 5, on remarque que les distorsions des courants sont plus atténuées que dans le cas des courants présentés dans la figure (II.6).

La figure (II.10) représente le spectre d'harmonique du courant après le filtrage de l'harmonique 5, on remarque la présence des harmoniques 7, et la minimisation de l'harmonique 5. Le THD de courant du réseau après le filtrage de l'harmonique 5 est  $THD = 8.60\%$ . Malgré l'amélioration du THD, sa valeur reste supérieure à la limite de 5 % fixée par la norme IEEE-519.

### - 2<sup>ème</sup> cas : Filtre résonant accordé sur le rang 7 :

La figure (II.11) représente la forme d'onde des courants d'alimentation après le filtrage de l'harmonique 7, on remarque que les distorsions des courants sont moins atténuées que dans le cas des courants présentés dans la figure (II.9).

La figure (II.12) représente le spectre d'harmonique de courant après le filtrage de l'harmonique 7, on remarque la présence des harmoniques 5,11 et la minimisation de l'harmonique 7. Le THD de courant du réseau est égale à 11.98%.

### - 3<sup>ème</sup> cas : Filtre résonant accordé sur les rangs 5 et 7 :

La figure (II.14) représente la forme d'onde des courants d'alimentation après le filtrage de l'harmonique 7 et 5, on remarque que les distorsions des courants sont plus atténuées que dans le cas des courants présentés dans les figures (II.6) et (II.9) et (11).

La figure (II.15) représente le spectre d'harmonique de courant après le filtrage des harmoniques 5 et 7, on remarque la minimisation des harmoniques 5 et 7. Le THD de courant du réseau après le filtrage des harmoniques 5 et 7,  $THD = 2.01\%$ . Cette amélioration a permis d'avoir un THD inférieur à la limite de 5 % fixée par la norme IEEE-519.

## II.7 Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre le filtrage passif et son principe de fonctionnement comme solution traditionnelle de dépollution des courants harmoniques. Les résultats de simulation montrent que le filtre résonant permet d'atténuer certains courants harmoniques mais pas tous les courants harmoniques. Les filtres passifs présentent un inconvénient majeur, celui des résonances qui est la principale cause de plusieurs désagréments.

Le chapitre suivant aborde la solution moderne de dépollution harmonique qui est le filtrage actif parallèle.

# **Chapitre III**

## **Filtre actif parallèle**

### III.1. Introduction :

Ce chapitre est réservé au filtrage actif parallèle. La structure d'un filtre actif parallèle est divisée en deux parties, la partie puissance et la partie contrôle-commande. La partie puissance comprend les trois principaux blocs de cette structure. L'onduleur de tension est un élément fondamental de ce filtre, l'élément de stockage d'énergie et le filtre de sortie. Dans la partie contrôle-commande, on a l'identification des courants perturbateurs et la régulation de la tension de l'élément de stockage d'énergie.

Dans ce chapitre nous allons présenter les solutions de dépollution modernes, le principe de filtrage actif parallèle, les différents éléments d'un filtre actif parallèle. Enfin les résultats des simulations de ce filtre vont être présentés et interprétés.

### III.2. Principe de filtrage actif parallèle :

Le filtre actif parallèle (FAP) est un onduleur de tension (ou de courant) qui se connecte en parallèle avec le réseau et injecte en temps réel les composantes harmoniques des courants  $i_f$  absorbés par les charges non linéaires connectées au réseau. Ainsi, le courant fourni par la source d'énergie devient sinusoïdal. Le principe de base du FAP est montré sur la figure III.1.

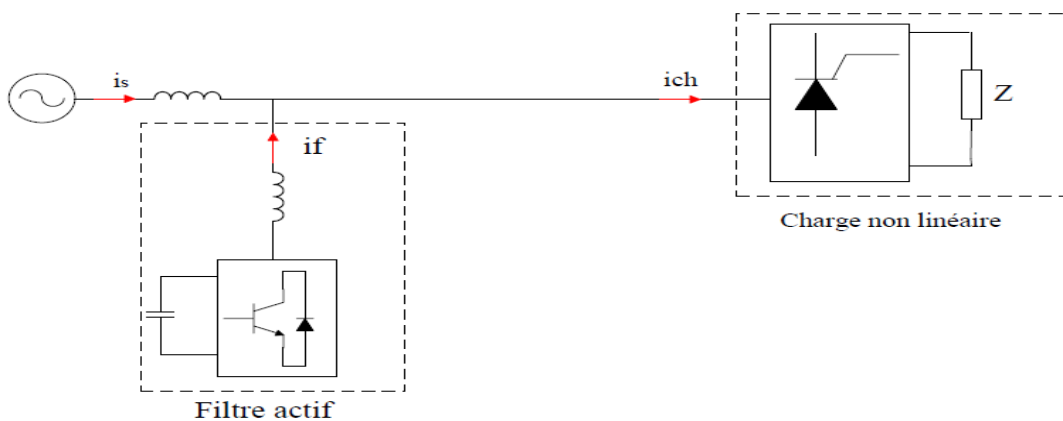


Figure III.1. Schéma de principe du filtrage actif.

### III.3. Différents types du filtre actif parallèle :

Ces filtres sont proposés comme des solutions modernes et efficaces de dépollution des réseaux électriques afin de traiter les inconvénients inhérents aux solutions traditionnelles comme les filtres passifs. Parmi toutes les solutions modernes. Les filtres actifs peuvent être monophasés, triphasés à trois fils ou triphasé à quatre fils. Ils peuvent aussi être hybrides (passif + actif). On trouve aussi les configurations associant les filtres parallèles avec des filtres série.

Deux raisons principales ont conduit à concevoir les nouvelles structures de filtrage moderne. La première raison est due aux inconvénients inhérents des solutions traditionnelles de dépollution qui ne répondent plus à l'évolution des charges et des réseaux électriques.

En effet, les méthodes dites "*classiques*" de filtrage ou de dépollution des réseaux électriques présentent un certain nombre d'inconvénients. Le plus important d'entre eux est sans doute le fait d'être sensible aux évolutions de l'environnement. Ils voient leur efficacité baisser avec les variations des perturbations (variation des fréquences et des amplitudes des harmoniques).

La seconde raison fait suite à l'apparition de nouveaux composants à commutation forcée, comme les transistors bipolaires, les thyristors GTO et les transistors IGBT qui ont permis de réaliser de nouvelles structures qui permettent le contrôle de la forme d'onde de la phase du courant d'entrée.

### III.4. Structure du filtre actif parallèle :

La structure générale du filtre actif parallèle est présentée dans la figure (III.2) sous la forme de deux blocs : la partie puissance et la partie contrôle-commande.

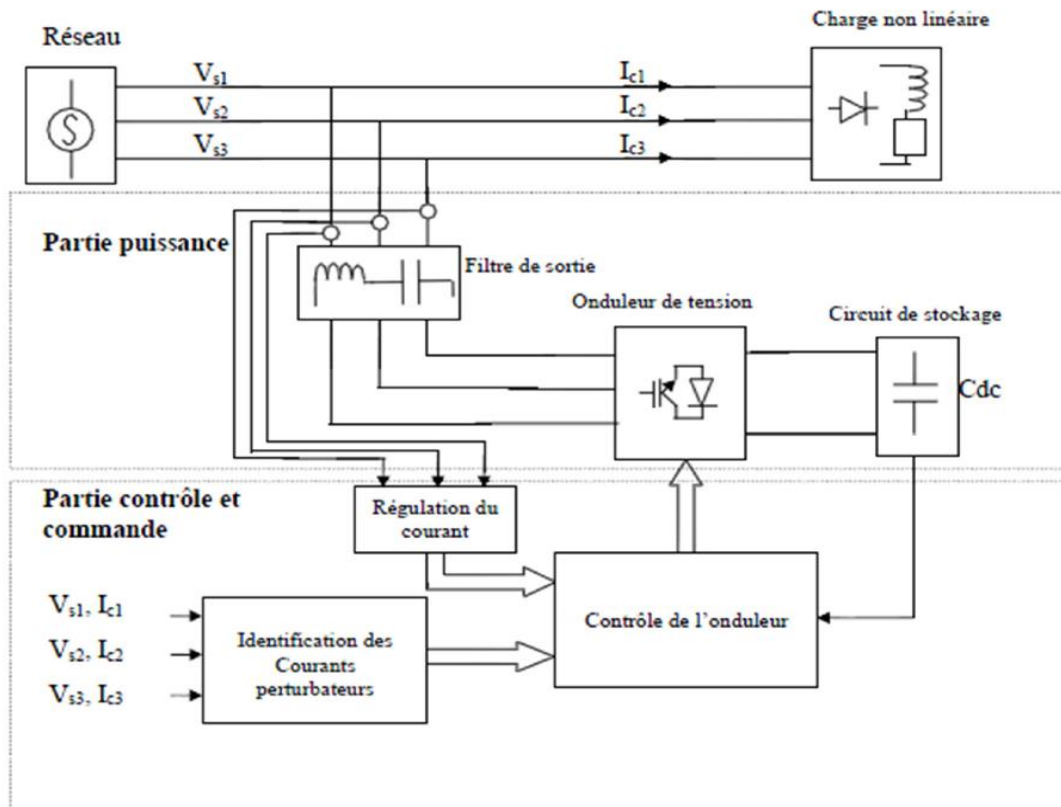


Figure. III.2. Structure générale du filtre actif parallèle. [18]

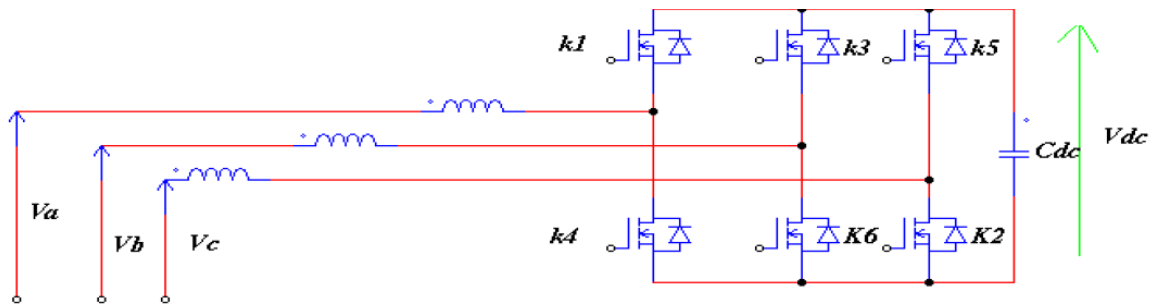
La partie puissance est constituée :

- D'un onduleur à base d'interrupteurs de puissance, commandable à l'amorçage et au blocage (GTO, IGBT, etc ...) avec des diodes antiparallèles.
- D'un circuit de stockage d'énergie : Le stockage de l'énergie peut être par une source de tension continue  $V_{dc}$ , ou par un condensateur  $C_{dc}$  qui joue le rôle d'une source de tension continue  $V_{dc}$ . Le choix des paramètres ( $V_{dc}$  et  $C_{dc}$ ) s'effectue sur la dynamique et sur la qualité de compensation du filtre actif parallèle.
- D'un filtre de sortie : Le filtre de sortie est un filtre passif utilisé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique, et pour satisfaire les deux critères suivants :
  - assurer une bonne dynamique du courant ;
  - empêcher les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau électrique.

**a- Onduleur de tension :**

On appelle onduleur de tension, un onduleur alimenté par une source de tension continue, c'est à dire par une source d'impédance interne négligeable; sa tension  $V_{dc}$  n'est pas affectée par la variation du courant  $i$  qui la traverse. La source continue impose la tension à l'entrée de l'onduleur et donc à sa sortie.

On peut obtenir la tension triphasée en groupant trois demis ponts monophasés, la figure (III-3) représente un onduleur triphasé de tension. Il se compose de trois bras à interrupteurs réversibles en courant, commandés à la fermeture et à l'ouverture, réalisés à partir d'un transistor et d'une diode en antiparallèle [18;19].



**Figure III-3 :** Structure d'un onduleur de tension triphasé. [20]

**b- Filtre de couplage**

Le filtre entre l'onduleur et le réseau est appelé filtre de couplage, c'est un filtre passif de premier ordre qui est en réalité une simple inductance avec une résistance interne mais avec des spécificités au niveau de son circuit magnétique (introduction de noyaux en ferrites). Il a deux objectifs, le premier est de générer des courants harmoniques à partir de la différence des tensions entre la sortie du pont onduleur et le réseau [4]. A ce titre, l'inductance  $L_f$  intervient dans la commandabilité du courant du filtre. Le deuxième est de réduire au point de raccordement au réseau (PCC), l'amplitude des créneaux de tension générés. Ce filtre passif est dimensionné pour satisfaire les deux critères suivants :

- Assurer la dynamique du courant du filtre défini par :

$$- \frac{di_f}{dt} = \frac{di_h}{dt} \text{ (III.1)}$$

Où  $i_f$ : Courant du filtre

$i_h$ : Courant harmonique de la charge

- Empêcher les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau électrique [4].

Une petite valeur de l'inductance du filtre passif assure la dynamique du courant. Contrairement, une valeur relativement grande de celle-là empêche les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau. Une étude comparative entre 5 approches qui permettent de trouver la valeur de  $L_f$  est faite dans [4].

#### c- Source de tension continue :

Une tension continue est une tension qui ne varie pas au cours du temps. Par exemple, un générateur de tension continue qui délivre une tension continue  $U = 1,5 \text{ V}$  signifie que la tension  $U$  ne change pas au cours du temps.

La régulation de la tension continue aux bornes du condensateur est nécessaire, car elle permet de maintenir cette tension à un niveau relativement constant tout en assurant une compensation des pertes dans le filtre actif et limiter ses variations en régime dynamique afin de ne pas détériorer les performances du filtre actif [21].

### III.5. Commande du filtre actif parallèle :

La partie contrôle-commande est constituée de:

- Bloc d'identification des courants perturbateurs. La méthode d'identification utilisée dans ce travail est celle des puissances instantanées.
- Bloc de régulation de la tension du bus continu de l'onduleur. Dans ce travail un régulateur proportionnel intégrale PI est utilisé.
- Commande de l'onduleur de tension : le but de la commande de l'onduleur est le contrôle des courants à la sortie du filtre afin qu'ils suivent leurs références. Le principe est basé sur la comparaison entre les courants de sortie du filtre et leurs références identifiées à partir des différentes méthodes d'identification. La méthode utilisée dans ce travail est la commande par hystérésis.

#### a- identification des courants harmonique :

Plusieurs méthodes d'identification des courants perturbés, ont été développées afin d'améliorer les performances des systèmes de dépollution classique des installations électriques. En général l'identification des composantes harmoniques se fait soit dans l'espace des courants, soit dans l'espace des puissances. [18, 23, 22]

La transformation de fourrier directe est l'une des méthodes les plus anciennes, mais qui nécessite une grande puissance de calcul, afin de réaliser toutes les transformations en temps réel. Pour cela, cette méthode est adaptée aux récepteurs ou les composantes harmoniques évoluent d'une manière lente, elle a pour avantage la capacité de cibler un par un les courants harmoniques qui parcourent le système, par conséquent la possibilité de compenser les composantes les plus prépondérantes.

Deux autres méthodes sont utilisées en temps réel, et qui se basent sur le filtrage des signaux. La première est la méthode des puissances instantanées. L'autre est celle de détection synchrone.

Les deux méthodes sont fondées sur le principe de la séparation du fondamental des harmoniques par filtrage.

- **Méthode des courants :**

Le principe de cette méthode est d'identifier les courants harmoniques à partir du courant total et forcer l'onduleur à injecter des courants harmoniques inverses dans le réseau, ce qui permet d'éliminer ces harmoniques.

On capte le courant de charge polluante, ce courant est filtré par un filtre passe bande du deuxième ordre, ce qui permet d'éliminer la composante harmonique et ne laisse passer que la composante fondamentale. Le courant total moins la composante fondamentale donne le courant harmonique. L'Algorithme de la méthode des courants est le suivant détaillé dans ce qui suit.

Le courant absorbé par la charge est composé de la composante fondamentale et des composantes harmoniques à fréquence multiple de la fréquence fondamentale. [24]

$$i_{ch} = i_{ch1} + \sum_{i=2}^{\infty} i_h \quad (III.2)$$

Avec :

$i_{ch}$ : le courant total de la charge.

$i_{ch1}$  : le courant fondamental absorbé par la charge.

$i_h$ : le courant harmonique absorbé par la charge.

Le filtre passe bande du deuxième ordre a pour but d'extraire la composante fondamentale du courant. La fréquence centrale est choisie égale à la fréquence fondamentale ( $f_c=50\text{Hz}$ ). Cette méthode est caractérisée par la simplicité.

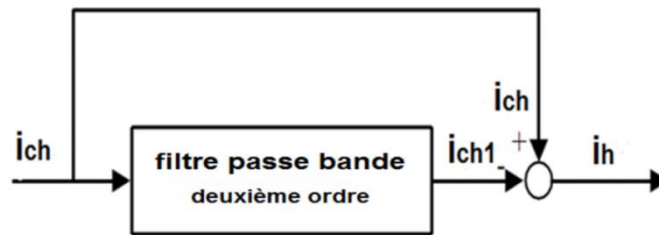


Figure III.4 : Schéma de principe d'identification des courants harmoniques. [25]

- **Méthodes des puissances instantanées :**

La méthode des puissances instantanées n'est applicable que si la tension du réseau est parfaitement sinusoïdale et équilibrée.

Cette méthode exploite la transformation  $\alpha$ - $\beta$  pour obtenir les puissances réelles et imaginaires. Notons par  $(V_\alpha, V_\beta)$  et  $(I_\alpha, I_\beta)$  les composantes orthogonales du repère  $\alpha$ - $\beta$  associées respectivement aux tensions de raccordement du filtre actif parallèle ( $V_s$ ) et aux courants absorbés par les charges polluantes ( $I_s$ ). La transformation  $\alpha$ - $\beta$ -0 triphasée permet d'écrire la relation des tensions suivante [27].

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a1} \\ V_{b2} \\ V_{c3} \end{bmatrix} \quad (III.3)$$

Et la relation des courants ci-dessous

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{a1} \\ i_{b2} \\ i_{c3} \end{bmatrix} \quad (III.4)$$

Les composantes avec l'indice (0) représentent les séquences homopolaires du système triphasé du courant et de tension. La puissance active instantanée, notée  $P(t)$ , est définie par la relation suivante :

$$\begin{cases} P(t) = V_{a1}I_{a1} + V_{b2}I_{b2} + V_{c3}I_{c3} = P(t) + P_{0(t)} \\ P(t) = V_\alpha I_\alpha + V_\beta I_\beta \\ P_{0(t)} = V_0 I_0 \end{cases} \quad (III.5)$$

$P(t)$  : la puissance réelle instantanée.

$P_0(t)$  : la puissance homopolaire instantanée

L'avantage de la transformation  $\alpha$ - $\beta$ -0 est la séparation des séquences homopolaires du système triphasé de courant ou de tension. De la même manière, la puissance imaginaire instantanée peut s'écrire sous la forme suivant :

$$q(t) = 1/\sqrt{3} [(V_{a1} - V_{b2})I_{c3} + (V_{b2} - V_{c3})I_{a1} + (V_{c3} - V_{a1})I_{b2}] = V_\alpha I_\beta - V_\beta I_\alpha \quad (III.6)$$

La puissance  $q$  a une signification plus large que la puissance réactive habituelle. En effet, contrairement à la puissance réactive, qui ne considère que la fréquence fondamentale, la puissance imaginaire prend en compte toutes les composantes harmoniques de courant et de tension. C'est pourquoi on lui donne une autre dénomination (puissance imaginaire) avec comme unité le voltampère imaginaire (VAI).

Nous avons la relation matricielle suivante:

$$\begin{bmatrix} P \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (III.7)$$

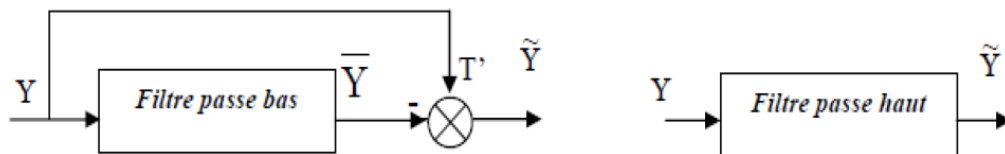
Dans le cas général, chacune des puissances  $p$  et  $q$  comporte une partie continue et une partie alternative, ce qui nous permet d'écrire l'expression ci-dessous [26] :

$$\begin{cases} P = \bar{p} + \check{p} \\ q = \bar{q} + \check{q} \end{cases} \text{ (III. 8)}$$

- $P^-$  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.
- $\check{P}$  et  $\check{q}$  des puissances alternatives liées à la somme des composantes perturbatrices du courant et de la tension. [26]

**- Séparation des puissances perturbatrices :**

Après avoir identifié les pulsations des puissances instantanées, le filtre de puissance chargé d'isoler les puissances active et réactive conventionnelles peut être dimensionné. Pour avoir la composante alternative, on utilise un filtre passe haut[26].



**Figure III. 5** schéma représentant le principe de séparation ( $Y=p$  ou  $q$ )

**- Calcul des courants perturbateurs :**

En inversant la relation (III.9), nous pouvons recalculer les courants dans le repère ( $\alpha$ - $\beta$ ) comme le montre l'équation (III.7)[27].

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{S\alpha}^2 + V_{S\beta}^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ q \end{bmatrix} \text{ (III. 9)}$$

En considérant les équations (III.9) 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[26] :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ Q \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (III. 10)$$

Courant actif                  courant réactif                  courants harmoniques

Avec  $\Delta = V_\alpha^2 + V_\beta^2$ , supposé constant dans l'hypothèse d'une tension sinusoïdale équilibrée du réseau électrique.

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. On appliquant la transformation inverse de Concordia on trouve les courants produits par charge non linéaire comme suit [27] :

$$\begin{bmatrix} i_{1h} \\ i_{2h} \\ i_{3h} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} i_{\alpha h} \\ i_{\beta h} \end{bmatrix} \quad (III. 11)$$

On trouve la relation globale des courants harmoniques

$$\begin{bmatrix} i_{1h} \\ i_{2h} \\ i_{3h} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (III. 12)$$

Le schéma de la figure (III.6) illustre les différentes étapes permettant l'obtention des composantes harmoniques du courant d'une charge non linéaire.

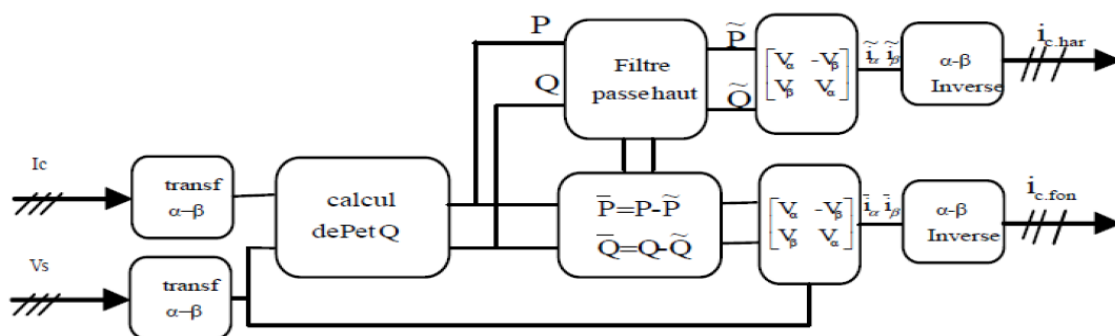


Figure III. 6 Algorithme d'identification des harmoniques

**b- Contrôle de l'onduleur par hystérésis :**

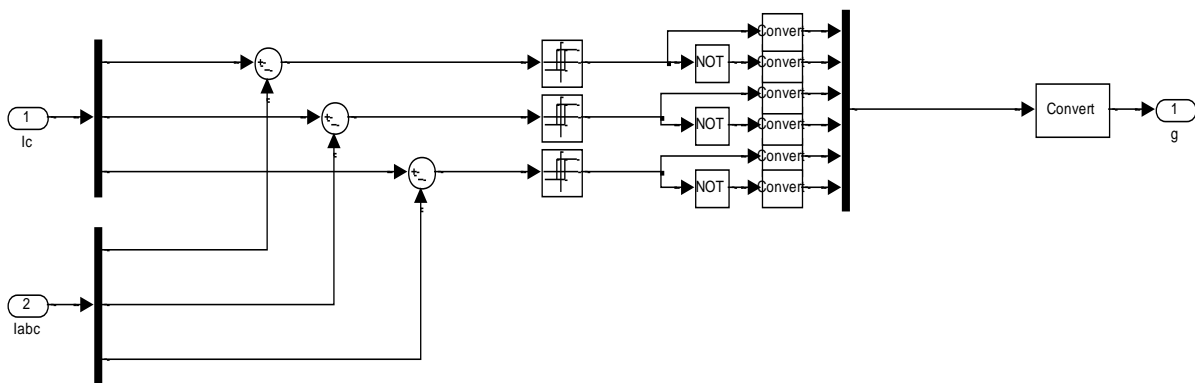
Ils existent plusieurs méthodes de commande, les deux principales familles de commande sont :

- commande par hystérésis,
- la commande par modulation de largeur d'impulsions (MLI).

La commande conventionnelle par hystérésis, qui sera utilisée dans ce travail, 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.

La figure (III.7) expose son principe qui consiste à établir dans un premier temps le signal d'erreur, différence entre le courant de référence  $i_f^*$  et le courant produit par l'onduleur  $i_f$ .

Cette erreur est ensuite comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis afin de fixer les ordres de commande des interrupteurs. Cette commande présente cependant un inconvénient majeur : elle ne permet pas de contrôler la fréquence de commutation des semi-conducteurs, d'où la présence d'un nombre important d'harmoniques dans les courants générés [28].



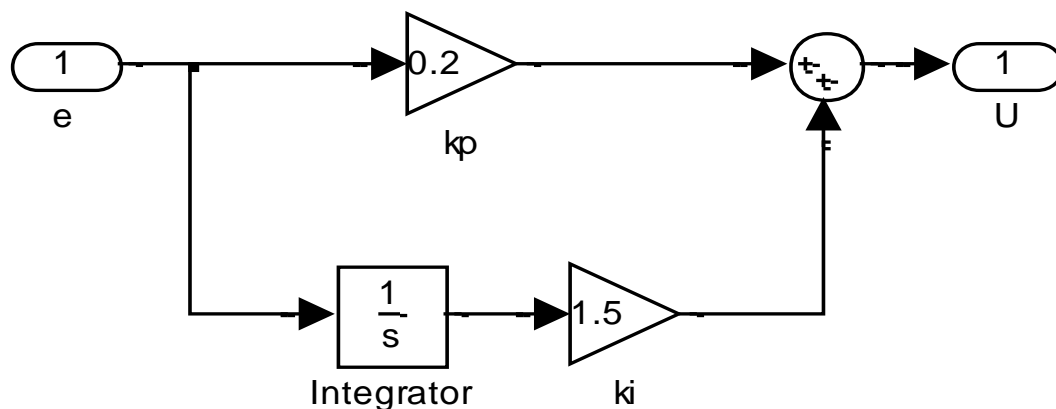
**Figure III.7** – Commande par hystérésis sous Matlab- Simulink.

#### d- Régulation de la tension du bus continu:

La tension aux bornes du condensateur doit être maintenue à une valeur fixe. Les éléments à l'origine de la variation de la tension moyenne  $V_{dc}$  aux bornes du condensateur sont les suivants [29] :

- Les pertes statiques et dynamiques dans les semi-conducteurs de puissance de l'onduleur.
- Les pertes dans les inductances de couplage  $L_f$  et  $R_f$
- L'injection des courants fondamentaux pendant les régimes transitoires de la charge polluante.

Pour maintenir la tension  $V_{dc}$  constante, nous ajoutons à la puissance réelle instantanée une consigne de puissance active. Pour cela, un régulateur PI est choisi pour garder la tension aux bornes du condensateur  $C_{dc}$  constante avec une faible fluctuation



**Figure III.8** -Schéma de la Régulation de la tension du bus continu du filtre actif parallèle.

### III.6. Résultats de simulation :

Tension de réseau	380V
Fréquence de tension de réseau	50Hz
Résistance de la ligne de réseau	0.42 $\Omega$
Inductance de la ligne de réseau	2.3 mH
Résistance côté continu de charge	23.5 $\Omega$
Inductance côté continu de charge	21.1 mH
Résistance côté alternative de charge	1 m $\Omega$
Inductance côté alternative de charge	1 mH
Inductance de filtre	3 mH
La Tension $V_{dc}$	600V

Tableau -III.1 : Les paramètres de simulation.

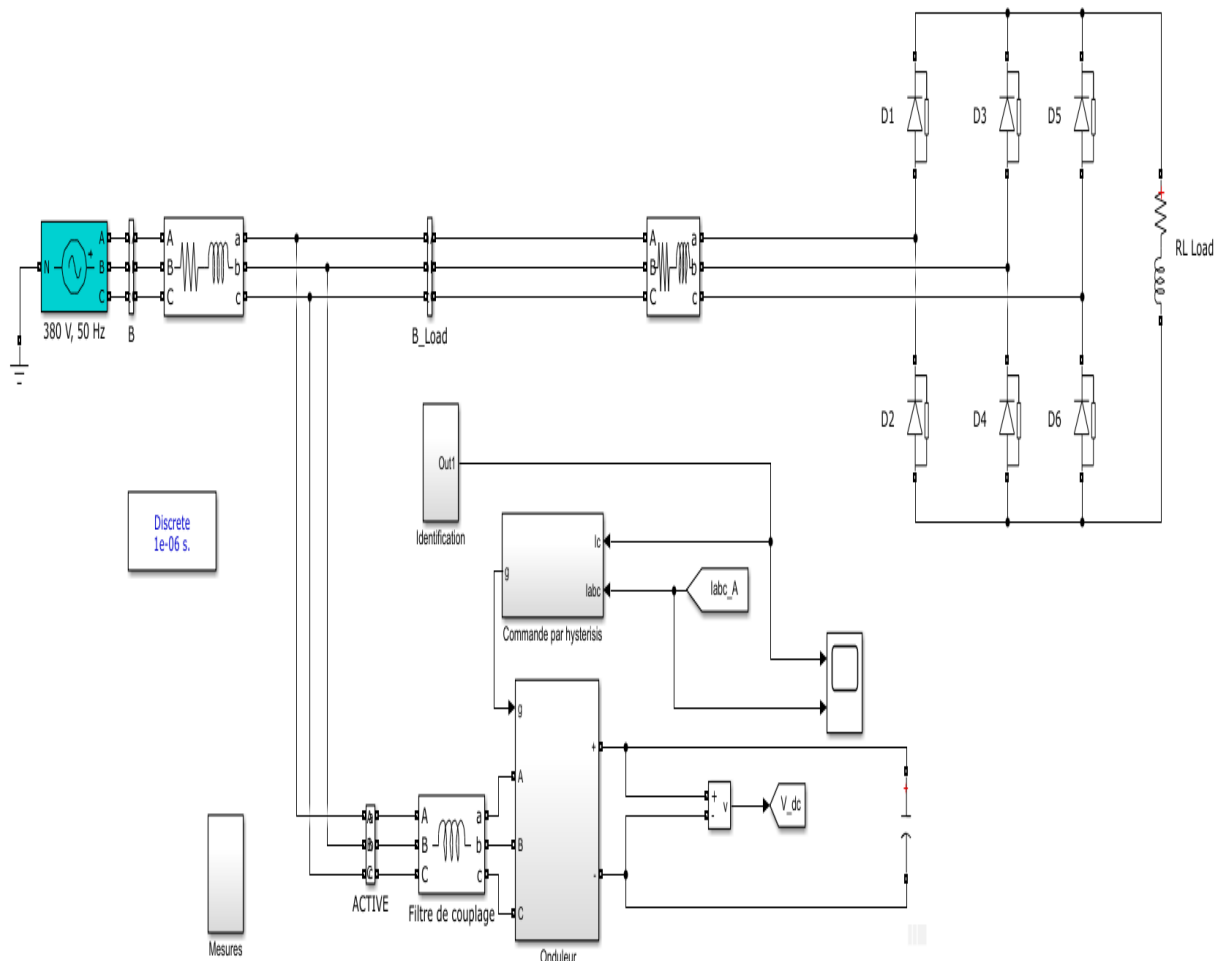


Figure (III. 9) schéma bloc du filtre actif parallèle commandé par hystérésis.

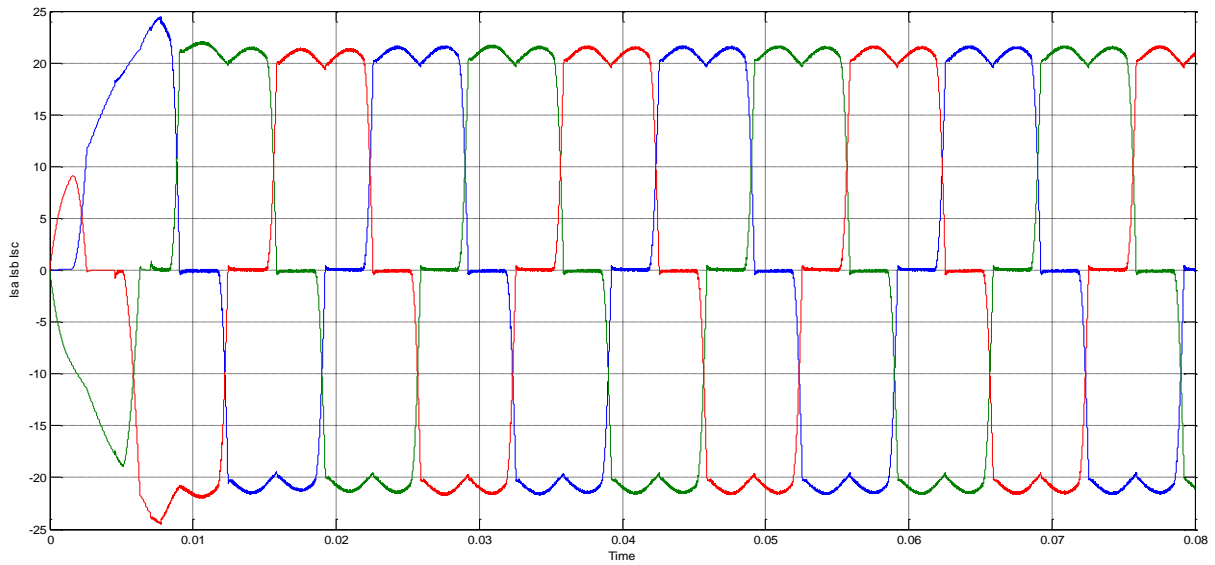


Figure (III.10) Allure du courant du côté de la charge.

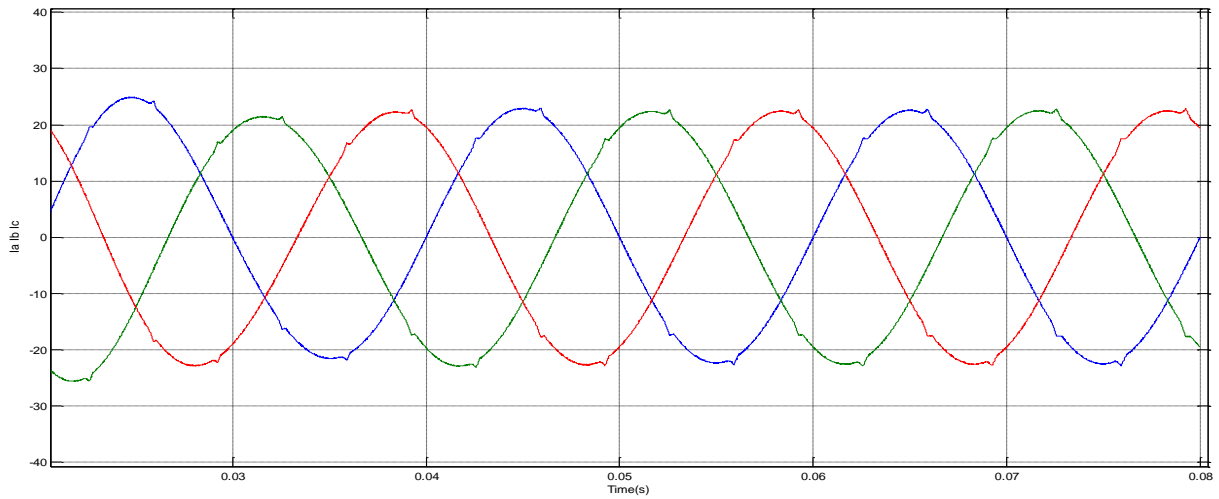


Figure (III.11) Allures des courants de la source après compensation.

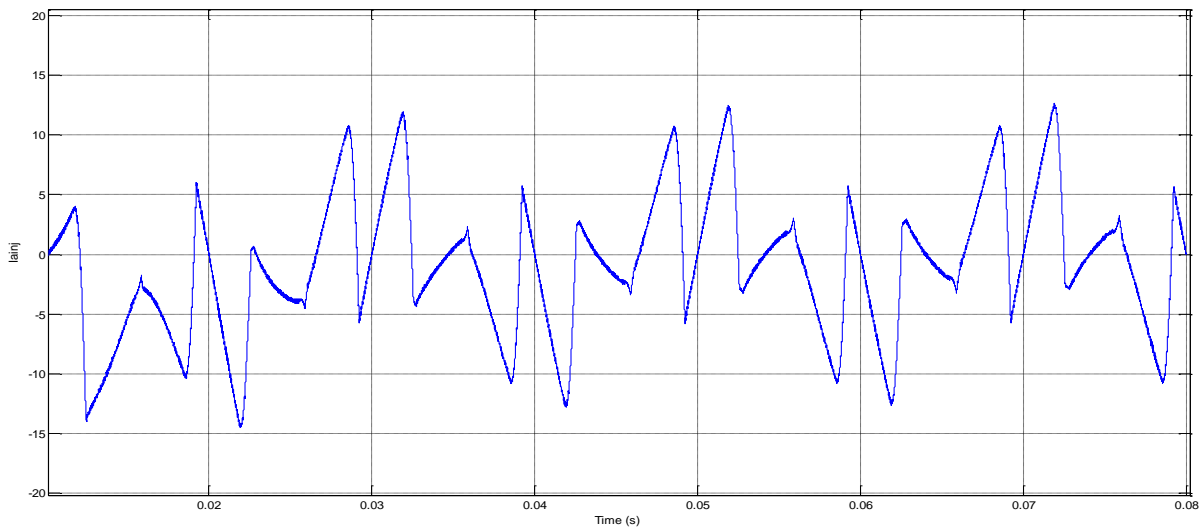


Figure (III.12) Allure du courant injecté par le filtre actif.

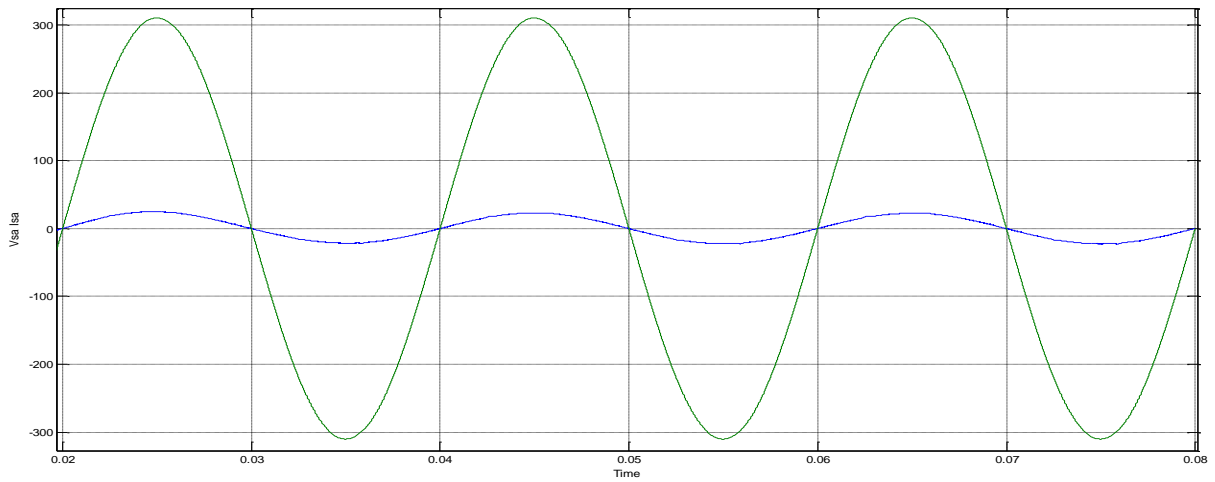


Figure (III.13) Allures du courant et de la tension de la source.

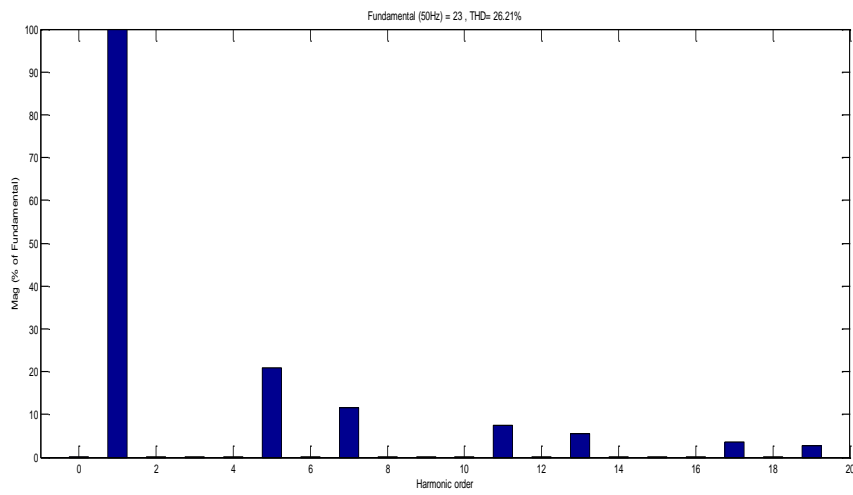


Figure -III.14 : le THD de courant de la source avant compensation.

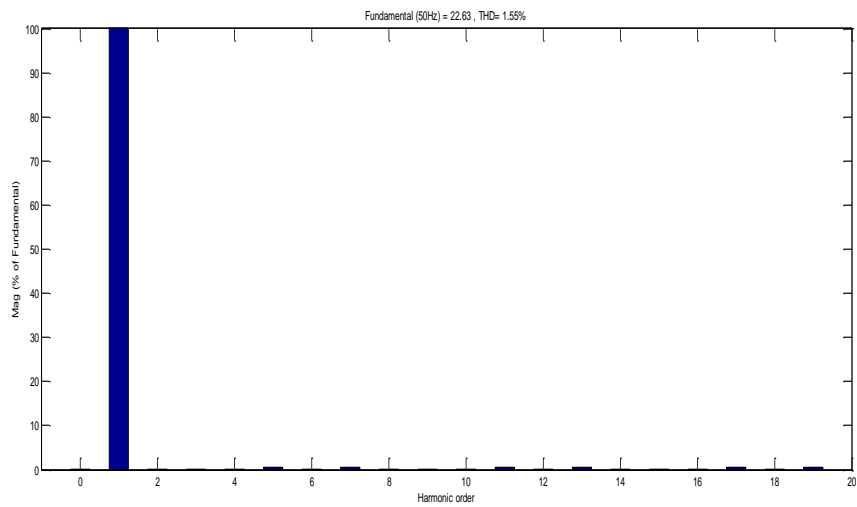


Figure -III.15 : le THD de courant de la source après compensation.

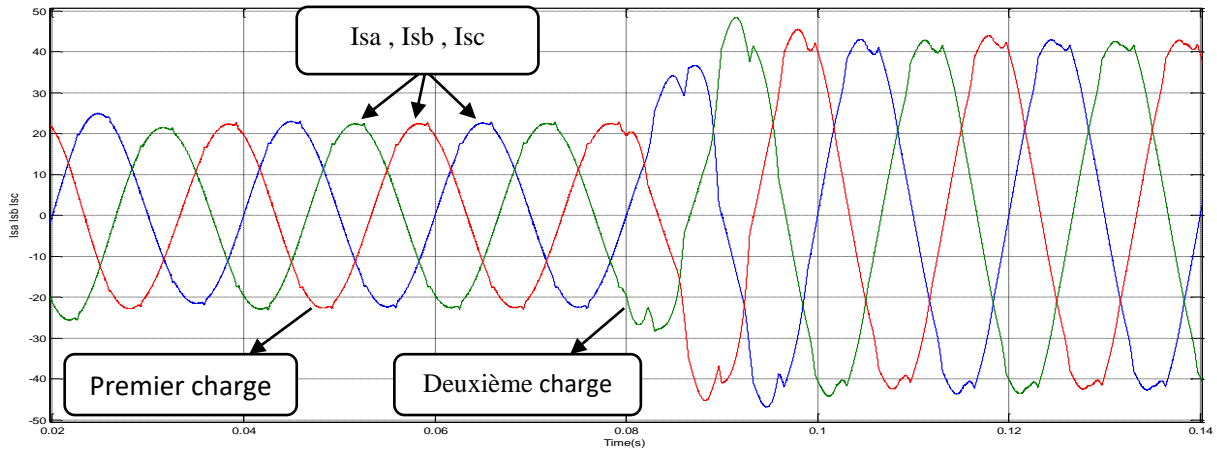


Figure -III.16 : Allures des courants de la source avec la variation de charge.

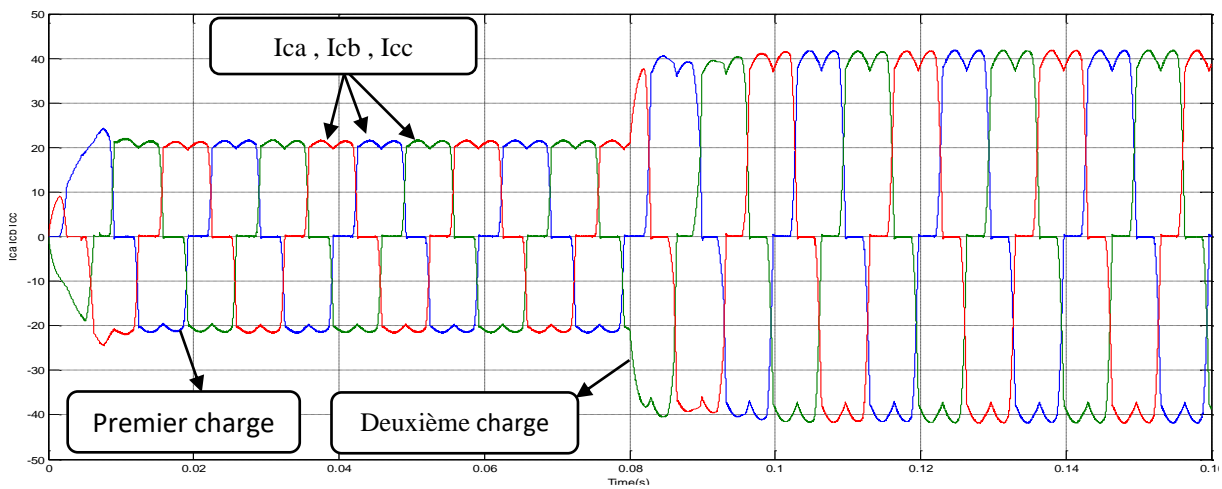


Figure -III.17 : Allure du courant de la charge avec la variation de charge.

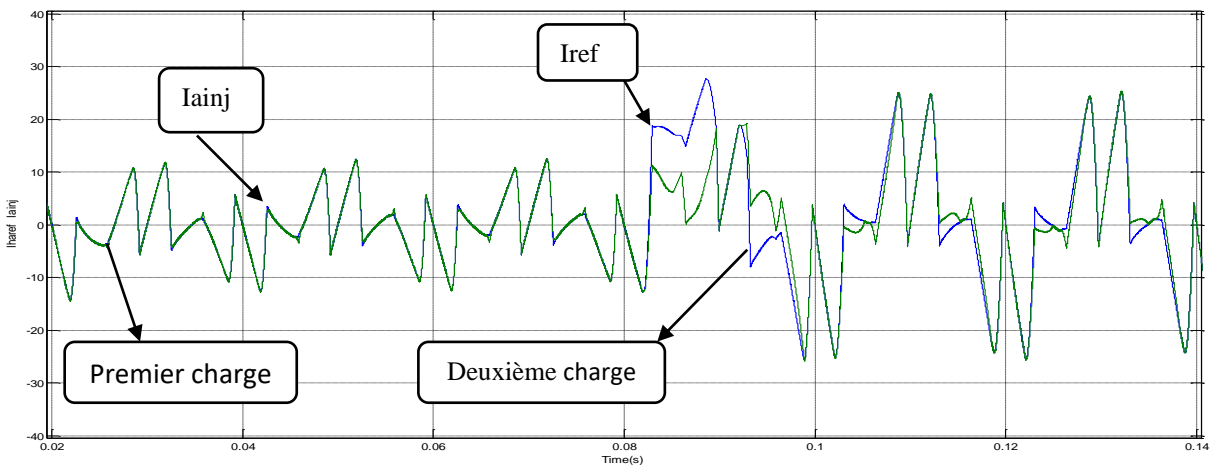


Figure -III.18 Allures du courant harmonique de référence  $I_{ah-ref}$  et  $I_{ainj}$  le courant injecté par le filtre actif avec la variation de charge.

### III-7- Interprétation des résultats :

La figure (III.10) représente la forme Allure du courant du côté de la charge. On remarque une distorsion des courants ce qui rend la présence des harmoniques dans le réseau.

La figure (III.11) représente les allures des courants de la source. Dans ce cas, on remarque que le courant est de forme sinusoïdale avec des harmoniques à haute fréquence dus au contrôle du courant par hystérésis.

La figure (III.12) représente allure du courant harmonique  $I_{ainj}$  injecté par le filtre actif.

La figure (III.13) représente l'allure du courant et de la tension de la source dans le cas où l'onduleur est commandé par hystérésis. On constate aussi que le courant est pratiquement en phase avec la tension, Ce qui minimise la consommation de l'énergie réactive.

La figure (III.14) représente le spectre d'harmonique de courant avant le filtrage, Le THD de courant du réseau avant le filtrage est 26.21 %.

La figure (III.15) le THD de courant de la source après compensation où l'onduleur est commandé par hystérésis THD= 1.62 %. Ce qui est inférieur à 5 %.

Afin de tester les performances dynamiques de ce filtre, une autre charge a été ajoutée à  $t = 0.08s$ . La figure (III.16) montre le courant de source après avoir ajouté cette deuxième charge non linéaire. Ce courant reste sinusoïdal. La figure (III.17) montre le courant de la charge qui n'est pas sinusoïdale. La figure (III.18) montre le courant de référence et le courant injecté par le filtre.

### III.8. Conclusion :

Dans ce chapitre on a étudié le filtre actif shunt utilisé pour minimiser les harmoniques dans le réseau causé par une charge non-linéaire. La méthode utilisée pour identifier les courants perturbateurs est la méthode des puissances instantanées. La commande faite par hystérésis.

Les résultats des simulations ont donné des THD par le filtre actif inférieurs à ceux obtenus par le filtre passif résonant. La réponse dynamique du filtre actif parallèle lors de la variation de charge a été satisfaisante. Les résultats obtenus ont confirmé la supériorité du filtre actif par rapport aux filtres passifs.

# **Conclusion Générale**

### Conclusion Générale :

Dans ce travail nous avons traité le problème de la pollution des courants harmoniques des réseaux électriques par le filtrage passif et actif.

Dans un premier temps, nous avons présenté des généralités sur la pollution harmonique, les sources des harmoniques et leurs effets sur le réseau électrique.

Deuxièmement nous avons présenté le filtre passif basé sur l'utilisation de circuits électriques RLC pour modifier localement l'impédance du réseau. Or les filtres passifs présentent plusieurs inconvénients tel que la résonance avec le réseau et l'utilisation d'un filtre pour chaque harmonique à éliminer. Trois cas de filtrage sont simulés : un filtre résonnant accordé sur l'harmonique d'ordre 5, un filtre résonnant accordé sur l'harmonique d'ordre 7 et deux filtres résonnants accordés sur les harmoniques d'ordre 5 et 7 simultanément. Dans ces trois cas les taux de distorsions harmoniques ont été réduits.

Le filtrage actif parallèle est une nouvelle solution pour la dépollution des courants harmoniques. Dans le troisième chapitre, le filtre actif parallèle et ses différents constituants sont présentés. Il consiste à être connecté en parallèle avec le réseau à travers un filtre de couplage à l'onduleur de tension. Cet onduleur injecte dans le réseau en temps réel les courants de dépollution harmonique pour dépolluer ce dernier. Ces harmoniques sont identifiés par la méthode des puissances instantanées et le contrôle de l'onduleur est fait par hystérésis. Ce type de contrôle est simple à mettre en œuvre, mais la fréquence de commutation n'est pas constante.

Les résultats de simulations montrent que le filtre actif parallèle permet de réduire le THD à des valeurs inférieures aux limites imposées par les normes. Ces résultats montrent aussi des avantages tels que l'adaptabilité du filtre actif face aux variations de charge ainsi que son pouvoir d'éliminer tous les rangs harmoniques. Les résultats des simulations confirment la supériorité du filtrage actif par rapport au filtrage passif.

# **Bibliographie**

## Bibliographie

---

- [1] **L. MORAN et J. DIXON** « Power Electronics Handbook », Academic Press, Chapter 39 pp.1-36 ,2007.
- [2] "**DOSSIER Puissance, Energie et Perturbations « Harmoniques»**", Fiched'application « **Harmoniques»**, ed 1-Service Communication 05/2008, France, 3pages, Pdf.Thèse de doctorat, à l'Ecole Centrale de Nantes , 7 Janvier 1997
- [3] **C. COLLOMBET J. M. LUPIN Et J. SCHONEK.** « Perturbations Harmoniques dans les Réseaux Pollués et Leur Traitement ». Extrait du Cahier technique n° 152, Schneider Electric, 1999.
- [4] **T. MAHNI**«Etude et Conception d'un Filtre Actif Parallèle Triphasé à Quatre Fils en vue de sa Commande par des Méthodes d'Intelligence Artificielle». Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider Biskra, 2017 .
- [5]**N. Bruyant**, "Etude et commande généralisées de filtres actifs parallèles, compensation global ou sélective des harmoniques, régime équilibré ou déséquilibré ". Thèse de doctorat de l'université de Nantes, France, 1999.
- [6]**Subjak.J.S, Mcquilkilkin.J.S**, "Harmonies - Causes, Effects, Measurements, and Analysis: An Update" IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. 26, No.6 ,pp. 1034-1042. Nov/Dec. 1990
- [7] : **Abdelmalek BOULAHIA** <<Etude des Convertisseurs Statiques destinés à la Qualité de l'Energie Electrique >> mémoire magister en électrotechnique Université de Constantine, 2009
- [8] **L.BILAL et O.ABANA** «Stratégies de Commande d'un Filtre Active Parallèle Triphasé». Mémoire de master, Université echahid hama lakhder d'el-oued, 2012.
- [9] **D.Ould Abeslam**, « techniques neuromimétriques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basses tension», Thèse de doctorat, université de Haute Alsace, décembre 2005.
- [10]**M. Sarra**, *Contribution a l'étude des filtres actifs hybrides*, Thèse de doctorat de l'Université de Sétif, Algerie, (2013)
- [11]**IEC 61000-3-4. Limits**: Limitations of emissions of harmonic currents in lowvoltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16A. (1998).
- [12]**IEEE-519. IEEE Recommended Practices and requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems.** (1992).
- [13] **L. ZELLOUMA.** « Contribution à l'étude du filtrage des harmoniques des réseaux de distribution à l'aide du filtre actif » Thèse de doctorat. Université badji mokhtar annaba, 2010.

## Bibliographie

---

- [14] : **KIFOUCHE REZKI** <<Identification des courants harmoniques et génération ducourant référence "application au convertisseur statique">>mémoire magister en génieélectrique Université M'hamed Bouguarra Boumerdes , 2005
- [15] : **SANAE RECHKA** <<étude de méthode de filtrage des harmoniques dans les réseaux électrique de distribution>>, diplôme de maitre et sciences appliquées en génie électrique, Université du Québec à Trois-Rivières, 2002.
- [16] **T.Deflandre et P.Mauras** les Harmoniques sur les réseaux électriques  
Edition EYROLLES 1998
- [17] **J. Arrillaga & N.R. Watson**, POWER SYSTEM HARMONICS, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, John Wiley & Sons, 2003
- [18] **Alali Mohamad Alaa Eddin** <<Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension >> THÈSE, École Doctorale Sciences Pour l'Ingénieur ULP – ENSAIS – ENGEES – URS, 2002
- [19] **Z. Laid, B.-S. Salem**, « Etude et réalisation d'un onduleur monophasé utilisant latechnique PWM à base " MOSFET" », Mémoire d'ingénieur de l'Université de Biskra, 2004.
- [20] : **BOUKADOUM Aziz** << Contribution à l'étude des stratégies d'identification Harmoniques et de commande basées sur les techniques avancées pour les compensateurs actifs des réseaux électriques >> thèse de doctorat, université badji mokhtar annaba ,2015
- [21] **Hanane Kouara** « l'application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un réseau base tension » mémoire de magister en électrotechnique, université de Batna 2006.
- [22] **OMEIRI AMAR** «Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant », Thèse de doctorat, Université badjimokhtar annaba, 2007
- [23] **KEBIRI SAMIA** <<modélisation et simulation d un filtre actif multi niveaux >> thèse magistrale, université mouloud Mammeri, tizi\_ ouzou, 2009
- [24] **Boucif Abdelmalek** «Filtrage actif d'un réseau Électrique», Mémoire de Fin d'Etudes Université Mohamed Khider Biskra, 2013 / 2014
- [25] **ABDELATIF Med Elhadi**.

## Bibliographie

---

« Étude comparative de différentes méthodes de compensation active d'énergie électrique », mémoire de Master. Université de M'sila, 2013.

[26] **Mohamed Alaa Eddin Alali.** « Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension (Automatisation des systèmes de puissance électrique) », Thèse de Doctorat de l'université Louis Pasteur-Strasbourg, 2002.

[27] **S. BEN ALI et S. BOUHANAK** «Etude et Simulation d'un Filtre Active Parallèle à Quatre Fils». Mémoire de magister, Université echahid hama lakhder d'el-oued, 2015.

[28] **Y. PAL et A. SWARUP.** « A Review of Compensating Type Custom Power Devices for Power Quality Improvement », Conférence on Power System Technology and IEEE Power India Conférence (POWERCON), p. 1-8, 2008.

[29] **N. Bruyant,** “Étude et commande généralisées de filtres actifs parallèles, compensation globalou sélective des harmoniques, régime équilibré ou déséquilibré ”. Thèse de doctorat de l'université de Nantes, France, 1999.

