

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY  
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار عنابة

Faculté des Sciences de l'ingénieur  
Département d'Electromécanique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de MAGISTER

**AMELIORATION DES PARAMETRES DU FILTRE  
ACTIF PAR L'UTILISATION D'UN REGULATEUR A  
LOGIQUE FLOU**

Option

Electromécanique

Présenté par : **HAMICHE Larbi**

Directeur de Mémoire : **Dr. HEROUS.L** Maitre de conférence Université Annaba

**DEVANT LE JURY**

**Président:** Dr SAAD.S Maitre de conférence Université Annaba

**Examineurs:** Dr Cheghib .H Maitre de conférence Université Annaba

Dr Oumeiri.A Maitre de conférence Université Annaba

Dr Rachedi.F Maitre de conférence Université Annaba

**Année 2009**

# Dédicace....



***J**e dédie ce modeste travail :*

*A ceux qui ont tout fait pour être ce que je suis aujourd'hui.*

*A mon père qui était toujours là pour moi sans la moindre hésitation.*

*A l'être le plus chère qui m'ai au monde, ma mère.*

*A mes chères sœurs et frères et à tous les membres de la famille **HAMICHE**.*

*A tout mes amis : **YACINE, HALIM, FAROUK, RABEH, YUCEF et MAHDI...**, et tous ceux que je n'ai pas pu citer.*

*Et tout les membres de la classe Electromécanique promotion «2006 ».*



# Remerciement



Je voudrais tout d'abord exprimer ma profonde reconnaissance à mon encadreur Monsieur **HEROUS LAZHAR**, qui a dirigé mon travail; Ses conseils et ses commentaires précieux m'ont permis de surmonter mes difficultés et de progresser dans mes recherches.

Je voudrais également exprimer mes remerciements sincères à Monsieur **SAAD SALAH**, qui par son expérience et son enthousiasme, m'a aussi donné beaucoup de propositions tout au long de ce projet.

Recevez Monsieur **CHEGHIB HOCINE**, mes remerciements les plus distingués, pour votre soutien moral. Vos conseils précieux m'ont été une aide de très grande importance.

Je remercie Monsieur **RACHEDI FAOUZI** et Monsieur **OUMEIRI AMMAR**, pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de participer au jury de soutenance.

Et enfin, je voudrais adresser mes remerciements au Professeur **Dr. IVAN VACLAVIK**, Ingénieur de l'Université technique slovaque de Bratislava (EIVD), Haute Ecole spécialisée de Suisse occidentale, qui m'a beaucoup aidé pour la simulation.



*Ce travail s'intéresse à la compensation des harmoniques et l'amélioration de la qualité du courant de la source lors de l'utilisation des charges non linéaires, aujourd'hui l'utilisation des filtres actifs parallèles et la régulation de leurs paramètres jouent un rôle très important dans la qualité du filtrage.*

*Habituellement, les régulateurs utilisés sont de types classiques tels que P, PI, PID qui nécessitent un ajustement à partir de la réponse temporelle et une identification des paramètres du système caractérisant une réponse de bonne qualité, d'où, un calcul assez compliqué à effectuer.*

*L'utilisation de la logique floue permet non seulement de faciliter l'ajustement des régulateurs mais aussi d'obtenir une bonne qualité de la réponse du filtrage.*

*Les résultats obtenus par simulation ont montrés après l'utilisation de la logique floue comme un régulateur une amélioration des performances de ce filtre avec un taux de distorsion harmonique (THD) calculé après le filtrage égale à 0.9%, finalement, nous disposons d'un filtre qui s'adapte parfaitement aux variations de la charge.*

## Abstract

---

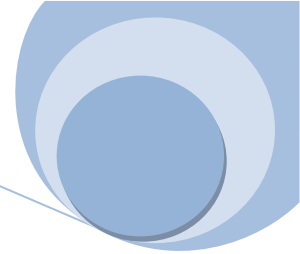
*This work is focused on harmonics compensation and the improvement of source current quality when non linear loads are used. The use of shunt active power filters and their parameters control play a very important role in filtering quality.*

*Usually, the used controllers are conventional types such as P, PI, PID requiring an adjustment from the temporal response and an identification of the system parameters characterizing a response of high quality, where, a complex calculation has to be carried out.*

*The use of the fuzzy logic facilitates the adjustment of the controllers and allows obtaining a high filtering quality response.*

*The obtained results by simulation showed that the use of fuzzy logic controllers improve the performances of the shunt active power filter. The harmonic distortion rate (THD) calculated after filtering is 0.9%. This result shows the effectiveness and the high performances of the fuzzy logic controllers in harmonic current identification and filtering.*

# SOMMAIRE

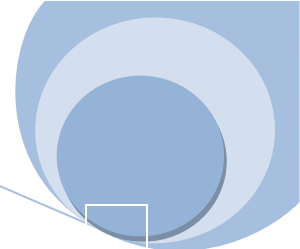


## Introduction Générale

### **CHAPITRE I: GENERALITES SUR LES HARMONIQUES ET LEURS EFFETS SUR LE RESEAU ELECTRIQUE**

<b>I.1 Introduction</b> .....	1
<b>I.2 Charges industrielles génératrices d'harmoniques</b> .....	1
I.2.1 Redresseur triphasé à diodes et filtre capacitif .....	1
I.2.2 Convertisseur de courant .....	2
I.2.2.1 <i>Commande des machines à courant continu à vitesse variable</i> .....	2
I.2.2.2 <i>Commande des machines synchrones à vitesse variable</i> .....	2
I.2.2.3 <i>Les électrolyseurs</i> .....	2
I.2.2.4 <i>Les fours à induction régulés</i> .....	2
I.2.3 Appareils à arc électrique.....	2
<b>I.3 Les effets néfastes de la pollution harmonique</b> .....	4
I.3.1 Les effets instantanés.....	4
I.3.2 Les effets différés.....	4
<b>I.4 Conséquences des perturbations harmoniques</b> .....	4
I.4.1 Phénomènes de résonance .....	5
a) <i>Résonance parallèle</i> .....	5
b) <i>Résonance série</i> .....	6
I.4.2 Échaufferaient dans les conducteurs et les équipements électriques .....	6
I.4.3 Les bruits et vibrations .....	7
I.4.4 Les différences de potentiel entre masses .....	7
I.4.5 Effets sur le conducteur neutre .....	7
I.4.6 Dysfonctionnement d'appareils utilisant la tension comme référence .....	7

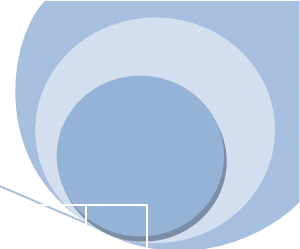
# SOMMAIRE



## **CHAPITRE II : MESURES VISANT A REDUIRE LES HARMONIQUES**

<b>II.1 Introduction</b> .....	8
<b>II.2 Surdimensionnement de l'installation électrique</b> .....	8
<b>II.3 Transformateurs spéciaux</b> .....	9
II.3.1 Transformateur de mise à la terre .....	9
<b>II.4 Nécessité de Filtrage</b> .....	10
II. 4.1 Filtrage passif .....	10
<i>a) Le shunt résonant</i> .....	10
<i>b) Les filtres amortis</i> .....	12
II. 4.2 Filtres Actifs .....	12
<b>II.5 Classification des filtres actifs</b> .....	14
<i>a) Filtre actif série</i> .....	14
<i>b) Filtre actif parallèle</i> .....	15
<i>c) Conditionneur universel de la qualité d'onde</i> .....	15
<i>d) Filtre actif hybride</i> .....	16
<i>d. 1) Filtre hybride parallèle</i> .....	16
<i>d.2) Filtre hybride série</i> .....	17
<b>II.6 Conclusion</b> .....	18

# SOMMAIRE



## **CHAPITRE III : FILTRE ACTIF PARALLELE ET STRATEGIE DE COMMANDE**

<b>III.1 Introduction</b> .....	19
<b>III.2 Structure du filtre actif</b> .....	20
III.2.1 Filtre actif parallèle à structure de tension .....	21
III.2.2 Filtre actif parallèle à structure de courant.....	22
<b>III.3 Stratégie de commande</b> .....	22
<b>III.4 La régulation et l'adaptation du filtre actif</b> .....	27
III.4.1 Régulation de la tension continue .....	27
III.4.2 Commande de l'onduleur.....	29
III.4.2.1 Commande par hystérésis.....	29
III.4.2.2 Commande par MLI.....	30
III.4.2.2.1 régulateur proportionnel P.....	31
III.4.2.2.2 régulateur proportionnel PI.....	34
<b>III.5 Paramètres de la simulation</b> .....	35
III.5.1 Présentation du logiciel .....	35
III.5.2 Modèle réseau-charge polluante – filtre actif parallèle .....	35
<b>III.6 Résultats de simulation</b> .....	36
- 1 <sup>er</sup> cas charge RL .....	37
- 2 <sup>eme</sup> cas Charge RC .....	39
III.6.1 changement de la charge $R_1L_1 \Rightarrow R_2L_2$ .....	41
III.6.2 changement de la charge $R_1C_1 \Rightarrow R_2C_2$ .....	42
<b>III.7 Analyse des résultats</b> .....	43
<b>III.8 Conclusion</b> .....	45

# SOMMAIRE

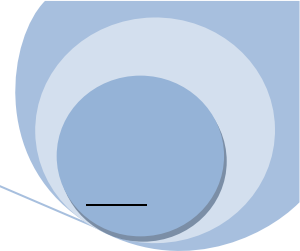
## **CHAPITRE IV : REGLAGE PAR LOGIQUE FLOUE**

<b>IV.1 Introduction</b> .....	46
<b>IV.2 Historique et principe de la logique floue</b> .....	47
<b>IV.3 Principe de la logique floue</b> .....	47
IV.3.1 Bases de la logique floue .....	50
IV.3.1.1 Variables linguistiques et les ensembles flous .....	51
IV.3.1.2 les fonctions d'appartenance .....	51
IV.3.1.3 les inférences .....	52
IV.3.1.3.1 Inférence avec une seule règle.....	52
IV.3.1.3.2 Inférence avec une plusieurs règles.....	52
IV.3.1.3.3 opération de la logique floue.....	53
<b>IV.4 Etape de mise en œuvre d'un contrôleur flou</b> .....	55
IV.4.1 Etape de fuzzification.....	55
IV.4.2 Etape d'inférence « le moteur d'inférence ».....	56
IV.4.2.1 Méthode de Mamdani.....	57
IV.4.3 Etape de défuzzification.....	58
<b>IV.5 Paramètre de simulation</b> .....	61
IV.5.1 boucle de régulateur tension .....	61
IV.5.2 boucle de régulateur courant.....	62
<b>IV.6 Résultats de la simulation</b> .....	64
<b>IV.7 Conclusion</b> .....	67

## **Conclusion Générale et Perspective**



# SOMMAIRE



## Liste des figures

Figure	Désignation	Chapitre	Page
1	Résonance parallèle et résonance série	I	5
1	Surdimensionnement du neutre	II	8
2	Transformateur de mise à la terre	II	9
3	Filtrage passif ; <i>shunt résonant</i>	II. a	11
3	Filtrage passif ; <i>filtres amortis</i>	II. b	12
4	Décomposition en composants harmoniques <sup>1</sup>	II. a	13
4	Décomposition en composants harmoniques <sup>2</sup>	II. b	13
5	filtre actif série.	II	14
6	filtre actif parallèle	II	15
7	Combinaison filtre actif série et filtre actif parallèle	II	16
8	Filtre hybride parallèle	II	17
9	Filtre hybride série	II	17
1	Structure générale d'un filtre actif parallèle	III	20
2	Filtre actif parallèle à structure de tension	III	21
3	Filtre actif parallèle à structure de courant	III	22
4	Filtrage de la composante de la puissance continue	III	24
5	Filtre actif commandé par la méthode des puissances instantanées	III	26
6	Régulateur de la tension continue	III	28
7	Diagramme de Bode de la fonction de transfert $\frac{V_{DC}^2}{V_{DC\ ref}^2}$	III	29
8	Contrôle de courant par hystérésis	III	30
9	Contrôle de courant par MLI	III	30
10	Schéma de la régulation parallèle	III	32
11	Schéma simplifié de la régulation	III	33
12	Diagramme de Bode de la fonction de transfert $\frac{I_{inj}}{I_{ref}}$	III	33
13	Schéma bloc de la régulation PI	III	34
14	Diagramme de Bode de la fonction de transfert $\frac{I_{inj}}{I_{ref}}$	III	34
15	Modèle (Réseau – Charge polluante filtre actif parallèle) sous SIMULINK	III	35
16	Courant à travers la charge.	III	37
17	Courant du filtre.	III	37
18	Courant de la source.	III	37
19	Allure de la tension $V_{dc}$	III	38

<b>Figure</b>	<b>Désignation</b>	<b>Chapitre</b>	<b>Page</b>
<b>20</b>	analyse spectrale du courant de la source avant filtrage ( <b>THD = 10.71 %</b> )	<b>III</b>	<b>38</b>
<b>21</b>	analyse spectrale du courant de la source après filtrage ( <b>THD = 4.73 %</b> )	<b>III</b>	<b>38</b>
<b>22</b>	courant à travers la charge	<b>III</b>	<b>39</b>
<b>23</b>	courant du filtre.	<b>III</b>	<b>39</b>
<b>24</b>	courant de la source.	<b>III</b>	<b>39</b>
<b>25</b>	allure de la tension V <sub>dc</sub>	<b>III</b>	<b>40</b>
<b>26</b>	analyse spectrale du courant de la source avant filtrage ( <b>THD = 16.23 %</b> )	<b>III</b>	<b>40</b>
<b>27</b>	analyse spectrale du courant de la source après filtrage ( <b>THD = 2.64 %</b> )	<b>III</b>	<b>40</b>
<b>28</b>	courant à travers la charge.	<b>III</b>	<b>41</b>
<b>29</b>	courant du filtre.	<b>III</b>	<b>41</b>
<b>30</b>	courant de la source.	<b>III</b>	<b>41</b>
<b>31</b>	allure de la tension V <sub>dc</sub>	<b>III</b>	<b>42</b>
<b>32</b>	courant à travers la charge	<b>III</b>	<b>42</b>
<b>33</b>	courant du filtre	<b>III</b>	<b>42</b>
<b>34</b>	courant de la source.	<b>III</b>	<b>43</b>
<b>35</b>	allure de la tension V <sub>dc</sub>	<b>III</b>	<b>43</b>
<b>1</b>	Exemple d'ensembles considérés en logique booléenne	<b>IV</b>	<b>48</b>
<b>2</b>	Exemple d'ensembles considérés en logique floue	<b>IV</b>	<b>49</b>
<b>3</b>	Représentation d'un ensemble flou par sa fonction d'appartenance	<b>IV</b>	<b>49</b>
<b>4</b>	Cas de l'ensemble flou « moyenne » de la variation température	<b>IV</b>	<b>50</b>
<b>5</b>	Différentes formes des fonctions d'appartenance	<b>IV</b>	<b>51</b>
<b>6</b>	Operateur « NON »	<b>IV</b>	<b>51</b>
<b>7</b>	Operateur « ET »	<b>IV</b>	<b>54</b>
<b>8</b>	Opération « OU » réalisé par le Maximum	<b>IV</b>	<b>54</b>
<b>9</b>	Shéma de principe d'un régulateur flou	<b>IV</b>	<b>55</b>
<b>10</b>	Défuzzification par valeur maximun	<b>IV</b>	<b>58</b>
<b>11</b>	Défuzzification par méthode des hauteurs pondérées	<b>IV</b>	<b>59</b>
<b>12</b>	Surface caractéristique d'un régulateur flou	<b>IV</b>	<b>60</b>

<b>Figure</b>	<b>Désignation</b>	<b>Chapitre</b>	<b>Page</b>
<b>13</b>	Fonction de répartition pour (e) et ( $\Delta e$ )	<b>IV</b>	<b>61</b>
<b>14</b>	Fonction de répartition pour la sortie	<b>IV</b>	<b>61</b>
<b>15</b>	Fonction d'appartenance de ( $e_a$ ) et ( $\Delta e_a$ )	<b>IV</b>	<b>62</b>
<b>16</b>	Fonction d'appartenance pour la sortie $I_e$	<b>IV</b>	<b>63</b>
<b>17</b>	Courant à travers la charge	<b>IV</b>	<b>64</b>
<b>18</b>	Courant du filtre	<b>IV</b>	<b>64</b>
<b>19</b>	Courant de la source	<b>IV</b>	<b>65</b>
<b>20</b>	Allure de la tension $V_{dc}$	<b>IV</b>	<b>65</b>
<b>21</b>	Analyse spectrale du courant de la source <b>THD = 0.90 %</b>	<b>IV</b>	<b>65</b>

## Liste des tableaux

---

<b>Tableau</b>	<b>Désignation</b>	<b>Chapitre</b>	<b>Page</b>
Tableau I.1	Spectres de courant harmonique émis par les équipements perturbateurs	<b>I</b>	<b>3</b>
Tableau IV.1	Les règles floues dirigeant la sortie	<b>IV</b>	<b>56</b>
Tableau IV.2	Base de règles gérant la sortie en fonction de « $e$ Et $\Delta e$ » (boucle de régulation tension).	<b>IV</b>	<b>62</b>
Tableau IV.3	Base de règles gérant la sortie en fonction de « $e_a$ Et $\Delta e_a$ » (boucle de régulation courant)	<b>IV</b>	<b>63</b>

$A_r$  : Amplitude de référence.  
 $A_p$  : Amplitude de la porteuse.  
 $f$  : fréquence.  
 $f_r$  : fréquence de résonance.  
 $f_m$  : fréquence de commutation.  
 $f_{réf}$  : fréquence de référence.  
 $h$  : range d'harmonique.  
 $I_h$  : courant harmonique.  
 $Z_h$  : impédance harmonique du réseau.  
 $V_h$  : tension harmonique.  
THD : Taux de distorsion harmonique.  
 $L$  : Inductance de phase.  
 $L_1, L_2, L_3$  : les trois phases du réseau ( $I_a, I_b, I_c$ ).  
 $V_s$  : la tension de la source « réseau ».  
 $X_s$  : l'impédance du réseau.  
 $Z_n$  : les impédances branchées sur le même réseau.  
 $L_n$  : les inductances branchées sur le même réseau.  
 $C_n$  : les condensateurs branchés sur le même réseau.  
 $I_f = I_{inj}$  : courant injecté par le filtre  
 $I_s$  : courant de source.  
 $I_{ch}$  : courant absorbé par la charge polluante.  
 $I_\alpha, I_\beta$  : courant au repère ( $\alpha, \beta$ )  
 $L_c$  : inductance à l'entrée du pont redresseur.  
 $L_{ch}$  : inductance de charge non linéaire.  
 $C_{ch}$  : Capacité de charge non linéaire.  
 $m$  : indice de modulation.  
 $P$  : Puissance active.  
 $q$  : puissance réactive.  
 $S$  : puissance apparente.  
 $\bar{p}, \bar{q}$  : Puissance continues.  
 $\tilde{p}, \tilde{q}$  : Puissance alternatives.  
 $I_{ref}$  : courant de référence à la sortie du bloc d'identification.  
 $r$  : coefficient de réglage (MLI).  
 $R_s$  : résistance se source.  
 $R_{ch}$  : résistance de charge non linéaire.  
 $R_c$  : résistance à l'entrée du pont redresseur.  
 $R_f$  : résistance de filtre de sortie.  
 $R_d$  : résistance de redresseur.  
 $V_a, V_b, V_c$  : tension des phases.  
 $V_{dc}$  : tension continue de l'onduleur.  
 $V_{dc,réf}$  : tension continu de référence.  
 $P_{réf}$  : puissance de référence à la sortie du régulateur.

$V_\alpha, V_\beta$  : tension au repère ( $\alpha\beta$ ).

$\omega_i$  : pulsation de coupure.

$K_p$  : coefficient du régulateur proportionnel.

$K_i$  : coefficient du régulateur intégrateur.

$C_{dc}$  : condensateur.

$\mu$  : degré d'appartenance.

Les perturbations de courant et de tension dans les réseaux de distribution électrique sont causées par la prolifération des charges non linéaires, telle que les convertisseurs statiques, le matériel informatique avec les possibilités de non linéarité que ceci comporte. Ces appareils absorbent des courants non sinusoïdaux et introduisent de ce fait des pollutions harmoniques.

Il faut aujourd'hui que l'ingénieur en génie électrique connaisse la provenance et les effets des harmoniques sur les équipements qu'ils installent ou qu'ils gèrent. Les harmoniques engendrées par ces charges circulent dans les réseaux électriques et perturbent sérieusement le fonctionnement normal de certains équipements électriques pouvant même engendrer leur destruction. C'est pour ces raisons que le filtrage des distorsions en courant et en tension est au centre des préoccupations actuelles à la fois des fournisseurs et des utilisateurs d'énergie électrique.

Le filtre actif parallèle est à ce jour la solution avancée de dépollution, il répond mieux aux contraintes de la production et de la distribution. Leur réponse est instantanée et elles s'adaptent automatiquement aux évolutions des perturbations introduites par les charges du réseau électrique. Que ce soit dans le secteur industriel ou dans le secteur domestique, les filtres actifs parallèles s'insèrent facilement sans imposer un aménagement des installations du fournisseur d'énergie ou du consommateur.

Les filtres actifs parallèles sont constitués de convertisseur à base d'interrupteurs de puissance, de type onduleur, associés à un dispositif de contrôle et de commande adapté. Ils peuvent être assimilés à des sources de courant ou de tension qui compensent directement les perturbations harmoniques en injectant sur le réseau des courants ou des tensions en opposition de phase par rapport aux perturbations mesurées. Cette technique nécessite une identification et un filtrage des harmoniques à rejeter.

Le filtre actif parallèle, appelé aussi compensateur shunt, est connecté en parallèle sur le réseau électrique. Il est dimensionné uniquement par rapport à la puissance due aux harmoniques absorbées par la charge polluante. Son indépendance totale par rapport à la source et à la charge lui confère des propriétés avantageuse : auto-adaptabilité, fiabilité et efficacité. L'identification et le filtrage des harmoniques peuvent utiliser différentes techniques. La plus efficace et la plus utilisée consiste à identifier et à filtrer les harmoniques polluantes dans l'espace des puissances instantanées. Dans notre travail, nous avons adopté cette technique en raison des nombreux avantages qu'elle procure. Basée sur l'utilisation des

régulateurs à logique floue, notre approche vise principalement à améliorer les performances de ce système en termes de distorsions résiduelles. Pour atteindre cet objectif, nous mettons en œuvre différents régulateurs flous afin d'assurer un suivi instantané des fluctuations du spectre fréquentiel des perturbations.

### **Guide de lecture.**

Le présent travail concerne tant l'étude des harmoniques (identification et filtrage) que la commande de l'onduleur. Ces deux points seront abordés par une étude théorique puis par une étape de simulation.

Ce travail se compose de plusieurs parties :

- Une étude bibliographique sur les harmoniques, leurs origines et leurs inconvénients.
- Une étude bibliographique sur les différentes méthodes de filtrage et les solutions avancées pour répondre au mieux aux effets des harmoniques sur les équipements.
- Une partie simulation en adoptant des régulateurs à logique floue qui permet non seulement de faciliter l'ajustement des régulateurs mais aussi d'obtenir une bonne qualité de la réponse du filtrage.

Par chapitre, le contenu est :

- Le premier chapitre traite en général une étude bibliographique consacrée aux problèmes des harmoniques et une présentation du contexte du travail.
- Le deuxième chapitre présente une large étude bibliographique sur les différentes méthodes et les mesures adoptées pour réduire les courants harmoniques sur les réseaux de distribution.
- Dans le troisième chapitre, nous avons une large étude consacrée à l'utilisation des filtres actifs, sa structure et sa contribution à la minimisation des harmoniques. De plus, nous étudierons l'ensemble des contraintes et les différentes méthodes de régulation.
- Le quatrième chapitre traite d'une part le principe général et la théorie de base de la logique floue, d'autre part, l'introduction de la notion de régulation floue dans le filtrage actif parallèle.

Enfin, nous traiterons les résultats de simulation, les conclusions et les perspectives de cette étude.

## **I.1 Introduction**

L'énergie électrique, généralement produite et distribuée sous la forme d'un système triphasé sinusoïdal, permet de fournir la puissance électrique nécessaire aux différentes charges sur le réseau électrique. La qualité physique de ce produit est une forme d'onde, lorsque cette dernière n'est plus sinusoïdale, on rencontre des perturbations qui peuvent affecter le bon fonctionnement de nombreux équipements et de charges raccordés sur le réseau.

L'utilisation croissante des équipements de l'électronique de puissance sur les réseaux électriques contribue à la dégradation de la tension d'alimentation et rendent le réseau public de plus en plus sensible. En effet, ces charges dites déformantes sont non linéaires et appellent du réseau électrique un courant non sinusoïdal possédant un contenu harmonique. Ces courants harmoniques circulant à travers les impédances du réseau peuvent, lorsqu'ils sont importants en amplitude, créer des tensions harmoniques et ainsi perturber le fonctionnement des autres équipements branchés au point commun de raccordement [1].

## **I.2 Charges industrielles génératrices d'harmoniques**

L'avènement des équipements électriques utilisant des convertisseurs statiques a entraîné ces dernières années une augmentation sensible du niveau de pollution harmonique des réseaux électriques. Ces équipements qui permettent la conversion de la puissance électrique d'une forme quelconque à une autre forme, apportent un progrès considérable au niveau des procédés industriels. Comme mentionné précédemment, ces convertisseurs sont vus comme étant des charges non linéaires qui injectent des courants harmoniques sur le réseau électrique. Nous présentons dans cette section quelques-unes des charges les plus importantes.

### **I.2.1 Redresseur triphasé à diodes et filtre capacitif**

Utilisé comme premier étage pour la commande en vitesse variable des machines asynchrones. La commande de la machine asynchrone en vitesse variable est utilisée dans des applications comme l'entraînement des compresseurs, des ventilateurs, des pompes, des convoyeurs, etc.

## **I.2.2 Convertisseur de courant**

Les convertisseurs de courant constituent l'un des montages les plus répandus dans le secteur industriel. Ce type de montage est constitué de thyristors qui sont commandés en ouverture. Ceci se fait en jouant sur l'angle d'allumage  $\alpha$  de commande des gâchettes des thyristors. Ils sont utilisés dans de nombreuses applications telles :

### *I.2.2.1) Commande des machines à courant continu à vitesse variable*

Les machines à courant continu sont utilisées dans de multiples activités nécessitant de la vitesse variable aussi bien dans les applications de faible puissance que celle de grande puissance telles les machines outils, les procédés de commande dans l'industrie du papier et du textile ainsi que les laminoirs.

### *I.2.2.2) Commande des machines synchrones à vitesse variable*

On rencontre des convertisseurs de courant suivis d'un onduleur pour commander la machine synchrone en vitesse variable.

### *I.2.2.3) Les électrolyseurs*

L'électrolyse est surtout employée dans la production des métaux non ferreux et dans l'industrie de la chimie.

### *I.2.2.4) Les fours à induction régulés*

Ces derniers sont utilisés majoritairement dans les secteurs industriels des métaux, de la chimie et de la galvanoplastie.

## **I.2.3 Appareils à arc électrique**

Les appareils à arc électrique regroupent les fours à arc qui utilisés en sidérurgie peuvent être à courant alternatif ou à courant continu.

L'arc est non linéaire, dissymétrique et instable. Il va induire des spectres possédant des raies paires, impaires et une composante continue à des fréquences quelconques entraînant l'apparition d'un spectre continu.

Le tableau suivant illustre l'allure typique des spectres de courant harmonique émis par les charges non linéaires discutées ci-dessus :

Tableau.1.1 - Spectres de courant harmonique émis par les équipements perturbateurs

	Exemple d'appareils	Contenu harmonique typique										
Redresseurs triphasés capacitifs	-Machine asynchrone à vitesse variable	<table border="1"> <caption>Typical harmonic content for capacitive three-phase rectifiers</caption> <thead> <tr> <th>Harmonic order (n)</th> <th>Percentage (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>~80</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>~60</td> </tr> </tbody> </table>	Harmonic order (n)	Percentage (%)	1	100	3	0	5	~80	7	~60
Harmonic order (n)	Percentage (%)											
1	100											
3	0											
5	~80											
7	~60											
Convertisseur de courant	-Moteur à courant continu à vitesse variable ; -Moteur synchrone à vitesse variable ; -Electrolyseur ; -Four à induction.	<table border="1"> <caption>Typical harmonic content for current converters</caption> <thead> <tr> <th>Harmonic order (n)</th> <th>Percentage (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>~30</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>~15</td> </tr> </tbody> </table>	Harmonic order (n)	Percentage (%)	1	100	3	0	5	~30	7	~15
Harmonic order (n)	Percentage (%)											
1	100											
3	0											
5	~30											
7	~15											
Appareils à arc	- Four à arc ; - Soudure à l'arc.	<table border="1"> <caption>Typical harmonic content for arc devices</caption> <thead> <tr> <th>Harmonic order (n)</th> <th>Percentage (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>~15</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>~10</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>~10</td> </tr> </tbody> </table>	Harmonic order (n)	Percentage (%)	1	100	3	~15	5	~10	7	~10
Harmonic order (n)	Percentage (%)											
1	100											
3	~15											
5	~10											
7	~10											

### I.3 Les effets néfastes de la pollution harmonique

Les courants harmoniques associés aux différentes impédances du réseau vont donner naissance à des tensions harmoniques qui vont se superposer à la tension fondamentale du réseau. La tension qui en résulte n'est plus sinusoïdale. La pollution alors présente sur le réseau de distribution pourrait être préjudiciable au bon fonctionnement de tous les récepteurs (ou charge) raccordés sur ce même réseau. On distingue deux types d'effet des harmoniques sur les équipements électriques :

#### I.3.1 Les effets instantanés

Ce sont les effets immédiats sur le bon fonctionnement d'un équipement. Par exemple, dans le cas des systèmes électroniques il peut s'agir d'un dérangement des commutations des thyristors lorsque les grandeurs harmoniques déplacent le passage à zéro de la tension ou l'augmentation de la marge d'erreur sur les compteurs d'énergie à induction.

Perturbations aux niveaux des récepteurs de télécommande utilisés par les distributeurs d'énergie, lorsque les tensions harmoniques sont de fréquence voisine de celle du système.

#### I.3.2 Les effets différés

Ils se manifestent après une longue exposition au phénomène et se traduisent par une perte partielle des fonctionnalités ou une destruction complète de l'appareil.

L'échauffement des câbles et des diverses enroulements d'une machine en est un exemple.

### I.4 Conséquences des perturbations harmoniques de courant sur le réseau

Pour chaque harmonique de courant traversant l'impédance du réseau, il apparaît une tension harmonique  $V_h$ .

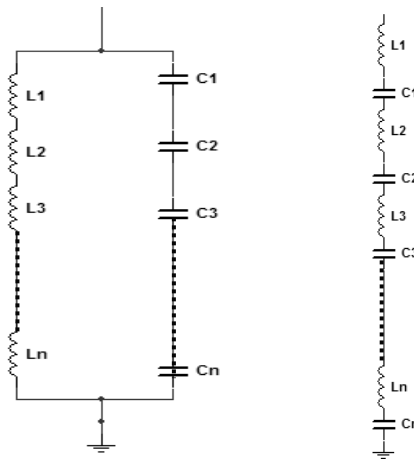
$$\mathbf{V}_h = \mathbf{Z}_h \times \mathbf{I}_h \quad (\text{I-1})$$

$Z_h$  : impédance harmonique du réseau.

La circulation des courants harmoniques dans le réseau entraîne donc une déformation de l'onde de tension. Cela peut être préjudiciable au bon fonctionnement des récepteurs sensibles branchés sur le même réseau.

### I.4.1 Phénomènes de résonance

L'apparition de phénomènes de résonance est due à la présence sur les réseaux d'éléments capacitifs et inductifs. Le danger de ce phénomène est qu'il peut engendrer de grandes valeurs d'impédance  $Z_n$ , de tension  $V_n$  et de courant harmonique  $I_n$  aux bornes des différents éléments composant le réseau. Lorsque ces valeurs de tension et de courant harmoniques sont trop élevées, ils peuvent endommager et même détruire les équipements qui y sont soumis. On distingue deux types de résonance selon la configuration des éléments capacitifs et inductifs [1]:



**Figure. I.1 :** Résonance parallèle et résonance série

#### a) Résonance parallèle

La présence de batteries de condensateurs dans l'installation fait apparaître des risques de résonance avec les inductances de ligne et de source pour un certain rang d'harmoniques. L'inductance et la capacité en parallèle donnent l'impédance suivante :

$$Z_n = \frac{j \sum_{i=1}^n L_n \cdot \omega}{1 - \sum_{i=1}^n L_n \cdot C_n \cdot \omega^2} \tag{I-2}$$

$Z_n$  : Les différentes impédances branchées sur le même réseau.

Il y a résonance lorsque les deux impédances inductances et capacitifs sont égaux  $XL = Xc$ , c'est-à-dire, lorsque le dénominateur de l'équation (I-1) est nul.

Avec :

$$XL = L_1\omega \times L_2\omega \times L_3\omega \dots \dots \dots \times L_n\omega . \tag{I-3}$$

$$Xc = \frac{-1}{C_1 \cdot \omega} + \frac{-1}{C_2 \cdot \omega} + \frac{-1}{C_3 \cdot \omega} + \dots + \frac{-1}{C_n \cdot \omega} \tag{I-4}$$

$$1 - \sum_{i=1}^n L_n \cdot C_n \cdot \omega^2 = 0 \quad (\text{I-5})$$

Dans ce cas, l'impédance est infinie. La fréquence de résonance est donnée par :

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (\text{I-6})$$

### b) Résonance série

L'inductance en série avec une capacité donne l'impédance suivante :

$$Z_n = \frac{1 - \sum_{i=1}^n L_n \cdot C_n \cdot \omega^2}{j \sum_{i=1}^n C_n \cdot \omega} \quad (\text{I-7})$$

Il y a résonance lorsque  $XL = Xc$ , c'est-à-dire, lorsque le numérateur de l'équation (I-6) est égal à zéro. Dans ce cas, l'impédance est nulle. La fréquence de résonance est donnée par :

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (\text{I-8})$$

## I.4.2 Échauffement dans les conducteurs et les équipements électriques

Les courants harmoniques circulant dans les conducteurs provoquent réchauffement de ceux-ci par effet Joule. Cependant, les harmoniques ne contribuent pas au transfert de puissance active, ils créent uniquement des pertes électriques et participent à la dégradation du facteur de puissance. La circulation des courants harmoniques dans les transformateurs et dans les enroulements du moteur asynchrone crée également des échauffements supplémentaires. En plus des pertes Joule, le transformateur subit des échauffements supplémentaires en présence d'harmoniques qui sont causés par les pertes fer dans le noyau magnétique. Ces dernières résultent des pertes par hystérésis et par courants de Foucault. De plus, les condensateurs sont très sensibles à la circulation de courants harmoniques de par leur impédance qui décroît en fonction de l'augmentation de la fréquence. Ces courants harmoniques circulent alors plus aisément dans le condensateur de faible impédance ce qui crée des échauffements qui risquent de le détruire.

### **I.4.3 Les bruits et vibrations**

L'effort électrodynamiques entraînant des vibrations et des bruits dans les appareils électromagnétiques et peut engendrer des Couples mécaniques pulsatoires, dus aux champs tournants harmoniques, donnant des vibrations dans les machines tournantes.

### **I.4.4 Les différences de potentiel entre masses**

La circulation de courants harmoniques dans le neutre entraîne une chute de tension dans ce conducteur. Dans le cas du SLT TN-C, les masses des différents équipements ne sont plus au même potentiel, ce qui peut être dangereux et est de nature à perturber les échanges d'informations entre deux équipements "intelligents".

### **I.4.5 Effets sur le conducteur neutre**

Dans un système équilibré, les composantes homopolaires dans le neutre sont nulles. Ceci n'est pas le cas des systèmes comportant une charge non linéaire [2]. En effet, les courants homopolaires des harmoniques de rang multiple de 3 vont s'additionner dans le conducteur neutre. L'intensité de ces courants superposés peut endommager sérieusement le câble neutre.

### **I.4.6 Dysfonctionnement d'appareils utilisant la tension comme référence**

Une tension déformée peut altérer le bon fonctionnement de certains appareils électroniques qui utilisent les passages à zéro de la tension d'alimentation pour fonctionner adéquatement. En effet, les tensions harmoniques peuvent créer des faux passages de la tension à zéro, ce qui engendre un mauvais fonctionnement pour ces appareils. Divers équipements sont sensibles à cette problématique, citons : les convertisseurs de courant, les automates programmables et certains appareils électroniques domestiques.

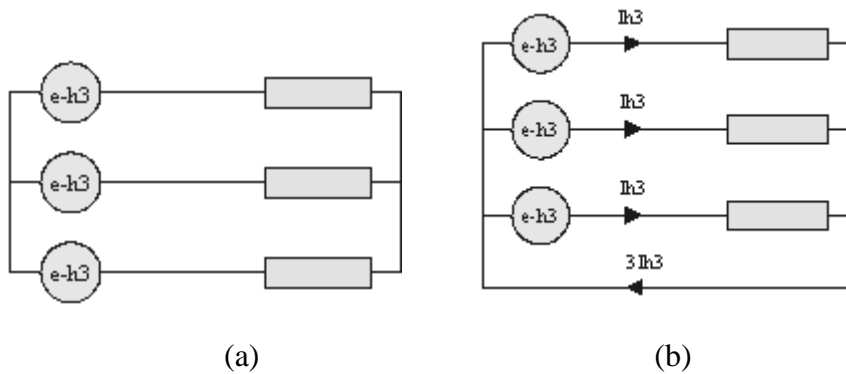
## II.1 Introduction :

Des plusieurs méthodes et des mesures adoptées pour réduire les courants harmoniques sur les réseaux de distribution. Parmi ces mesures : le surdimensionnement des éléments composant le réseau, les transformateurs, les filtres passifs et les filtres actifs. Les deux derniers moyens de mitigation mentionnés sont les plus répandus [1].

## II.2 Surdimensionnement de l'installation électrique

L'objectif n'est pas d'éliminer les courants harmoniques circulant dans l'installation électrique, mais plutôt de "faire avec", Il s'agit de limiter la circulation des courants harmoniques à une partie aussi petite que possible de l'installation. Pour un système équilibré, les harmoniques de rang  $3k$  sont en phase. En l'absence de neutre, ces courants ne peuvent circuler (figure II.1a).

Si on raccorde le neutre à un tel montage, les harmoniques de rang  $3k$  peuvent circuler dans chacune des phases, et s'additionnent dans le neutre (figure II.1 b).



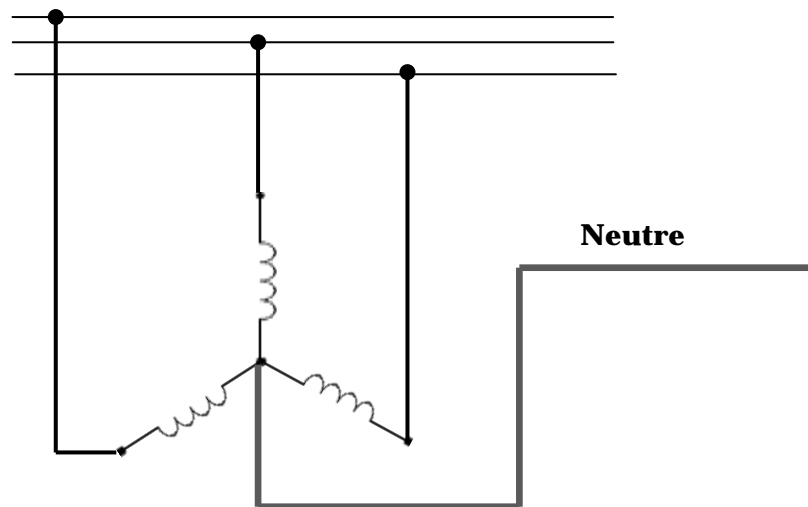
**Figure II.1** Surdimensionnement du neutre.

La présence dans le neutre de ces courants harmoniques de rang  $3k$  oblige à surdimensionner ce conducteur.

## II.3 Transformateurs spéciaux

### II.2.1 Transformateur de mise à la terre

Ce type de transformateur fournit un chemin de faible impédance, pour échapper au passage des courants harmoniques par le conducteur de neutre, l'ajout d'un transformateur de mise à la terre créant un neutre artificiel, c'est une solution efficace pour les courants harmoniques qui sont déviés dans son propre neutre. C'est donc dire, que seul le neutre du transformateur doit être en mesure de supporter ces courants.



**Figure II.2** Transformateur de mise à la terre.

Il y a aussi d'autre type de transformateur qui doivent supporter des courants déformés ;

- Transformateur de type K.
- Transformateur déphaseurs [1].

## II.4 Nécessité de Filtrage :

Ces transformateurs ne constituent pas les moyens les plus efficaces et usuels pour éliminer les harmoniques. En effet, ces montages ne fonctionnent que pour des charges qui sont équilibrées. La méthode la plus employée et efficace est celle du filtrage.

Le Filtrage des harmoniques permet d'abaisser de façon acceptable la pollution harmonique, la solution est à envisager lorsque :

- ❖ La distorsion ou les courants harmoniques dépassent les limites fixées par le distributeur d'énergie. En particulier il est recommandé que l'apport de chaque utilisateur ne dépasse pas au point de livraison MT :
  - Taux de distorsion < 1,6 %
  - Taux individuel < 1% pour les rangs impairs < 0,6 % pour les rangs pairs.
- ❖ La distorsion dépasse 5% dans une installation industrielle [5].

### II. 4.1 Filtrage passif

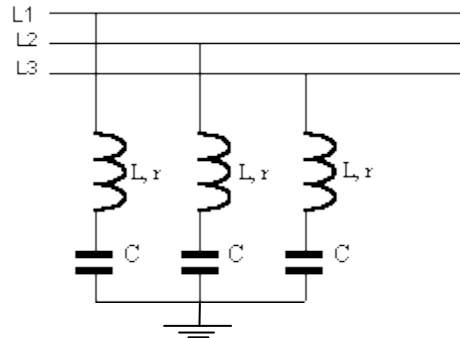
Le principe du filtrage passif est de modifier localement l'impédance du réseau afin de faire dévier les courants harmoniques et, du même coup, éliminer les tensions harmoniques résultantes. Ces filtres sont composés d'éléments capacitifs et inductifs qui sont disposés de manière à obtenir une résonance série sur une fréquence déterminée.

Il existe deux classes de filtres passifs permettant de réduire les harmoniques :

- ❖ le shunt résonant ;
- ❖ le filtre amorti.

#### a) Le shunt résonant

Le shunt résonant est constitué d'un condensateur monté en série avec une inductance. Ces éléments sont placés en dérivation sur l'installation et accordés sur un rang d'harmonique à éliminer. L'impédance de cet ensemble est très faible pour sa fréquence d'accord  $f_r$ , et se comporte ainsi comme un court circuit pour l'harmonique considéré [5].



**Figure II.3.a** Filtrage passif ; *shunt résonant*

La fréquence de résonance «  $f_r$  » de tel filtre est représenté comme suit :

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

Cette finalité diffère totalement de celle de l'inductance anti-harmonique qui n'est pas en accord sur un des rangs d'harmoniques et dont le rôle est de protéger une batterie de condensateurs contre les surcharges harmoniques. Toutefois les shunts résonants participent à la compensation de l'énergie réactive d'une installation.

En principe, on trouvera autant de shunts résonants que d'harmoniques à éliminer. Pratiquement la lourdeur de cette solution et le risque de voir apparaître des résonances avec les autres inductances du réseau sur d'autres fréquences conduisent à limiter à deux ces types de filtres.

L'emploi de filtres shunts résonants imposent les précautions suivantes :

- ❖ S'assurer que la fréquence d'anti-résonance soit suffisamment éloignée du rang harmonique à piéger pour ne pas amplifier la déformation de la tension à cette fréquence.
- ❖ Penser que l'existence d'harmoniques préexistants sur le réseau peut entraîner un échauffement supplémentaire des condensateurs.

### b) Les filtres amortis

Le montage d'un nombre élevé de shunts résonants en batterie n'étant pas économique, la solution est de faire appel à un filtre large bande. Le filtre amorti d'ordre deux est constitué d'un shunt résonant auquel est adjointe une résistance d'amortissement.

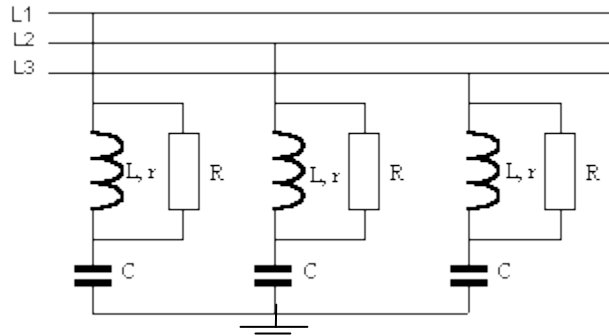


Figure II.3.b Filtrage passif ; *filtres amortis*

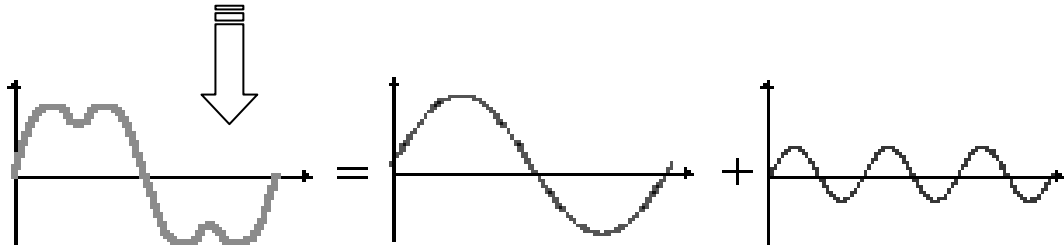
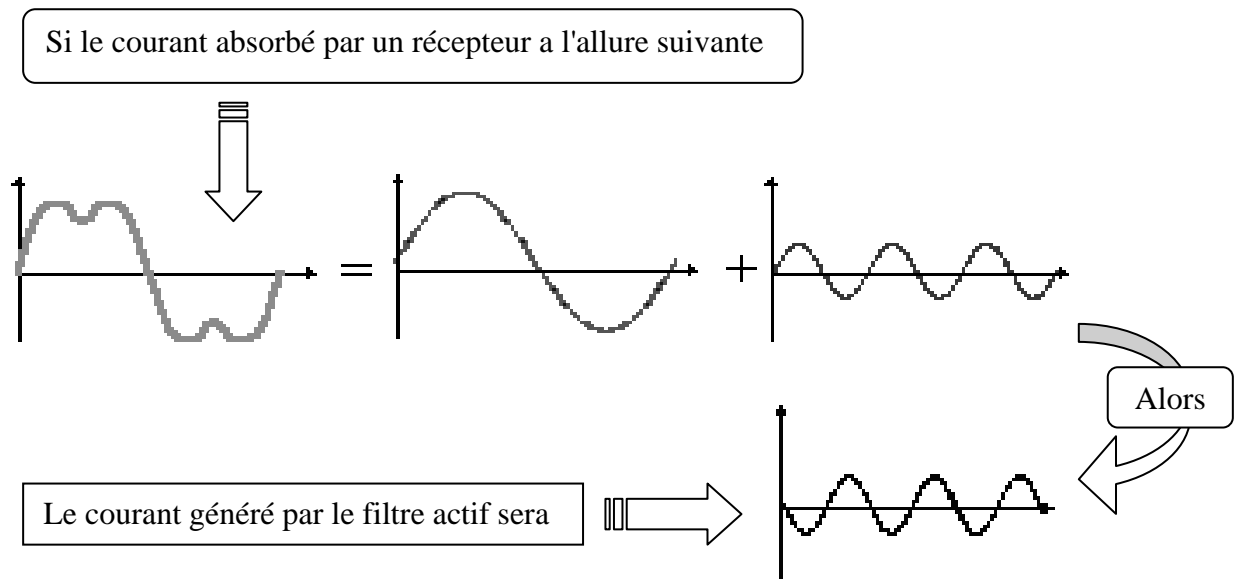
La fréquence de résonance ( $f_r$ ) d'un tel filtre est :

$$f_r = \frac{1 + R.r}{2\pi r(R^2 - 1)LC} \quad (\text{II.2})$$

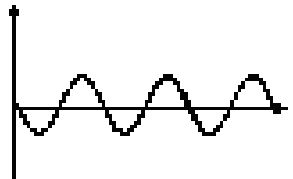
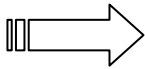
### II. 4.2 Filtres Actifs

Les systèmes précédents, filtres passifs, ne font que modifier des impédances ou font s'opposer certains courants harmoniques. Aujourd'hui la dépollution harmonique peut être traitée par l'utilisation des convertisseurs statiques.

Un filtre actif est un convertisseur statique qui permet d'injecter dans le réseau des harmoniques en opposition de phase et d'amplitude, telle que l'onde résultante soit sinusoïdale. Pour cela, il génère un courant qui est composé des seuls harmoniques (même amplitude et en opposition de phase) du courant dans la charge.



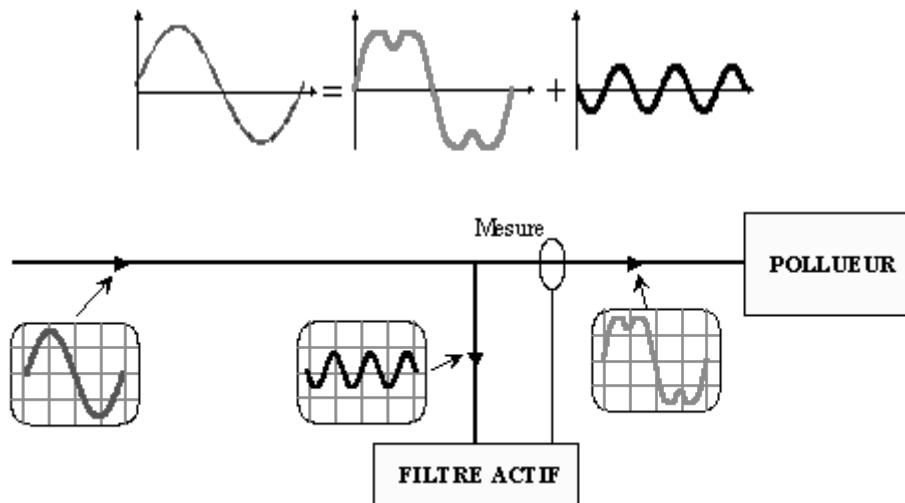
Le courant généré par le filtre actif sera



Alors

**Figure II.4 a** Décomposition en composants harmoniques [4]

Le courant en ligne qui est égal au courant absorbé par le récepteur plus le courant généré par le filtre sera sinusoïdal :



**Figure II.4.b** Décomposition en composants harmoniques [4].

## II.5 Classification des filtres actifs

Les filtres actifs peuvent être classifiés à partir du type de convertisseur qu'ils utilisent, de leur topologie ou encore de leur nombre de phases. Nous nous limiterons ici à la classification selon leurs différentes topologies. Suivant leurs topologies, les filtres actifs peuvent être en série, en parallèle ou mixtes [4].

### a) Filtre actif série

Il est placé en série entre la source et la charge non linéaire pour forcer le courant de la source à être sinusoïdal. Cette approche est basée sur le principe d'isoler les harmoniques par le contrôle de la tension de sortie du filtre actif série. En d'autres mots, le filtre actif série présente une impédance élevée au courant harmonique, ce qui isole ces courants les empêchant ainsi d'aller vers la source ou vers la charge. Il se comporte donc, comme une source de tension contrôlable. Il est surtout utilisé pour filtrer les harmoniques générés par les charges de tensions harmoniques [6, 7, 8].

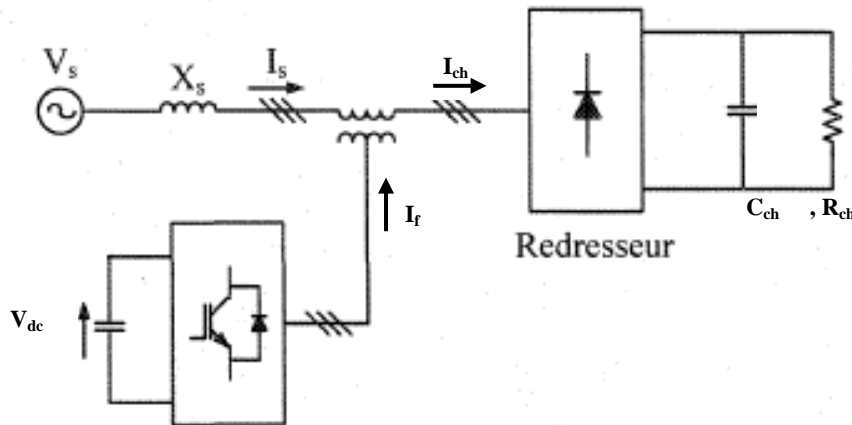


Figure II.5 filtre actif série.

## b) Filtre actif parallèle

Contrairement au filtre actif série, le filtre actif parallèle est surtout utilisé pour éliminer les courants harmoniques engendrés par les charges génératrices de courants harmoniques. Il peut cependant, dans certaines conditions, être utilisé pour compenser la puissance réactive (STATCOM), pour amortir les résonances parallèle ou série dues à l'interaction entre la ligne et le filtre passif et pour balancer des courants déséquilibrés. C'est un onduleur modulé en largeur d'impulsion (MLI) qui est placé en parallèle avec la charge dans le but d'injecter un courant harmonique de même amplitude et de phase opposée que celui de la charge. Le filtre actif parallèle agit comme une source de courant harmonique réglable [4, 6, 7, 8].

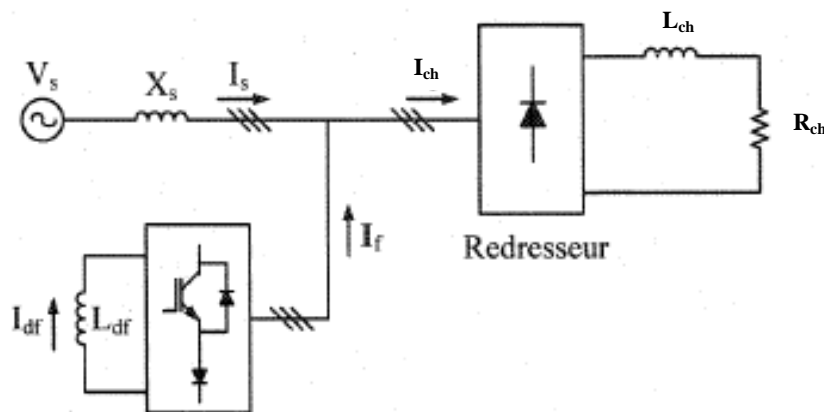
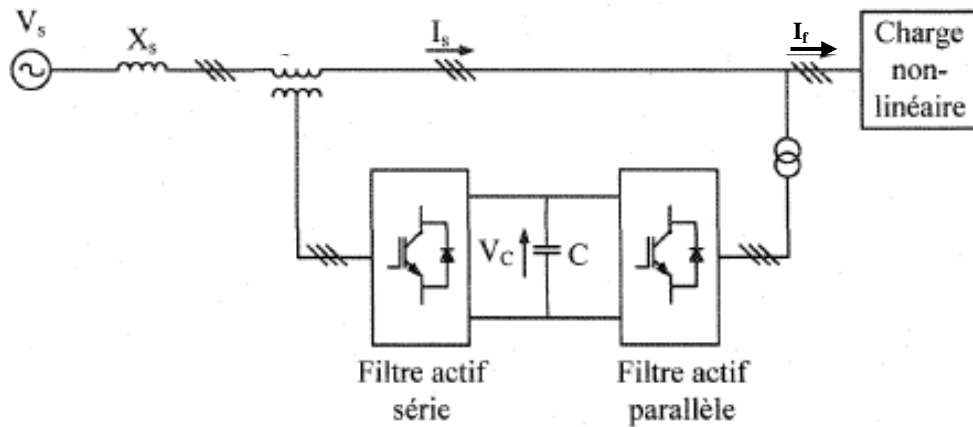


Figure II.6 filtre actif parallèle.

## c) Conditionneur universel de la qualité d'onde

La combinaison d'un filtre actif série et d'un filtre actif parallèle se nomme conditionneur universel de la qualité d'onde (UPQC), de son origine anglaise, « Unified Power Quality Conditionner ». Cette structure permet d'aller chercher plusieurs fonctions simultanément servant à améliorer la qualité de la tension (compensation d'harmoniques, de puissance réactive, régulation et stabilisation de tension, etc.). Le filtre actif série a pour principales fonctions d'isoler les harmoniques entre la source et la charge polluante, de compenser la puissance réactive et les tensions déséquilibrées. Le rôle du filtre actif parallèle est d'absorber les courants harmoniques, de compenser la puissance réactive, de compenser les courants de séquence négative et de faire la régulation de la capacité du côté *ce* entre les deux filtres actifs [4,9].



**Figure. II.7** Combinaison filtre actif série et filtre actif parallèle.

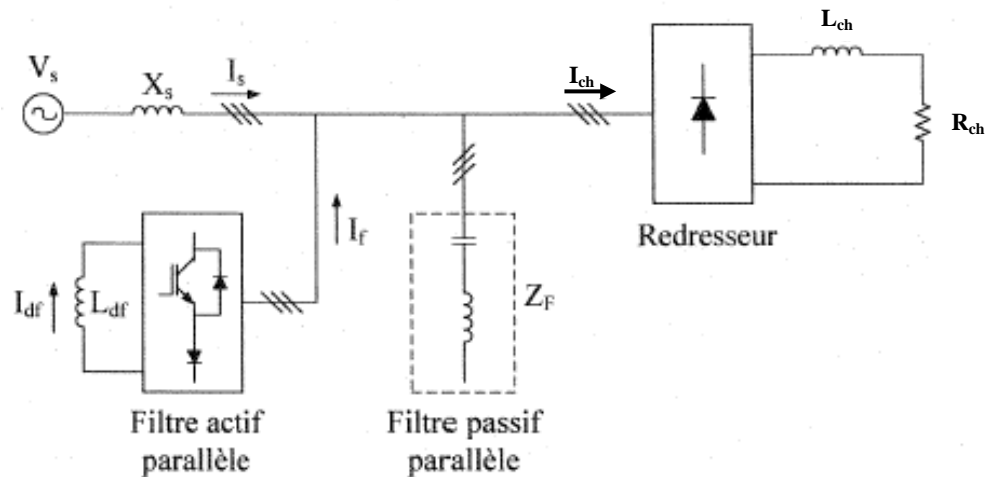
#### d) Filtre actif hybride

Également, il y a l'association d'un filtre actif avec un filtre passif que l'on appelle filtre hybride. Le rôle du filtre actif est de maintenir et d'améliorer les performances de filtrage en fonction de l'évolution de la charge et du réseau, tandis que le filtre passif s'occupe de la compensation d'une bonne partie des harmoniques.

Plusieurs combinaisons de filtres hybrides sont possibles [4,7]. Il est à noter que très peu de structures hybrides ont été réalisées au niveau pratique. Nous nous contenterons ici d'en exposer quelques-unes parmi les plus connues.

##### d. 1) Filtre hybride parallèle

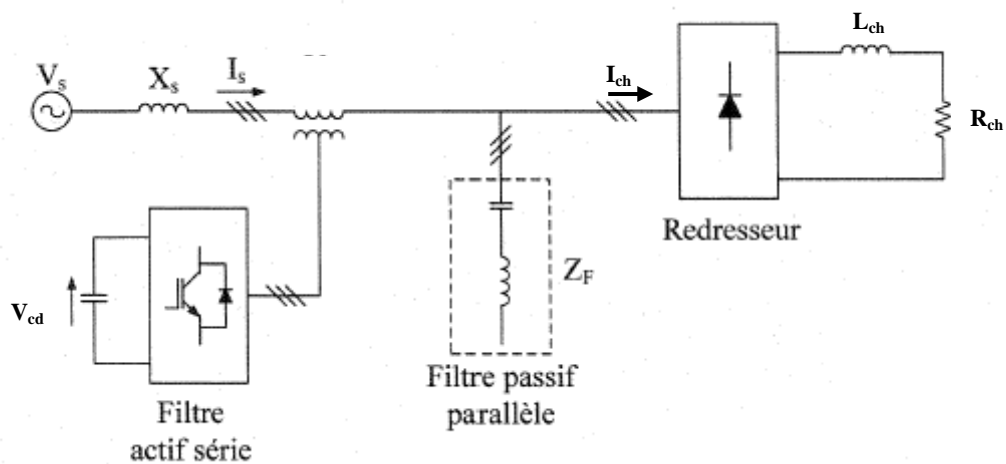
Dans cette topologie, le filtre passif parallèle est davantage approprié pour la compensation d'harmoniques de faible rang (5<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> rangs par exemple). Pour ce qui est du filtre actif parallèle, il est davantage approprié pour la compensation des harmoniques de rang élevé. Donc, lors de la conception de ce type de filtre, il est important de bien faire le partage de compensation entre les deux filtres. En outre, le filtre actif parallèle peut être utilisé pour éliminer la résonance entre l'impédance de source et le filtre passif parallèle. Le filtre actif parallèle agit dans ce cas comme une résistance variable qui amortit les harmoniques [6].



**Figure II.8** Filtre hybride parallèle [3].

#### d.2) Filtre hybride série

Le filtre hybride série est composé d'un FAS et d'un FPP. Le FAS est utilisé pour éliminer les problèmes (comme la résonance et l'influence de l'impédance de source) engendrés par le FPP et améliorer les performances de compensation. Le FPP a pour rôle de dévier les courants harmoniques par sa capacité de modifier localement l'impédance du réseau [6].



**Figure II.9** Filtre hybride série [3].

## II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons montré les différents remèdes contre la pollution harmonique qui affecté l'onde de tension du réseau électrique. Comme nous avons pu le constater, les harmoniques ont des effets néfastes sur les équipements électriques jusqu'à la destruction totale.

Plusieurs solutions traditionnelles et modernes de dépollution ont été présentées. Le surdimensionnement des éléments composant le réseau, les transformateurs spéciaux, le filtrage passif et le filtrage actif sont toutes des méthodes qui utilisées pour minimiser le taux d'harmonique dans le réseau.

Les filtres passifs dimensionnés par calcul, ils sont faits d'étages comportant chaque fois un circuit LC ciblé sur un harmonique donné. Sur tout les 5eme et 7eme harmoniques sont visés mais le dimensionnement dépend du spectre d'harmonique et de l'impédance de la source, ce qui fait que cette méthode manque de souplesse

Le filtre actif s'adapte continuellement aux variations des harmoniques, il peut éliminer tant les harmoniques d'une charge par rapport au filtre passif, il présente des avantages évidents non seulement compenser les harmoniques, mais améliorer la qualité de l'énergie du réseau électrique. Le chapitre suivant traitera la structure des filtres actifs et leurs commandes

### III.1 Introduction

L'utilisation des filtres actifs contribue à la minimisation des harmoniques surviennent dans le réseau de distribution de l'énergie électrique, causés par la connexion des charges non linéaires.

Plusieurs travaux de recherche consiste à améliorer les performances des compensateurs du filtre actif parallèle, vu ces avantages, tel que l'adaptation aux variations de la charge.

Un filtre actif est un dispositif qui exploite au moins un convertisseur statique pour satisfaire la fonction de « dépollution harmonique ».

A fin d'atteindre les objectifs d'améliorations des performances des filtres actifs, nous aborderons une structure de filtre actif parallèle associant un filtre du troisième ordre, nous étudierons l'ensemble des contraintes et les méthodes de régulation. Ensuite, nous analyserons les améliorations et les dégradations en termes de compensation.

### III.2 Structure du filtre actif

La structure d'un filtre actif parallèle se compose en deux parties, soit d'une partie puissance et d'une partie commande. La partie puissance se compose d'un onduleur à base d'interrupteurs de puissance, commandables à l'amorçage et au blocage (GTO, IGBT,... etc.) avec des diodes en antiparallèle, d'un filtre de couplage et d'un élément passif fait un circuit de stockage d'énergie, souvent capacitif.

La partie commande, sert au contrôle de la commutation des éléments onduleur, la méthode d'identification des courants perturbés. [1]

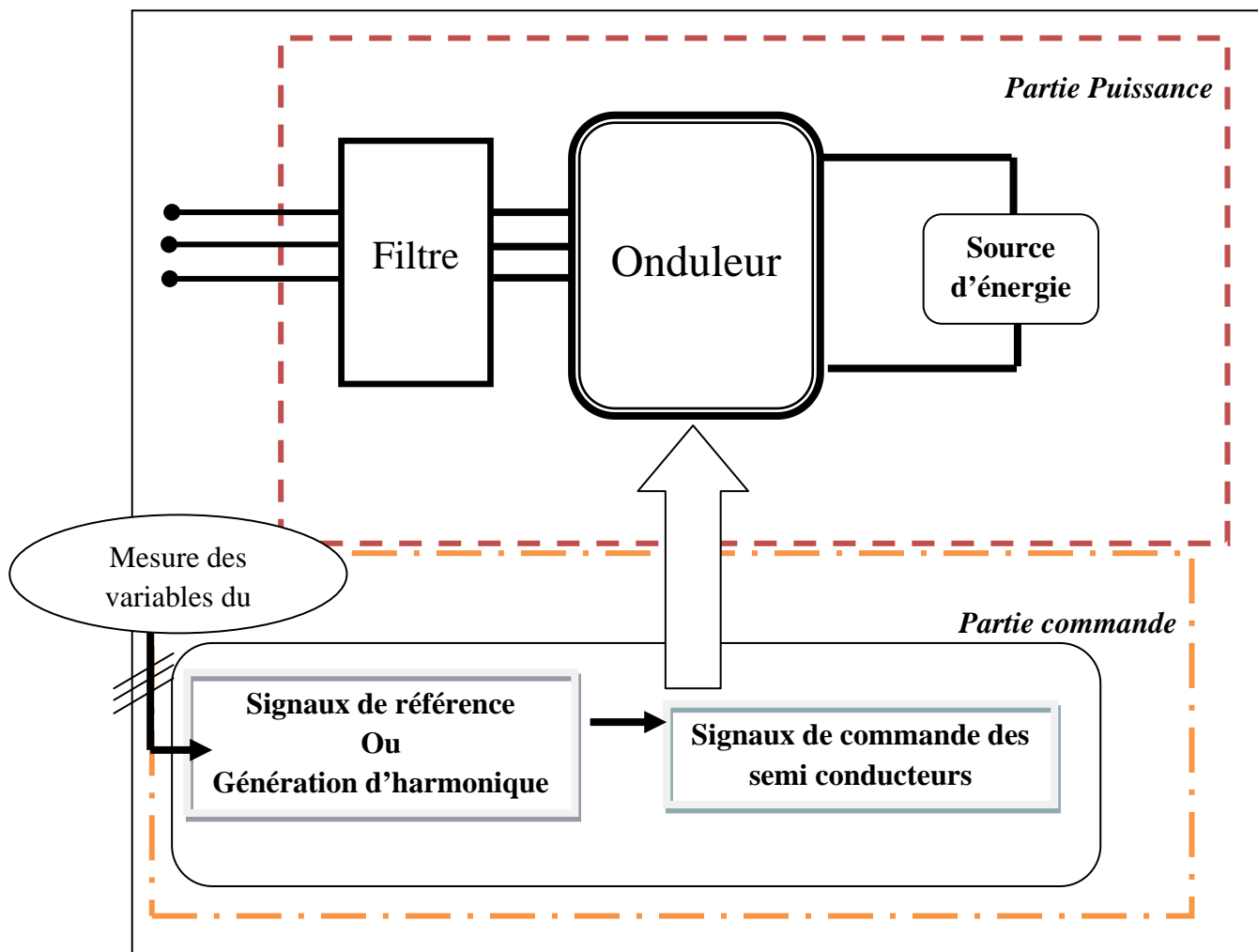


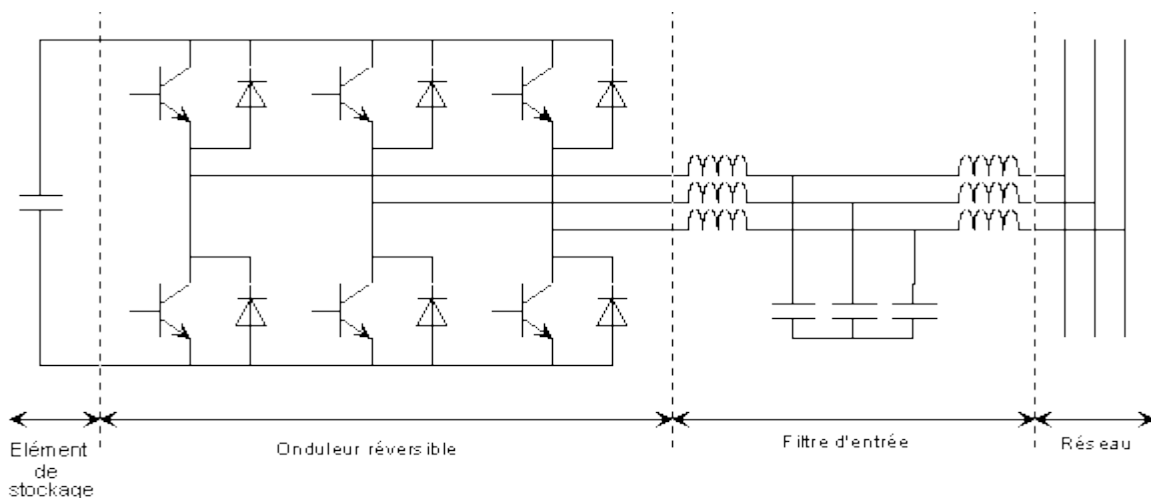
Figure III.1 : Structure générale d'un filtre actif parallèle.

L'onduleur est la partie essentielle du filtre actif. Quelque soit le type de filtre qui est relié au réseau ou bien l'élément passif qui lui sert de source d'énergie, il s'agira toujours d'un onduleur de tension ou de courant. L'onduleur peut être commandé en tension ou en courant et peut donc se comporter comme une source de tension ou de courant vis-à-vis du circuit extérieur. En pratique, suivant le type de correction à apporter au réseau, une structure sera préférée à l'autre si elle rend plus aisée et moins onéreuse la réalisation de l'ensemble convertisseur commande.

La source d'énergie composant le filtre peut être une source de tension ou de courant. Comme l'onduleur n'a pas à fournir de puissance active, cette source peut être un élément réactif, condensateur ou inductance, dans lequel on maintient constante la valeur moyenne de l'énergie stockée [10,11]. Cet élément de stockage d'énergie n'a pas besoin d'être lui-même alimenté par une source continue. La raison est que le filtre actif peut être contrôlé de manière à suppléer aux pertes de sa source d'énergie à partir du courant fondamental générée par la source du réseau auquel il est connecté.

### III.2.1 Filtre actif parallèle à structure de tension

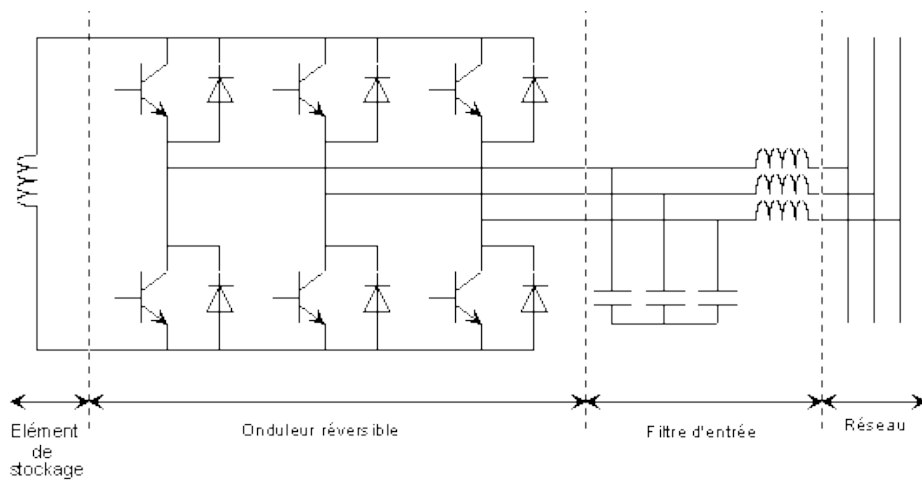
La figure III.2 illustre le filtre actif parallèle à structure de tension. Seul le circuit de stockage caractérise la structure, une capacité ou une inductance servant de source d'énergie est la capacité  $C$  qui doit délivrer une tension à valeur presque constante est inférieure à la tension supportable par les semi-conducteurs. De plus, l'inductance  $L_f$  du filtre à des limites, car cela affecterait les performances de compensation du filtre actif. L'inductance par laquelle l'onduleur est relié au réseau sert à filtrer les courants harmoniques hautes fréquences. Ces courants harmoniques sont causés par les impulsions de tension générées par l'onduleur.



**Figure III.2 :** filtre actif parallèle à structure de tension.

### III.2.2 Filtre actif parallèle à structure de courant

Sur la figure suivante est illustré le filtre actif parallèle à structure de courant. Seule l'inductance et le filtre passe-bas de deuxième ordre de sortie caractérisent cette structure. L'élément servant de source d'énergie est l'inductance ( $L_{df}$ ) qui doit délivrer un courant continu de valeur quasi constante, la présence du filtre de couplage sert à filtrer les tensions harmoniques générées par les courants de l'onduleur. Dans le but, d'éliminer le phénomène de résonance, des résistances peuvent être insérées dans le filtre passe-bas.



**Figure III.3 :** filtre actif parallèle à structure de courant

Ce type de filtre peut être installé directement aux bornes du récepteur pollueur pour assurer une dépollution locale et au niveau du TGBT pour assurer une dépollution globale.

### III.3 Stratégie de commande

La stratégie de commande se base sur la détection des courants perturbateurs dans le domaine temporel. Trois possibilités d'identification des courants perturbateurs ont déjà été proposées [12,13]:

- Identification à partir de la détection du courant de la charge polluante
- Identification à partir de la détection du courant de la source
- Identification à partir de la détection tension de la source.

La méthode la plus utilisée est celle appelée méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées proposé par **AKAGI**, Cette méthode est valide aussi bien en régime permanent qu'en régime transitoire.

En présence des harmoniques, la puissance apparente est composée de trois parties active, réactive et déformante.

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (\text{III.1})$$

Notons respectivement les tensions simples et les courants de ligne d'un système triphasé sans composante homopolaire par  $(v_a, v_b, v_c)$  et  $(i_a, i_b, i_c)$ . La transformation de Concordia permet de ramener ce système triphasé équilibré à un système diphasé dont les axes sont en quadrature. Cette transformation appliquée aux tensions du réseau et aux courants de ligne mène à :

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.2})$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.3})$$

La puissance réelle instantanée  $p$  et la puissance réactive instantanée  $q$  peuvent être exprimées de façon équivalente en système biphasé par [14] :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{III.4})$$

Ce qui nous donne :

$$\text{Puissance réelle instantanée : } p = v_\alpha \cdot i_\alpha + v_\beta \cdot i_\beta \quad (\text{III.5})$$

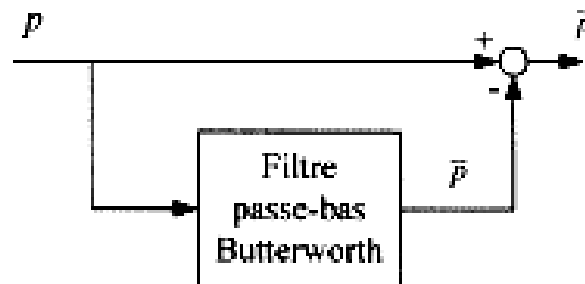
$$\text{Puissance imaginaire instantanée : } q = v_\alpha \cdot i_\beta - v_\beta \cdot i_\alpha \quad (\text{III.6})$$

La puissance réelle instantanée ainsi que la puissance imaginaire instantanée peuvent être exprimées de la façon suivante [15-16] :

$$\begin{cases} p = p^- + p^\sim \\ q = q^- + q^\sim \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

Où  $p^-$  et  $q^-$  sont, de façon respective, les composantes des puissances moyennes actives et réactives correspondant au courant de charge fondamentale (50 Hz), alors que  $p^\sim$  et  $q^\sim$  correspondent aux composantes alternatives liées au courant harmonique. La compensation d'harmoniques par le filtre actif se fait par la génération de ces dernières.

En conséquence, l'élimination de la composante fondamentale dans les équations (III.7) s'effectue à l'aide de deux filtres passe-bas de Butterworth d'ordre deux.



**Figure III.4** : Filtrage de la composante de la puissance continue.

De la relation (III.4) donnant les puissances réelle et imaginaire instantanées découle l'expression suivante pour les courants :

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{III.8})$$

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

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p^- \\ 0 \end{bmatrix}}_{\text{courant actif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ q^- \end{bmatrix}}_{\text{courant réactif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p^\sim \\ q^\sim \end{bmatrix}}_{\text{courant harmonique}} \quad (\text{III.9})$$

Avec :  $\Delta = V^2\alpha + V^2\beta$

Cette expression permet d'identifier les références du courant dans le repère  $\alpha$ - $\beta$ . Les courants triphasés sont obtenus à partir des courants diphasés  $i_\alpha$  et  $i_\beta$  par la transformation inverse de Concordia :

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

L'algorithme de la figure III.5 illustre la méthode d'identification des différents courants de référence pour la partie parallèle du filtre.

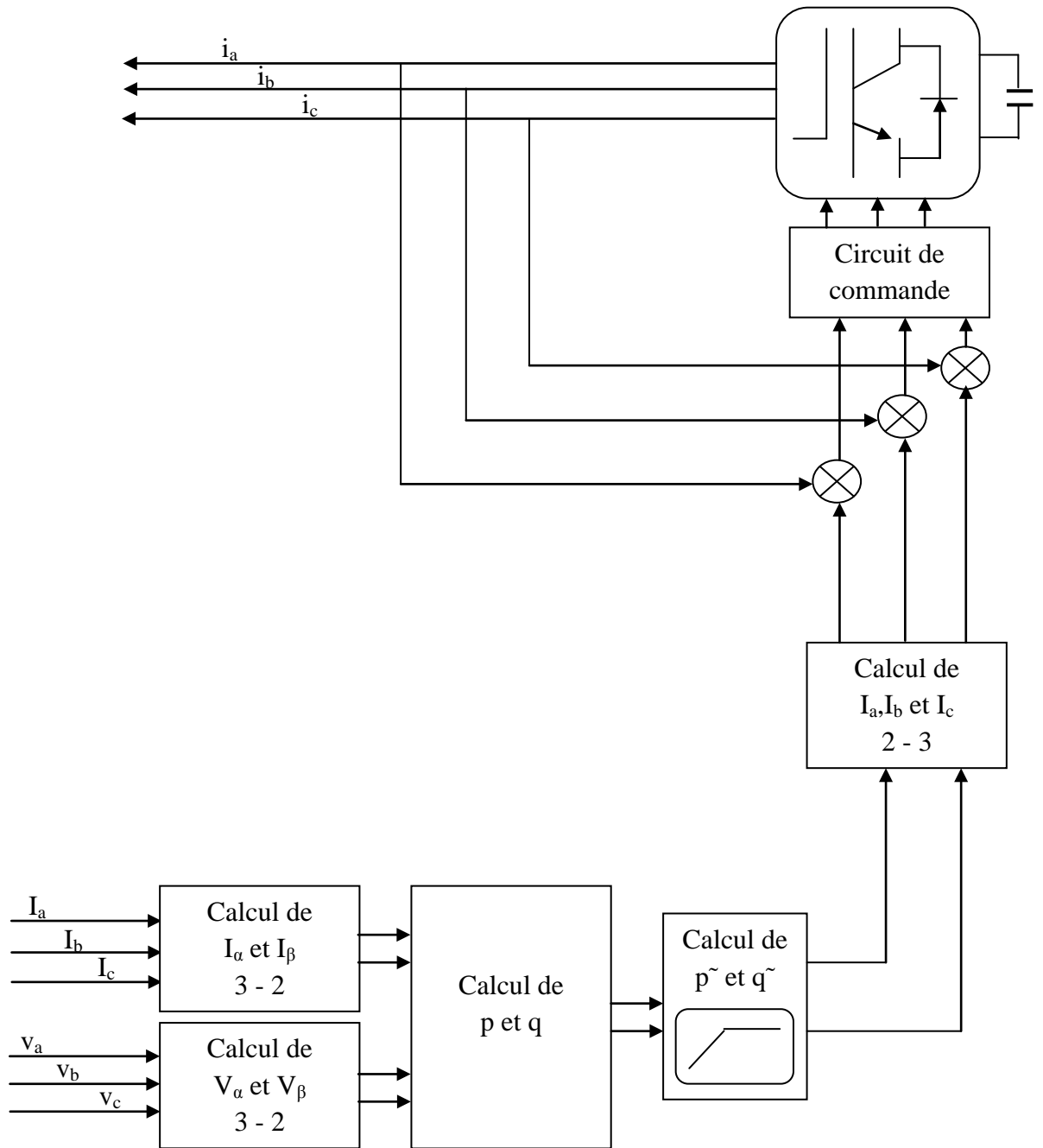


Figure III.5 : Filtre actif commandé par la méthode des puissances instantanées.

La méthode des puissances instantanées possède les quelques caractéristiques suivantes :

- Elle est une théorie inhérente aux systèmes triphasés.
- Elle peut être appliquée à tout type de systèmes triphasés (équilibré ou déséquilibré, avec ou sans harmonique).
- Elle est basée sur des valeurs instantanées, ce qui lui donne de bons temps de réponse dynamique.
- Le nombre d'harmoniques compensé dépend de la bande passante des semi-conducteurs composant l'onduleur du filtre actif.
- Méthode de calcul simple (elle n'est composée que d'expression algébrique et peut être implémentée à l'aide d'un processeur standard).

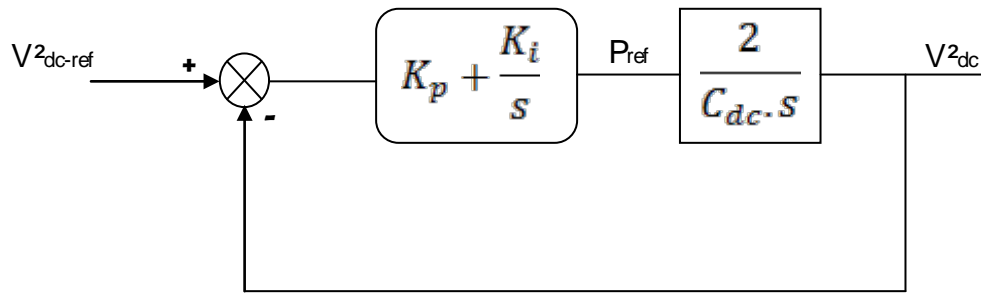
### **III.4 La régulation et l'adaptation du filtre actif :**

Pour que le filtre actif s'adapte aux variations de la charge on doit agir sur deux paramètres essentiels qui sont la tension continue à l'entrée de l'onduleur et le courant du filtre actif parallèle.

#### ***III.4.1 Régulation de la tension continue***

La tension moyenne  $V_{dc}$  aux bornes du condensateur doit être maintenue à une valeur fixe. Les principales causes susceptibles de la modifier sont les pertes dans le filtre actif (semi-conducteur et filtre de sortie). La régulation de la tension moyenne aux bornes du condensateur de stockage d'énergie doit se faire par l'adjonction des courants fondamentaux actifs dans les courants de référence.

Suite à un écart entre  $V_{DC-ref}$  et  $V_{DC}$ , la puissance  $P_{ref}$  à la sortie du régulateur s'ajoute à la puissance active fluctuante et donne lieu à un courant fondamental actif corrigeant ainsi la tension  $V_{DC}$ . Afin d'obtenir le signal  $P_{ref}$ , nous avons le choix entre un régulateur proportionnel et un régulateur proportionnel intégral. Ce dernier est souvent préférable du fait qu'il permet d'annuler l'erreur statique [15].



**Figure III.6** Régulateur de la tension continue

Nous avons la fonction de transfert de la boucle fermée :

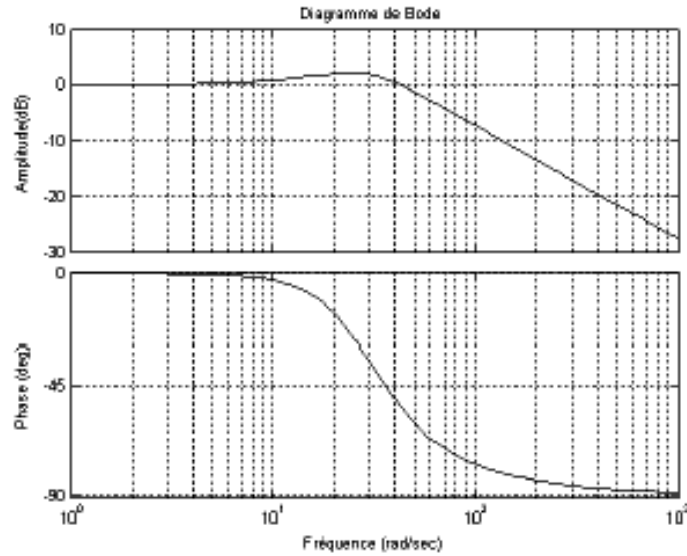
$$\frac{V^2_{dc}}{V^2_{dc\_ref}} = \frac{\frac{2K_p}{c}s + \frac{2K_i}{c}}{s^2 + \frac{2K_p}{c}s + \frac{2K_i}{c}}$$

Avec

$$\omega^2 = \frac{2K_i}{c} \quad \text{et} \quad \xi = K_p \sqrt{\frac{1}{2C_{dc} \cdot K_i}} \quad (\text{III.11})$$

Pour avoir un bon coefficient d'amortissement du système en boucle fermée, nous avons choisi  $\xi = 0.7$ . Afin d'atténuer les fluctuations à 300 Hz, nous pouvons choisir la pulsation de coupure jusqu'à  $\frac{2\pi \cdot 300}{5}$  avoir un bon filtrage nous avons choisi  $\omega_i$  égale à 30 rad/sec.

La figure III.7 montre le diagramme de Bode du système de régulation de la tension continue [17].



**Figure III.7** Diagramme de Bode de la fonction de transfert

$$\frac{V_{dc}^2}{V_{dc\_ref}^2}$$

### III.4.2 Commande de l'onduleur

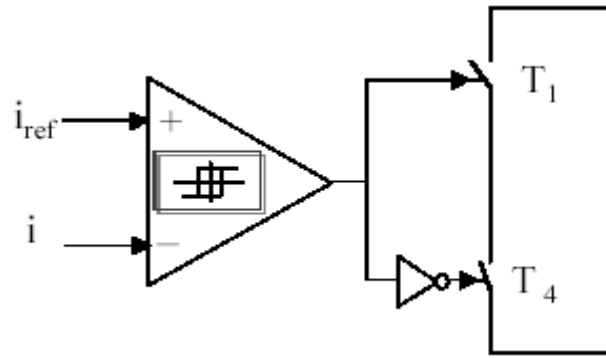
L'objectif de la commande est de générer les ordres d'ouverture et de fermeture des interrupteurs de sorte que la tension créée par l'onduleur soit la plus proche de la tension de référence. Deux méthodes de commande peuvent être utilisées :

- commande par hystérésis,
- commande par MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion)

#### III.4.2.1 Commande par hystérésis

Le principe de contrôle des courants par hystérésis consiste à maintenir chacun des courants générés dans une bande enveloppant les courants de référence. Chaque violation de cette bande donne un ordre de commutation.

En pratique, c'est la technique schématisée sur la figure III.7 que l'on utilise. La différence entre le courant de référence et celui mesuré est appliquée à l'entrée d'un comparateur à hystérésis dont la sortie fournit directement l'ordre de commande des interrupteurs du bras correspondant de l'onduleur [18].

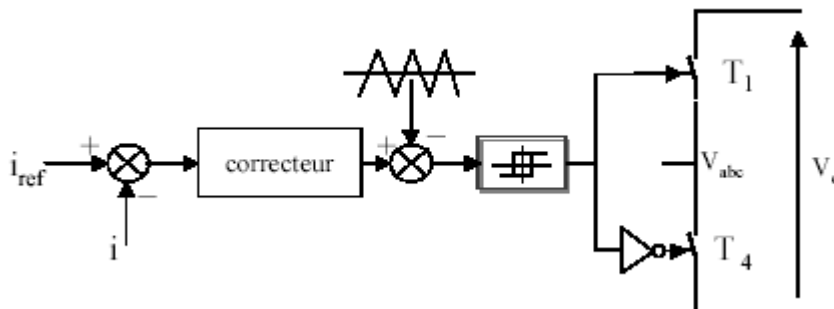


**Figure III.8 :** Contrôle de courant par hystérésis

La simplicité de la mise en œuvre de cette stratégie est son avantage, tandis que la fréquence de commutation variable peut être son inconvénient. Celui-ci peut être remédié par une autre version de contrôle par l'hystérésis avec une fréquence de commutation fixe [19].

#### III.4.2.2 Commande par MLI

La méthode basée sur la MLI met en œuvre d'abord un régulateur qui, à partir de l'écart entre le courant et sa référence, détermine la tension de référence de l'onduleur (modulatrice). Cette dernière est ensuite comparée avec un signal en dent de scie à fréquence élevée (porteuse). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs. Le schéma de principe de cette méthode est donné sur la figure III.20 [18].



**Figure III.9 :** Contrôle de courant par MLI

La rapidité du contrôle par hystérésis à réagir au changement brusque de référence, donne des performances dynamiques et statiques meilleures. Malgré ces avantages, nous avons choisi la commande par MLI car le filtre actif a besoin d'une fréquence fixe pour les commutations dans les fortes puissances.

L'objectif de la régulation de la partie parallèle est de contrôler le courant à la sortie de l'onduleur parallèle. La mise au point d'un régulateur doit prendre en compte les critères suivants :

1. La bande passante du régulateur doit être assez large afin de ne pas introduire un retard important,
2. Le fonctionnement de la régulation ne doit pas être perturbé par les harmoniques dus aux découpages de l'onduleur. Ces harmoniques doivent être atténués à la sortie du régulateur.

Nous avons comparé les performances de deux types de régulateur :

- ✓ régulateur proportionnel P
- ✓ régulateur PI

#### III.4.2.2.1 régulateur proportionnel P

En négligeant les effets de la capacité  $C_{dc}$  et des résistances du filtre de sortie sur le courant de référence  $I_{inj}$  (pour les harmoniques basses fréquences qui sont loin de la fréquence de commutation), nous pouvons écrire la relation suivante caractérisant le courant du filtre actif  $I_{inj}$  [3]:

$$L_f \frac{d}{dt} \vec{I}_{inj} = \vec{v}_f - \vec{v}_s \quad (\text{III.12})$$

Avec :  $L_f = L_{f1} + L_{f2}$ .

Notons par  $\Delta \vec{I}_f$  la différence entre le courant de référence et le courant mesuré à partir de la relation suivante

$$\Delta \vec{I}_f = \vec{I}_{ref} - \vec{I}_{inj} \quad (\text{III.13})$$

Des équations (III.12) et (III.13), nous obtenons l'expression ci-dessous :



Pour que  $V_{f\_ref}$  soit égal à  $V_f$ , nous choisissons  $G_0$  égal à 1. donc nous pouvons simplifier le schéma de la régulation de courant comme indiqué sur la figure III.10.

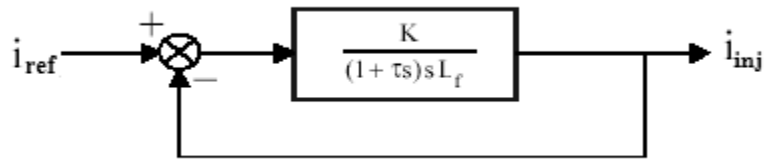


Figure III.11 : Schéma simplifié de la régulation

Il en résulte la fonction de transfert de la boucle fermée :

$$\frac{I_{inj}}{I_{ref}} = \frac{\omega_i^2}{s^2 + 2\xi_i\omega_i s + \omega_i^2} \quad (\text{III.17})$$

Avec :

$$\omega_i = \sqrt{\frac{K}{L_f}} \quad \text{et} \quad \xi_i = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L_f}{K \cdot \tau}}$$

Nous obtenons donc, un filtre passe bas du 2<sup>ème</sup> ordre avec une pulsation de coupure  $\omega_i$ . Nous avons pris  $\xi_i$  égale à 0.7. Pour bien filtrer les pulsations dues à la fréquence de porteuse (12 k Hz), nous avons choisi la pulsation de coupure  $\frac{2\pi \cdot 12000}{10} \text{ rad/sec}$ .

Le diagramme de Bode de cette fonction est donné sur la figure III.12.

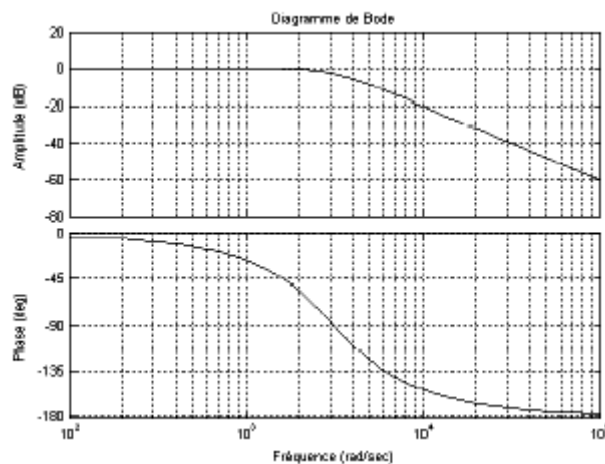


Figure III.12 : Diagramme de bode de la fonction de transfert  $\frac{I_{inj}}{I_{ref}}$

### III.4.2.2 Régulateur PI

Nous utilisons un régulateur PI représenté sur la figure III.13 :

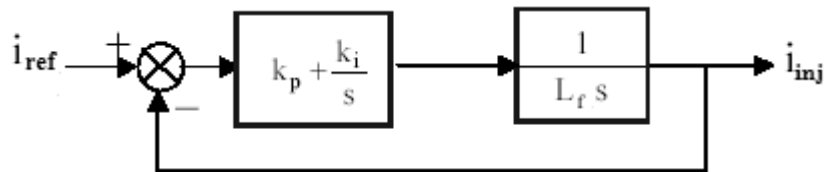


Figure III.13 : Schéma bloc de la régulation PI

La fonction de transfert de la boucle fermée est :

$$\frac{I_{inj}}{I_{ref}} = \frac{1}{1 + \frac{L_f}{K_p} s} = \frac{1}{1 + \tau s} \quad (\text{III.18})$$

Avec

$$K_i = K_p \frac{R_f}{L_f}$$

Nous obtenons donc, un filtre passe bas du 1<sup>er</sup> ordre avec une constante de temps  $\tau$ . Le diagramme de Bode de cette fonction est donné sur la figure III.14.

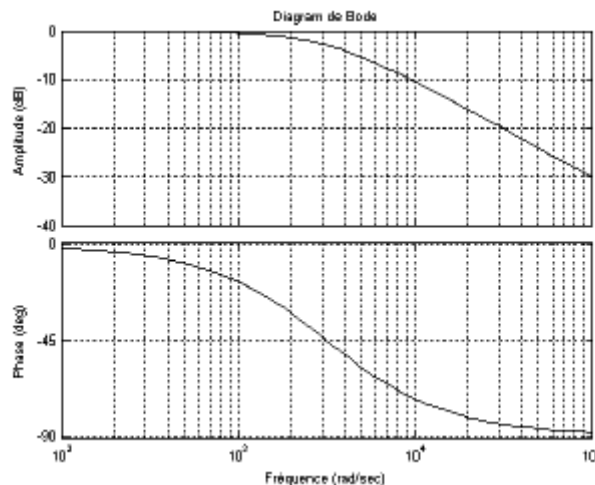


Figure III.14 : Diagramme de bode de la fonction de transfert  $\frac{I_{inj}}{I_{ref}}$

Le régulateur PI calculé assure une bonne régulation. D'autres méthodes de régulation peuvent aboutir à une réponse du second ordre en boucle fermée sans compenser le pôle du processus régulé.

### III.5. Paramètres de la simulation :

#### III.5.1 Présentation du logiciel :

**SIMULINK**, complément de l'environnement MATLAB et de ses boîtes à outils, célèbre d'être un outil incontournable pour l'ingénierie et la recherche scientifique, permet la modélisation et la simulation des systèmes dynamique, analogiques, discrets ou hybrides, en utilisant une représentation graphique sous forme de schémas blocs, aboutissant ainsi à la création de bibliothèque personnalisées [20].

L'une des principales options dans la boîte à outils de l'interface graphique SIMULINK est la « SIMULINK LIBRARY BROWSER », où existent tous les outils analogiques et numériques, les plus connus sous forme de blocs, dont on a besoin pour construire un modèle de résolution « SOLVER » le temps de simulation, ainsi que la précision relative et absolue voulue.

Maintenant, on va exposer le modèle du filtrage actif parallèle qu'on a conçu dans SIMULINK.

#### III.5.2 Modèle Réseau - charge polluante - filtre actif parallèle :

La figure III.15 montre le modèle sous SIMULINK de l'ensemble Réseau – Charge polluante filtre actif parallèle.

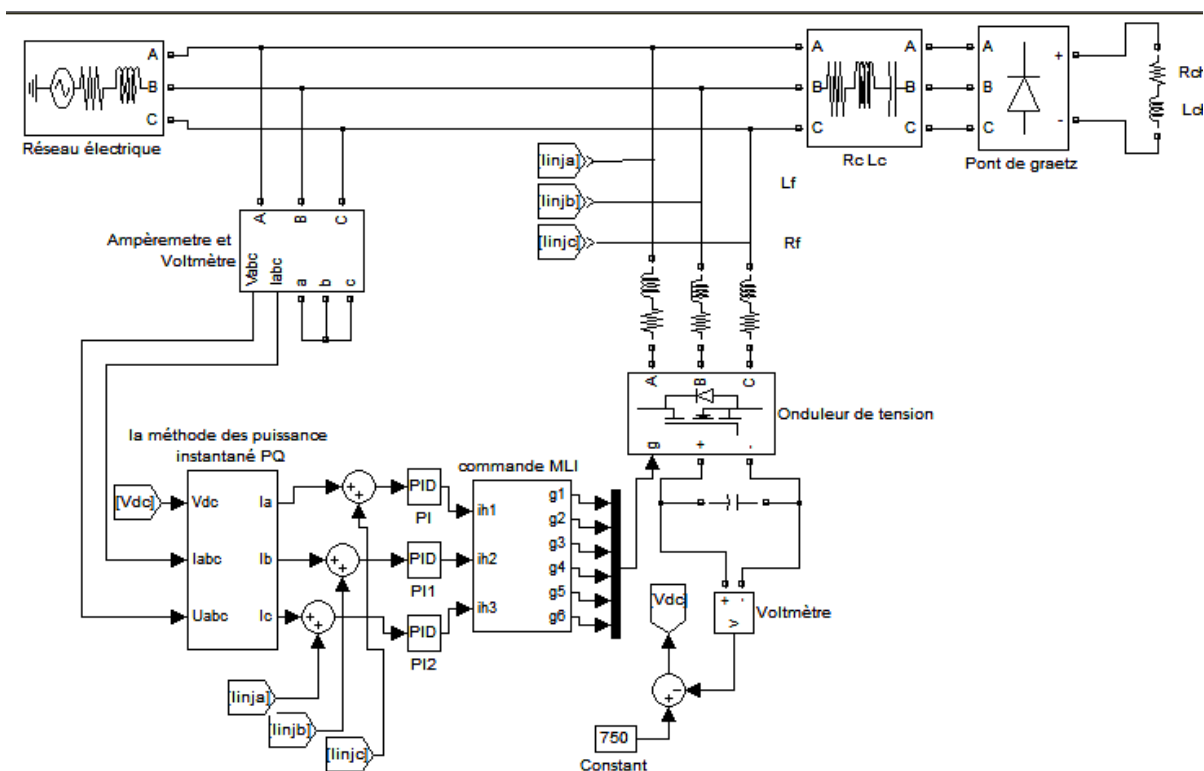


Figure III.15 : Modèle (Réseau – Charge polluante filtre actif parallèle) sous SIMULINK

Le schéma du filtre actif parallèle est composé de trois parties ;

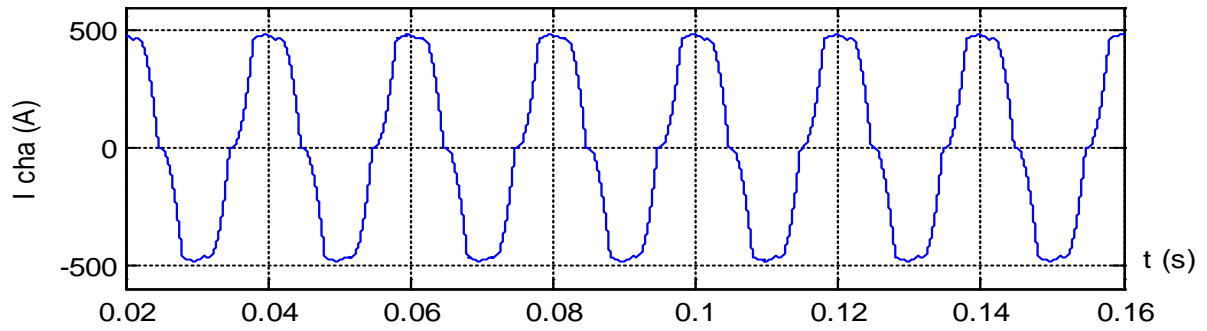
- *Le réseau d'alimentation* ; c'est un système de tension triphasé parfaitement sinusoïdal. (la tension simple :  $V_s = 220$  v, la fréquence :  $f = 50$ Hz, Résistances et Inductances de chaque source alimentation [ $R_s = 1.3 \times 10^{-4} \Omega$ ,  $L_s = 1.5 \times 10^{-5}$  H]).
- *Le pont redresseur* ; en peu dire aussi la charge polluante, elle se compose d'un redresseur (pont de graetz) non-commandé monter en parallèle avec un charge RL ( $R_{ch} = 0.6 \Omega$ ,  $L_{ch} = 0.0025$  H).
- *Le filtre actif parallèle* ; c'est un onduleur de tension triphasé, placé en parallèle avec le réseau. Une impédance de sortie du filtre est une inductance de filtrage  $L_f$  en série avec une résistance  $R_f$  et un circuit de commande qui se compose essentiellement de trois blocs :
  - *Bloc de calcul des courants de références*
  - *Bloc des régulateurs (P,PI,...)*
  - *Bloc de commande MLI.*
  - Avec :  $V_{dc} = 750$  v,  $C_{dc} = 0.1$  mF,  $R_f = 1.5 \Omega$ ,  $L_f = 0.004$  H  $f_m = 12$  kHz,  $f_{réf} = 50$  Hz,  $r = 0.8$

### III.6 Résultats de simulation :

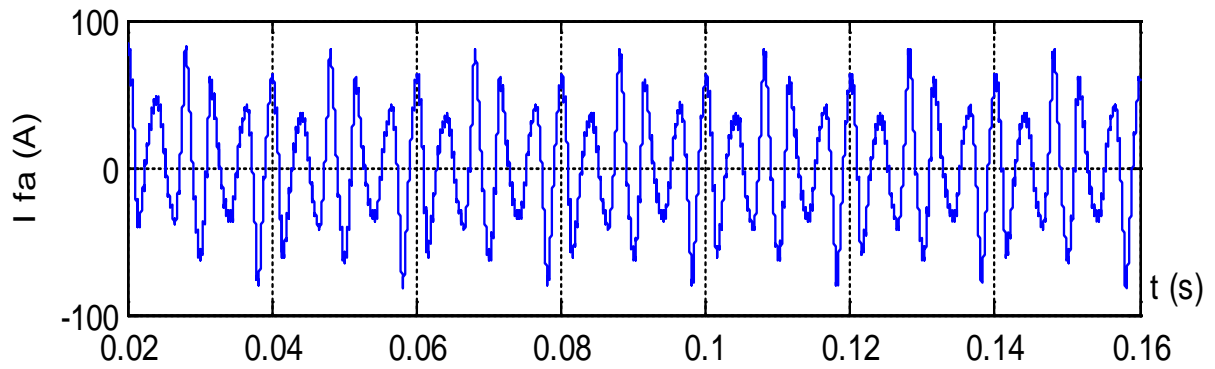
Comme il a été mentionné précédemment, la simulation du filtre actif parallèle est réalisée par logiciel **MATLAB 7.1/ SIMULINK 6.0**. Les courants de source, courants de charge, courants injecté par le filtre et aussi la tension aux bornes du condensateur de stockage, et leurs spectres harmoniques ont été simulés avant et après le filtrage actif parallèle pour une période de 16ms.

La simulation du filtre est faite pour deux types de charge RL et charge RC utilisant deux régulateurs proportionnels pour la boucle du courant et celle de la tension.

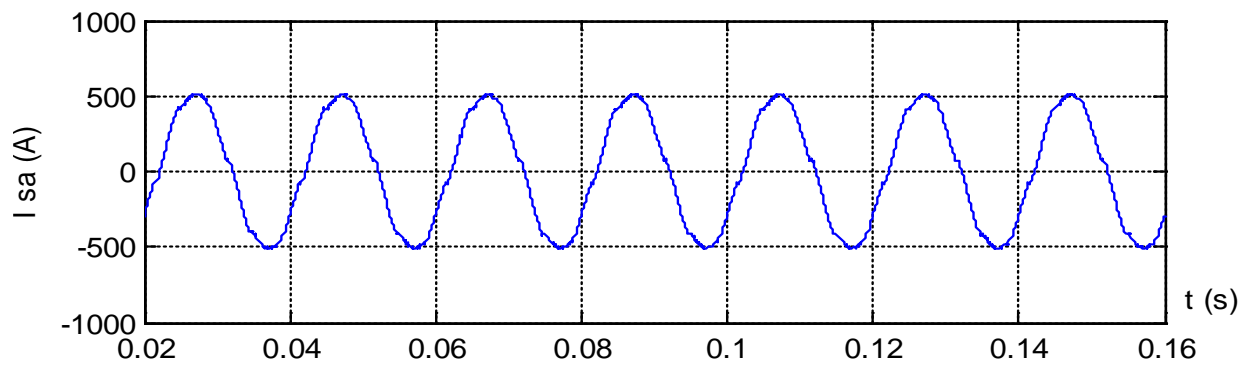
**1<sup>er</sup> cas ( $R=0.6\Omega$ ,  $L=2mH$ )**



**Figure III.16 :** Courant à travers la charge.



**Figure III.17 :** courant du filtre.



**Figure III.18 :** courant de la source.

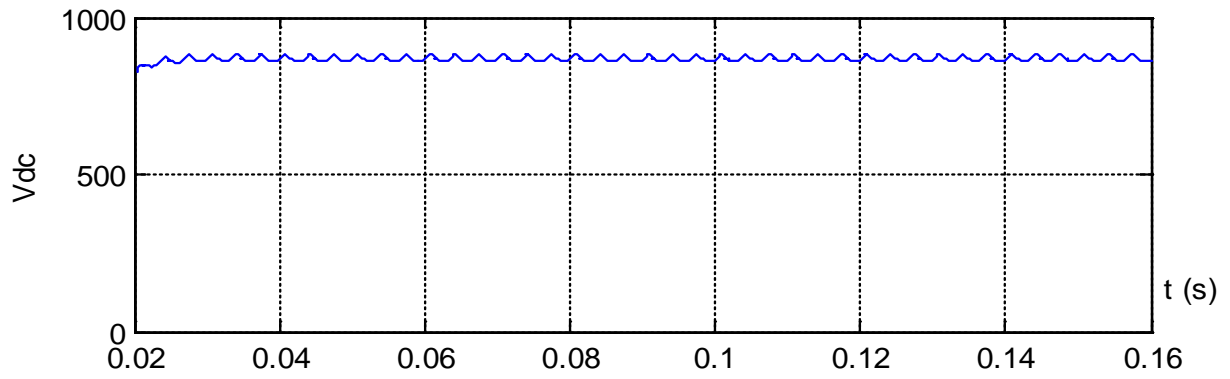


Figure III.19 : allure de la tension  $V_{dc}$

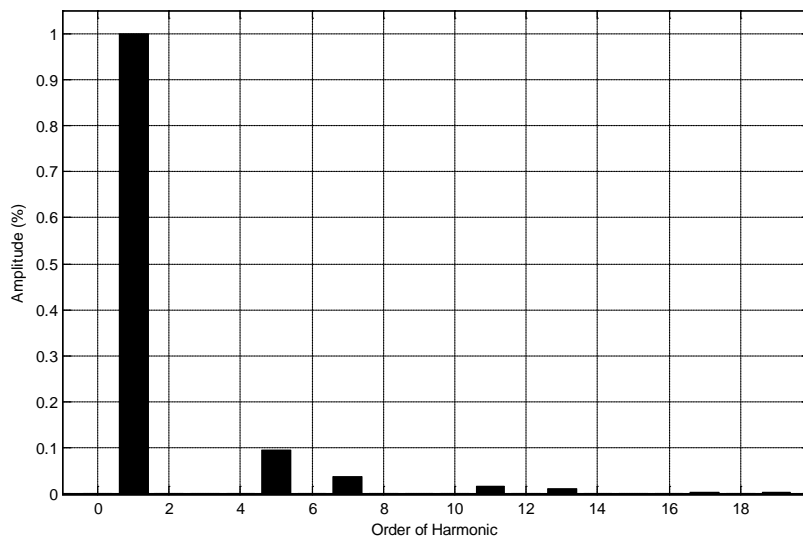


Figure III.20 : analyse spectrale du courant de la source avant filtrage (THD = 10.71 %)

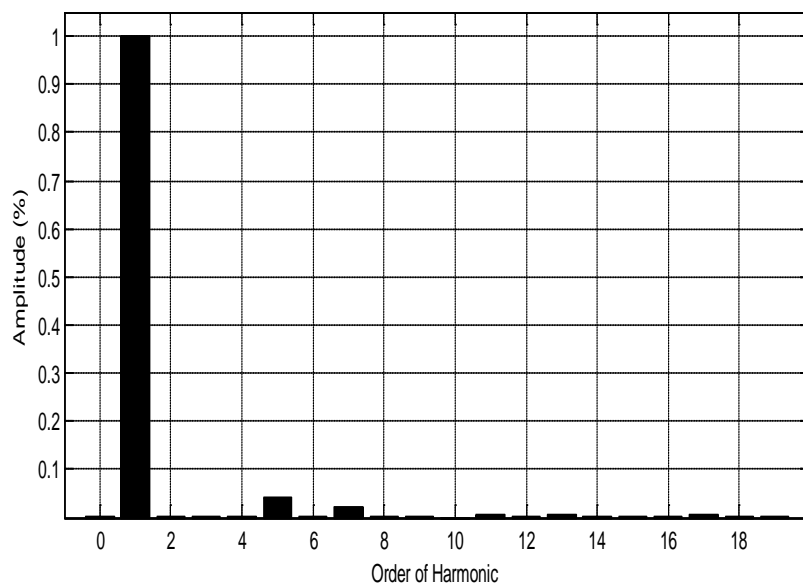
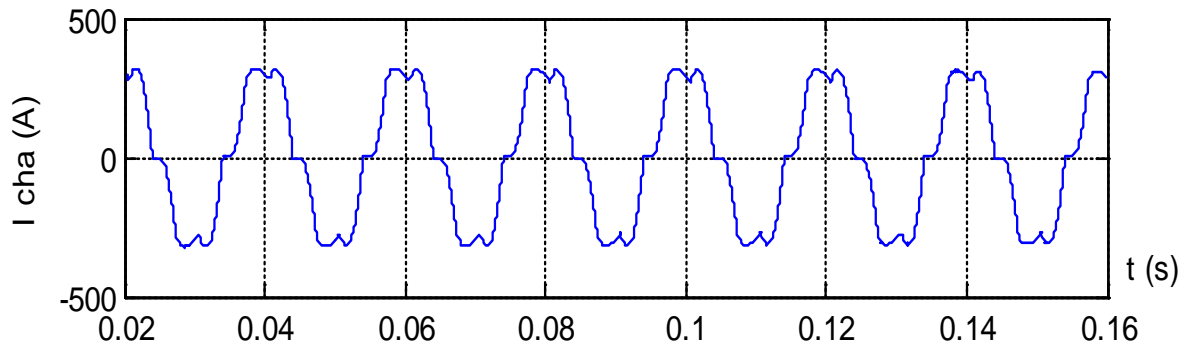
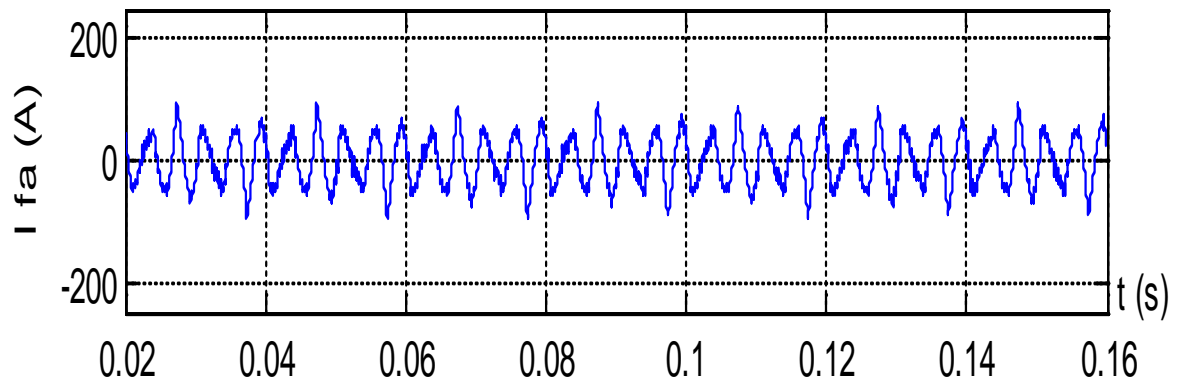
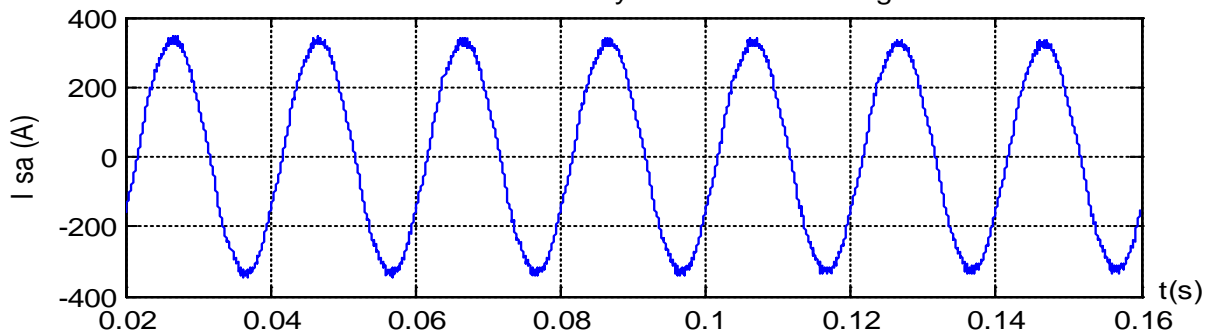


Figure III.21 : analyse spectrale du courant de la source après filtrage (THD = 4.73 %)

**2eme cas ( $R=1 \Omega$ ,  $C=3.3 \text{ mF}$ ).****Figure III.22 :** Courant à travers la charge.**Figure III.23 :** courant du filtre.**Figure III.24 :** courant de la source.

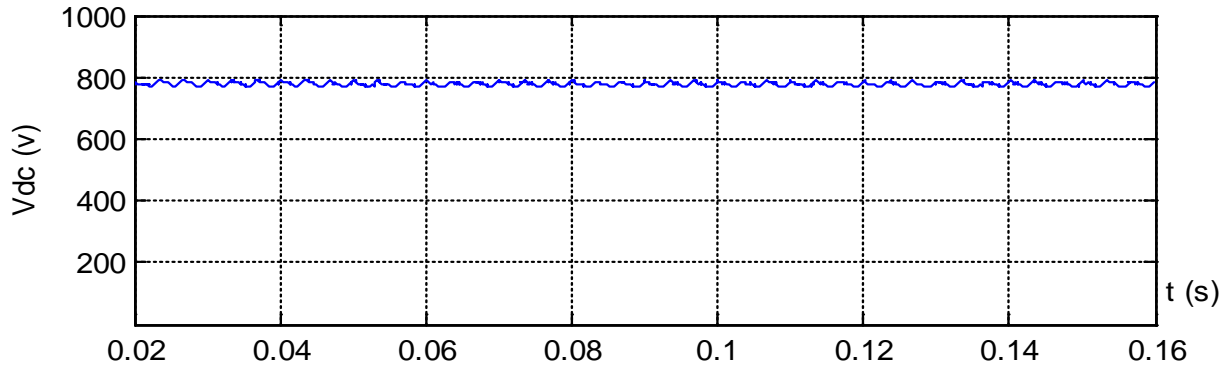


Figure III.25 : allure de la tension  $V_{dc}$

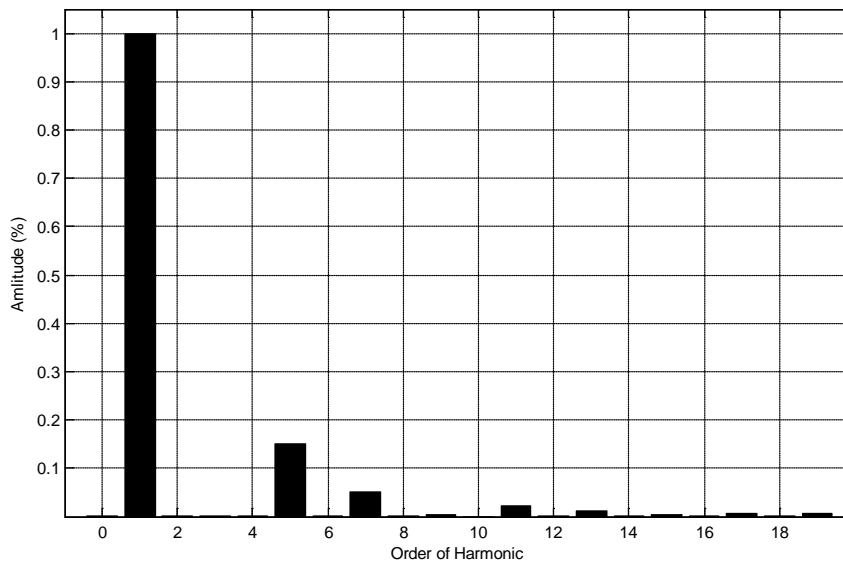


Figure III.26 : analyse spectrale du courant de la source avant filtrage (THD = 16.23 %)

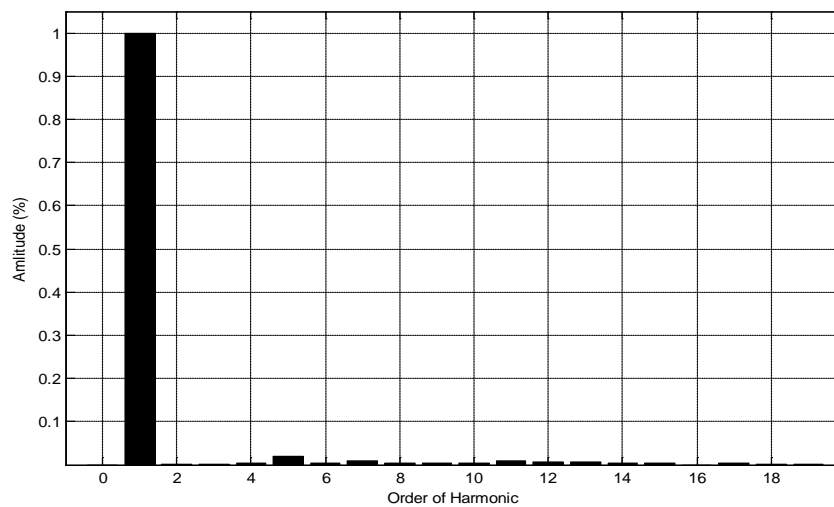


Figure III.27 : analyse spectrale du courant de la source après filtrage (THD = 2.64 %)

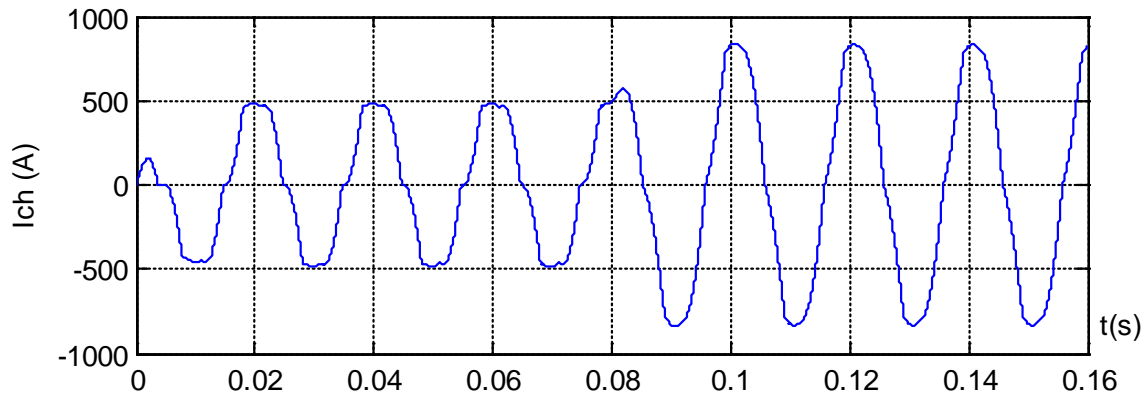
III.6.1 Changement de la charge de «  $R_1L_1$  » à «  $R_2L_2$  » :

Figure III.28 : Courant à travers la charge.

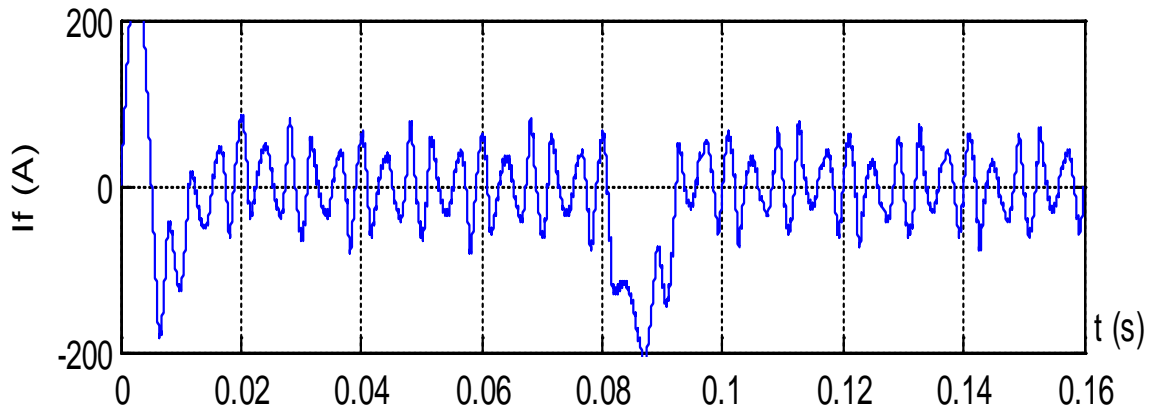


Figure III.29 : courant du filtre.

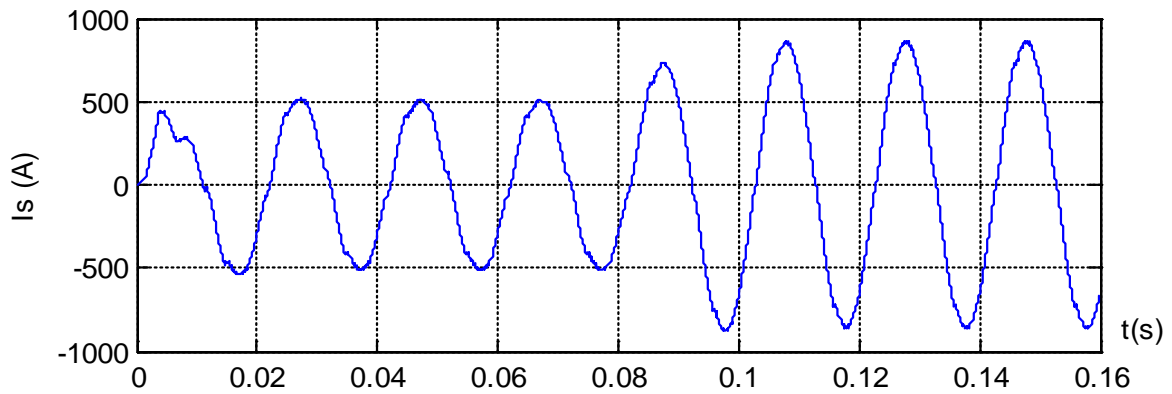
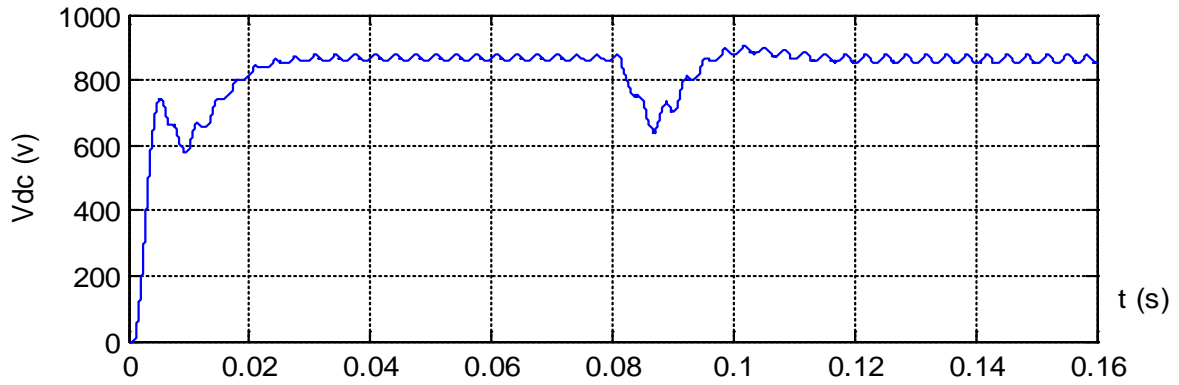
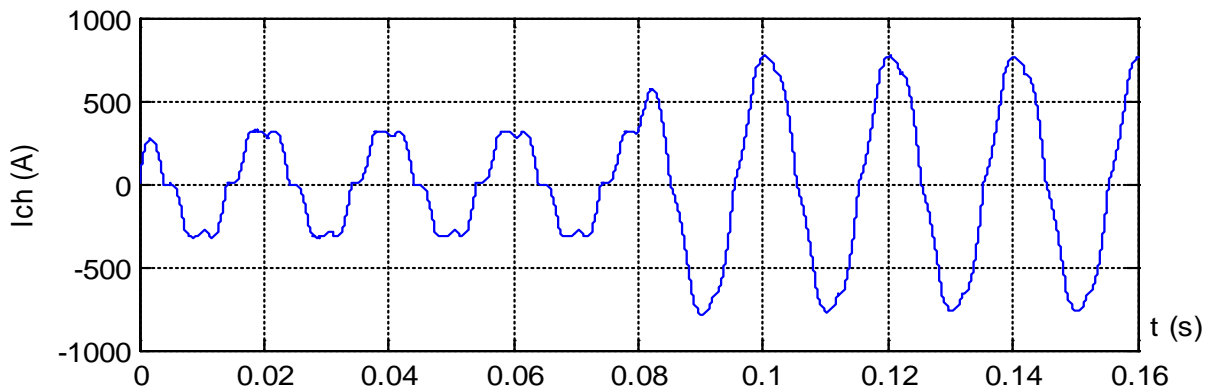


Figure III.30 : courant de la source.

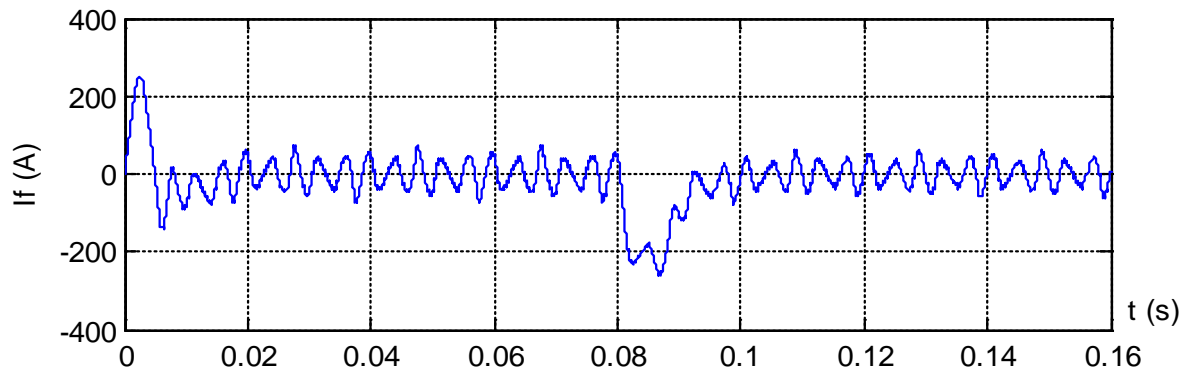


**Figure III.31 :** allure de la tension  $V_{dc}$

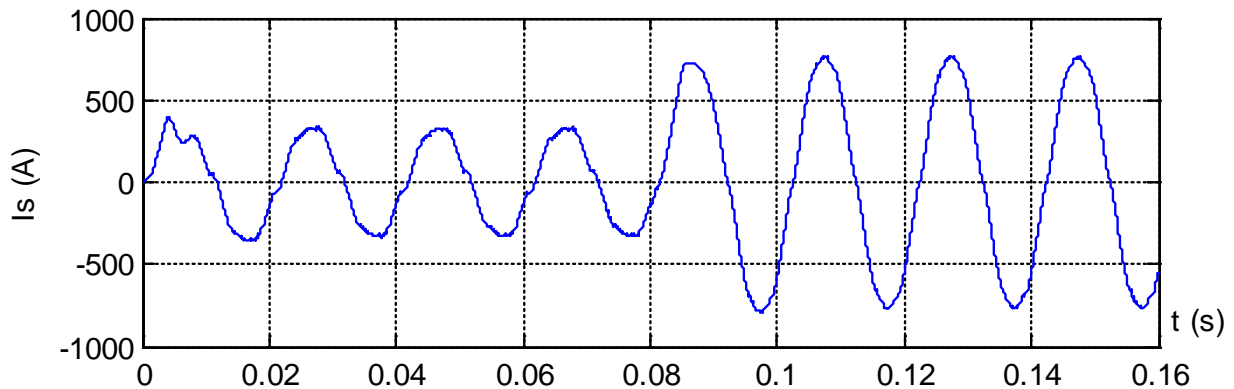
### III.6.2 Changement de la charge « $R_1C_1$ » à « $R_2C_2$ » :



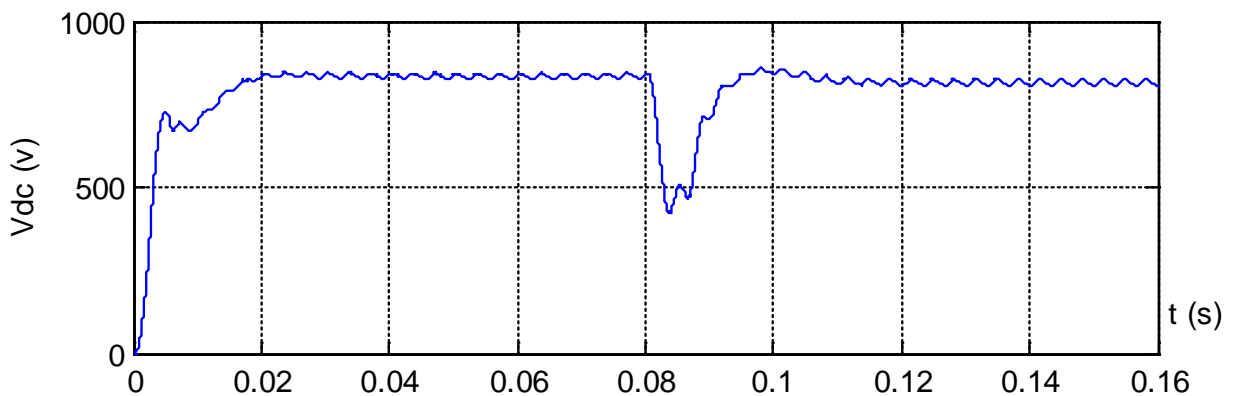
**Figure III.32 :** Courant à travers la charge.



**Figure III.33 :** courant du filtre.



**Figure III.34 :** courant de la source.



**Figure III.35 :** allure de la tension  $V_{dc}$ .

### III.7 Analyse des résultats :

Comme nous avons dit précédemment, on a proposé deux types de charge RL et RC, afin de voir l'adaptation du notre filtre actif parallèle en fait une permutation de la charge instantané de  $RL_1$  vers  $RL_2$ ,  $RC_1$  vers  $RC_2$  et de RL vers RC.

*Les figures III (16, 17,18)* illustre l'analyse temporelle de la phase « a » pour le 1<sup>er</sup> cas d'une charge Résistive et Inductive  $RL_1$ , le courant de la charge ( $I_{ch}$ ), le courant injecté par le filtre ( $I_f$ ) et le courant du réseau après le filtrage ( $I_s$ ) dans le cas de la compensation des courants harmoniques.

**Les figures III (22, 23,24)** illustre l'analyse temporelle de la phase « a » pour le 2<sup>ème</sup> cas d'une charge Résistive et Inductive  $RL_2$ , le courant de la charge ( $I_{ch}$ ), le courant injecté par le filtre ( $I_f$ ) et le courant du réseau après le filtrage ( $I_s$ ) dans le cas de la compensation des courants harmoniques.

**Les figures III (19, 25)** indique la tension continu «  $V_{dc}$  » aux bornes du condensateur de stockage d'énergie pour les deux charges  $RL_1$  et  $RL_2$  respectivement.

**Les figures III (20, 21) (26, 27)** présente l'analyse spectrale du courant de la phase « a » de la charge non linéaire et celui du réseau après filtrage pour la compensation des courants harmoniques pour les deux cas :

- ⇒ 1<sup>er</sup> cas ; charge  $RL_1$  le THD du courant de la charge est de 10,71 % avant filtrage et celle du réseau après compensation est de 4,73 % ce qui confirme la bonne qualité de filtrage remarquée dans l'analyse temporelle.
- ⇒ 2<sup>ème</sup> cas ; charge  $RL_2$  le THD du courant de la charge est de 16,23 % avant filtrage et celle du réseau après compensation est de 2,64 %.

**Les figures III (28, 29,30)** illustre l'analyse temporelle de la phase « a » pour le cas du changement de la charge Résistive et Inductive  $RL_1$  vers la de charge Résistive et Inductive  $RL_2$ , le courant de la charge ( $I_{ch}$ ), le courant injecté par le filtre ( $I_f$ ) et le courant du réseau après le filtrage ( $I_s$ ) dans le cas de la compensation des courants harmoniques.

**La figure III (31)** présente l'analyse temporelle de la tension continue «  $V_{dc}$  » aux bornes du condensateur de stockage d'énergie pour le cas du changement de la charge Résistive et Inductive  $RL_1$  vers la de charge Résistive et Inductive  $RL_2$

**Les figures III (32, 33,34)** illustre l'analyse temporelle de la phase « a » pour le cas du changement de la charge Résistive et Capacitive  $RC_1$  vers la de charge Résistive et Capacitive  $RC_2$ , le courant de la charge ( $I_{ch}$ ), le courant injecté par le filtre ( $I_f$ ) et le courant du réseau après le filtrage ( $I_s$ ) dans le cas de la compensation des courants harmoniques.

**La figure III (35)** présente l'analyse temporelle de la tension continue «  $V_{dc}$  » aux bornes du condensateur de stockage d'énergie pour le cas de la permutation charge Résistive et Capacitive  $RC_1$  vers la de charge Résistive et Capacitive  $RC_2$ .

### III.8 Conclusion :

Le présent chapitre a montré les différentes structures du filtre actif parallèle ainsi que les différentes stratégies de commande qui lui caractérisent. Les régulateurs P, PI ont été étudiés. Nous n'avons présenté que les résultats dus au régulateur proportionnel mais pour le deuxième (Proportionnel-Intégrateur) c'est presque la même chose mais avec un temps de réponse un peu plus vite. Selon le type de commande choisi, les performances du notre filtre actif augmente ainsi que le type de compensation voulu. Dans le prochain chapitre, nous développerons un nouveau algorithme de commande en utilisons la logique floue dans le bute toujours avoir un THD plus inférieur à 5%.

## IV. 1 Introduction :

Dans ce chapitre, on va présenter le principe général et la théorie de base de la logique floue. Cela englobe des aspects de la théorie des possibilités qui fait intervenir des ensembles d'appartenance appelés ensembles flous caractérisant les différentes grandeurs du système à commander, et le raisonnement flou qui emploie un ensemble de règles floues établies par le savoir faire humain et dont la manipulation permet la génération de la commande adéquate ou la prise de décision [21].

En suite, on va décrire les notions générales et l'architecture algorithmique et structurelle d'une commande floue, ou nous mettons le point sur [22][23] :

- La fuzzification ;
- Les inférences floues ;
- La défuzzification.

L'objectif de ce dernier chapitre est d'introduire la notion de régulation floue dans le filtrage actif parallèle. En effet, plusieurs articles traitant la régulation floue ont été publiés [24][25].

En premier lieu, nous allons présenter le processus flou, on passera ensuite à la conception de deux contrôleurs flous, l'un destiné à réguler le courant généré par le filtre actif et l'autre consacré à l'optimisation de la tension continue au borne du condensateur de stockage d'énergie. On terminera par la présentation des résultats obtenus par cette technique de régulation.

## IV.2 Historique et principe de la logique floue :

Aujourd'hui, la logique floue (en anglais fuzzy logic) est de grande actualité. Il s'agit d'une nouvelle méthode de traitement pour les problèmes de réglage et de prise de décision parvenant du Japon. Cependant, cette argumentation n'est pas du tout correct [26].

Il apparaît, au début des années 1960, à LOTFIA ZADEH (automaticien contemporain de Kalman de l'université de Californie de Berkeley) que la méthode classique utilisée en contrôle des processus (modélisation mathématique du système) n'est pas toujours viable, notamment dans le cas des systèmes complexes.

Il publie un article intitulé « fuzzy sets » présentant la théorie des ensembles flous, qui est l'origine de la logique floue [27].

Dès 1975, on trouve les premières applications au niveau des systèmes de réglage. En 1985 environ, ce sont les Japonais qui commencent à utiliser la logique floue dans des produits industriels pour résoudre des problèmes de réglage et de commande.

## IV.3 Principe de la logique floue :

Le principe du réglage par logique floue s'approche de la démarche humaine dans le sens que les variables traitées ne sont pas des variables logiques (au sens de la logique binaire par exemple) mais des variables linguistiques, proche du langage humain de tous les jours. De plus, ces variables linguistiques sont traitées à l'aide de règles qui font référence à une certaine connaissance du comportement du système [28].

Toute une série de notions fondamentales sont développées dans la logique floue. Ces notions permettent de justifier et de démontrer certains principes de base. Dans ce qui suit, on va étudier ces notions et leurs domaines d'applications.

Par exemple, Les notions de température moyenne ou de courant faible sont relativement difficiles à spécifier de manière précise. On peut fixer des seuils et considérer que l'on attribue tel ou tel qualificatif en fonction de la valeur de la variable par rapport à ces seuils. Ceci ne peut exprimer qu'un avis très tranché du qualificatif "température moyenne" par exemple. L'aspect "vague" de ce qualificatif n'est pas représenté figure IV.1.

On peut définir le degré d'appartenance de la variable température à l'ensemble "faible" comme le "degré de vérité" de la proposition "la température est faible".

En logique booléenne, le degré d'appartenance ( $\mu$ ) ne peut prendre que deux valeurs (0 ou 1). La température peut être :

- Faible :  $\mu_{faible}(T) = 1$  ,  $\mu_{moyenne}(T)=0$ ,  $\mu_{élevée}(T) = 0$
- moyenne :  $\mu_{faible}(T) = 0$  ,  $\mu_{moyenne}(T)= 1$ ,  $\mu_{élevée}(T) = 0$
- élevée :  $\mu_{faible}(T) = 0$  ,  $\mu_{moyenne}(T)=0$ ,  $\mu_{élevée}(T) = 1$

Elle ne peut pas prendre deux qualificatifs à la fois.

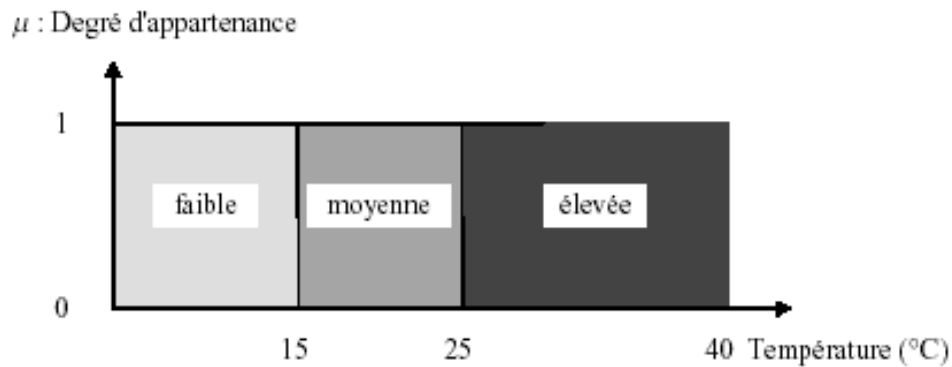


Figure IV.1 : Exemple d'ensembles considérés en logique booléenne

En logique floue, le degré d'appartenance devient une fonction qui peut prendre une valeur réelle comprise entre 0 et 1 inclus.

$\mu_{moyenne}(T)$ , par exemple, permet de quantifier le fait que la température puisse être considérée comme moyenne.

Dans ce cas, la température peut être considérée, à la fois, comme faible avec un degré d'appartenance de 0,2 et comme moyenne avec un degré d'appartenance de 0,8 ; figure IV.2.

$\mu_{faible}(T) = 0.2$  ,  $\mu_{moyenne}(T) = 0.8$  ,  $\mu_{élevée}(T) = 0$

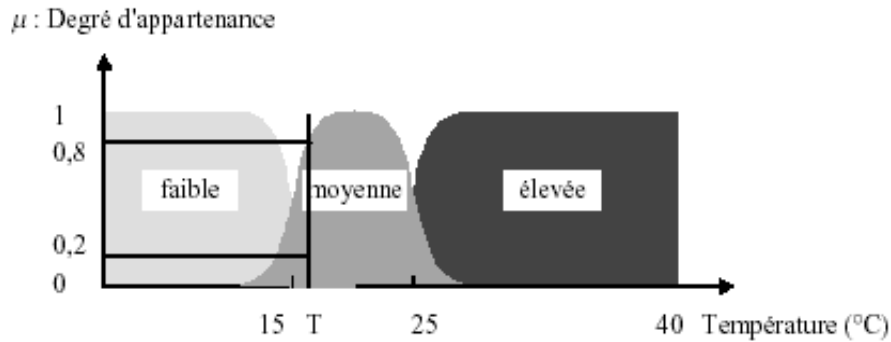


Figure IV.2 : exemple d'ensembles considérés en logique floue.

Pour la variable floue  $x$ , on définit un ensemble flou  $A$  sur un univers de discours  $X$  par une fonction degré d'appartenance :

$$\begin{aligned} \mu_A : X &\rightarrow [0,1] \\ x &\mapsto \mu_A(x) \end{aligned} \quad (IV.1)$$

L'univers de discours est l'ensemble des valeurs réelles que peut prendre la variable floue  $x$  et  $\mu_A(x)$  est le degré d'appartenance de l'élément  $x$  à l'ensemble flou  $A$ , Figure IV.3.

Plus généralement, le domaine de définition de  $\mu_A(x)$  peut être réduit à un sous-ensemble de  $X$  [29], On peut ainsi avoir plusieurs fonctions d'appartenance, chacune caractérisant un sous-ensemble flou. C'est par l'association de tous les sous ensembles flous de l'univers de discours, que l'on obtient l'ensemble flou de la variable floue  $x$  [30]. Par abus de langage, les sous-ensembles flous sont fort souvent confondus avec l'ensemble flou.

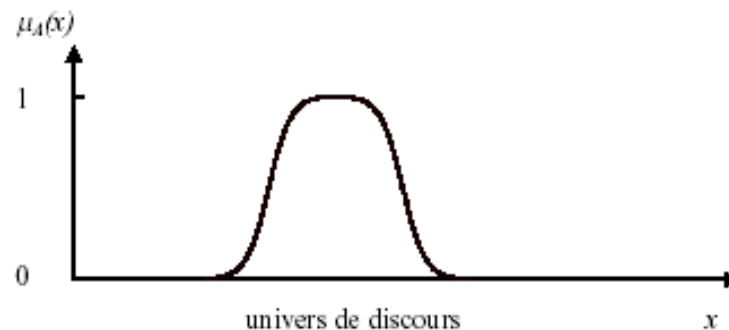


Figure IV.3 : Représentation d'un ensemble flou par sa fonction d'appartenance.

Dans notre exemple, la variable floue est la température, l'univers de discours est l'ensemble des réels de l'intervalle  $[0, 40]$ . On attribue à ces variables trois sous-ensembles flous : faible, moyenne et élevée. Chacun est caractérisé par sa fonction degré d'appartenance :  $\mu_{faible}(T)$ ,  $\mu_{moyenne}(T)$ ,  $\mu_{élevée}(T)$

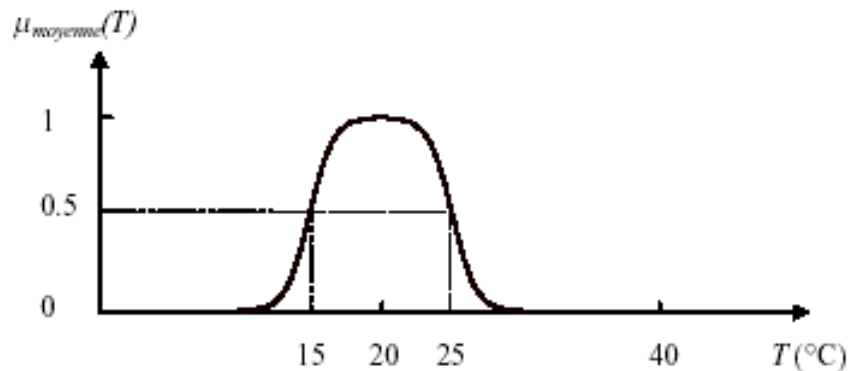


Figure IV.4 : Cas de l'ensemble flou « moyenne » de la variable Température.

On peut définir la fonction degré d'appartenance  $\mu_{moyenne}$  sur tout l'univers de discours :

$$\mu_{moyenne} = \begin{cases} \frac{1}{1 + \exp(15 - x)} ; x \in [0, 20] \\ 1 - \frac{1}{1 + \exp(25 - x)} ; x \in [20, 40] \end{cases} \quad (IV.2)$$

### IV.3.1 Bases de la logique floue :

Les éléments constituant la théorie de base de la logique floue sont [31] :

- Les variables linguistiques et les ensembles flous ;
- Les fonctions d'appartenance ;
- Les inférences à plusieurs règles floues.

### IV.3.1.1 Variables linguistiques et les ensembles flous :

On désigne par variables linguistiques, les termes utilisés lors de la description d'une situation, de phénomènes, ou de procédés tels que : la température, l'âge, la vitesse, couleur, ....etc.

Cette collection d'objets ayant en commun une ou plusieurs propriétés qui les caractérisent nommé par un ensemble.

L'expression de cette opération sera debout, accroupi, assis ou allongé pour décrire des positions ; pour la discrétion d'un procédé, elle sera formulée en général avec une succession de condition suivies d'opérations tel que :

Si condition **1**, alors opération **1**, ou.  
 Si condition **2**, alors opération **2**, ou.  
 ....  
 ....  
 Si condition **n**, alors opération **n**, ou.

### IV.3.1.2 Les fonctions d'appartenance :

Les valeurs des variables linguistiques sont la traduction linguistique que de divers états de ces dernières tel que : froid, tiède et chaud sont des valeurs de la variable linguistique température. Ceci permet de décrire un processus sans avoir à son traitement numérique.

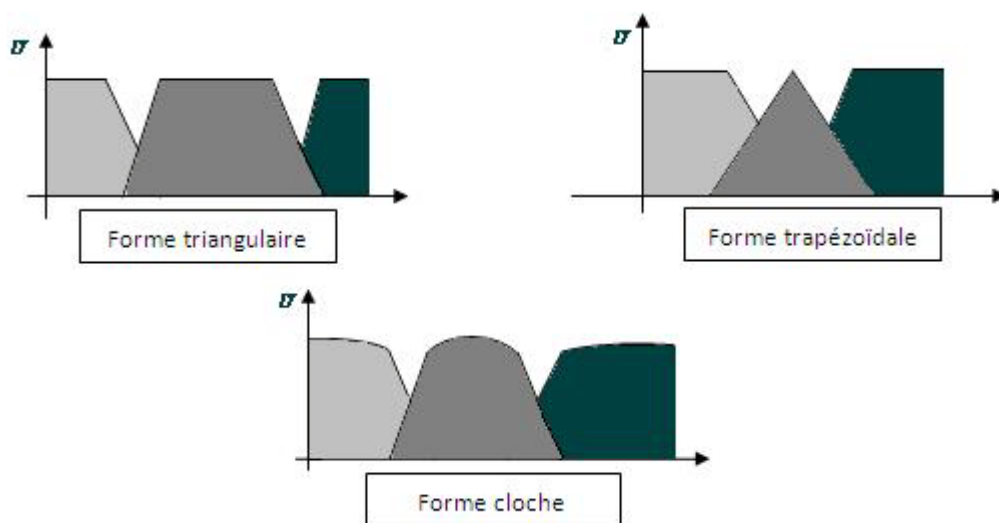


Figure IV.5 : Différentes formes des fonctions d'appartenance

### ***IV.3.1.3 Les inférences (ou déduction floues) :***

En général, plusieurs valeurs des variables linguistiques convenablement définies par des fonctions d'appartenances, sont liées entre elles par des règles, afin de tirer des conclusions. On peut distinguer deux types de règles d'inférences [32]:

- Inférence avec une seule règle.
- Inférence avec plusieurs règles.

#### **IV.3.1.3.1 Inférence avec une seule règle :**

Cette règle est appliquée dans des domaines non techniques lorsqu'il faut choisir un élément (qui représente l'optimum) parmi un ensemble

Si  $x_1, x_2, \dots, x_n$  sont les variables linguistiques pour évaluer une certaine situation, le critère pour la prise de décision peut être formulé par une règle, comme par exemple :

$Y = [x_1 \text{ ou } (x_2 \text{ et } x_3) \text{ ou } \dots] \text{ et } x_n.$

A chaque variable formant un ensemble est attribuée une fonction d'appartenance  $\mu_{x_1}, \mu_{x_2}, \dots, \mu_{x_n}$ .

Dont les valeurs numériques (facteurs d'appartenance) qui sont en générale différentes pour chaque élément  $I=1, 2, \dots, n$ .

#### **IV.3.1.3.2 Inférence avec plusieurs règles :**

Dans ce cas présent, lorsqu'une ou plusieurs variables nécessitent une prise de décision différente suivant les valeurs qu'atteignent ces variables ; ces dernières sont des variables linguistiques donc des variables floues.

Cette problématique se présente essentiellement pour des problèmes de réglage et de commande, et la prise de décision conduit à l'exécution d'une certaine opération. Les règles peuvent alors être exprimées sous la forme générale.

Opération :

Si condition 1 alors opération 1 ou
Si condition 2 alors opération 2 ou
·
·
Si condition n alors opération n.

### IV.3.1.3.3 Opération de la logique floue :

Au niveau des inférences, les valables linguistiques sont liées entre elles par des opérations de la logique floue tel que « **ET** » « **OU** » qui interviennent sur les fonctions d'appartenances représentant les variables linguistiques [33].

#### ❖ Opération –Non :

Le complément d'un ensemble floue A, dénoté par :

$$\text{est défini comme } \begin{cases} C = \bar{A} \text{ (ou en anglais not A)} \\ \mu_c(x) = 1 - \mu_a(x) \end{cases} \quad (\text{IV.3})$$

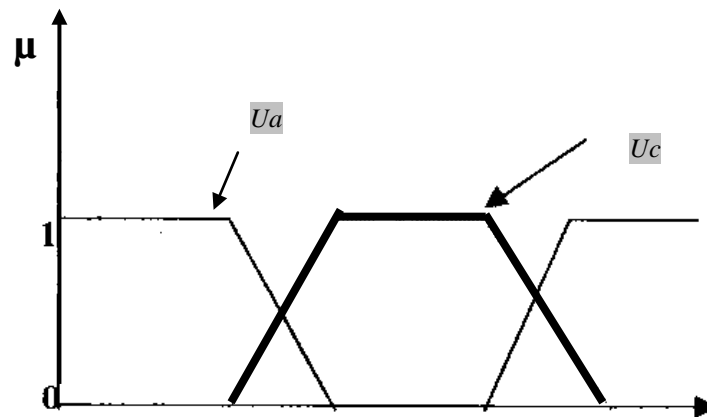


Figure IV.6 : Opérateur « NON »

#### ❖ Opération ET :

L'opération « **ET** », correspond à l'intersection de deux ensembles A et B, ou écrit :

$$C = A \cap B \text{ ou (A et B)} \quad (\text{IV.4})$$

Elle est réalisée par la formulation du minimum, appliquée aux fonctions d'appartenances  $\mu_a(x)$  et  $\mu_b(x)$  des deux ensembles « A **ET** B » qui s'écrit par :

$$\mu_c(x) = \min [\mu_a(x), \mu_b(x)] \quad (\text{IV.5})$$

Le résultat de l'opération peut ne pas atteindre la valeur 1 comme le montre la figure IV.6. La commutativité et l'associativité restent valables même pour des variables différentes.

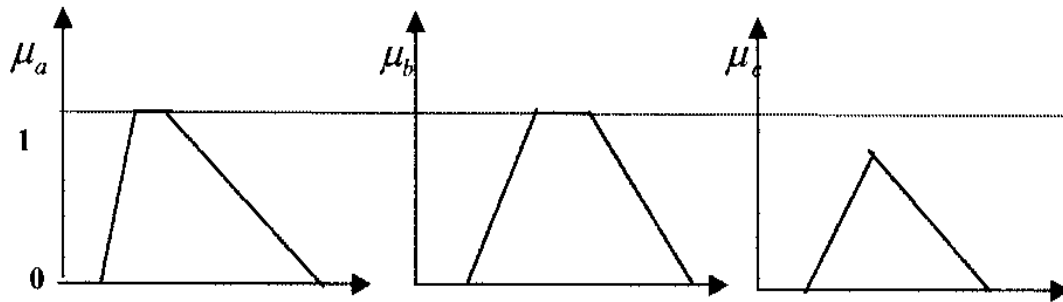


Figure IV.6 : Operateur « ET ».

❖ **Opérateur OU :**

L'opération « **OU** » correspond à l'union de deux ensembles A et B, on écrit :

$$C = (A \cup B), \text{ ou } (A \text{ ou } B) \quad (IV.6)$$

La réalisation de l'opérateur « **OU** » de la logique floue se fait par la formation du maximum, appliquée aux fonctions d'appartenance  $\mu_a(x)$  et  $\mu_b(x)$  des deux ensembles A et B qui s'écrit par :

$$\mu_c(x) = \max [\mu_a(x), \mu_b(x)] \quad (IV.7)$$

Il est possible que la fonction d'appartenance  $\mu_c(x)$  résultante atteigne deux fois la valeur 1. Comme le montre la figure IV.7. La commutativité et l'associativité restent valables même pour des variables différentes.

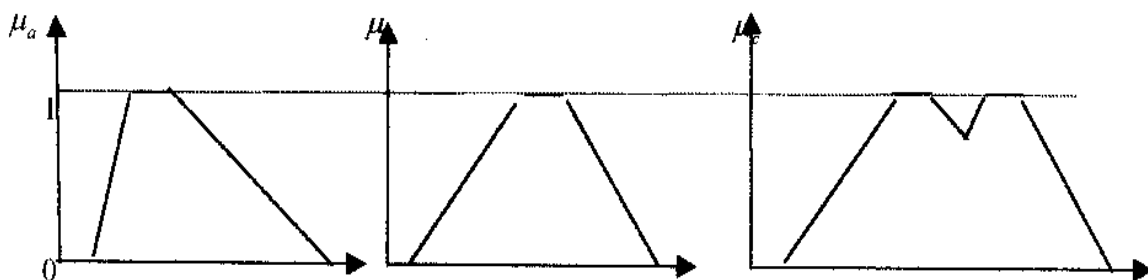


Figure IV.7 : Opération « OU » réalisé par le Maximum

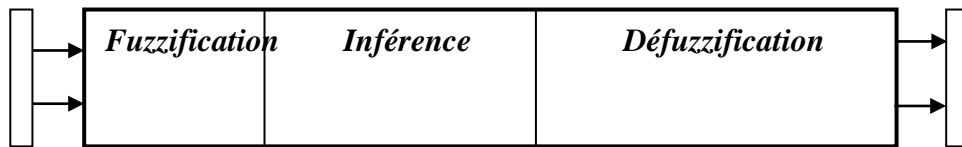
Dans la plupart d'application, ces deux cas sont combinés.

#### IV.4 Etape de mise en œuvre d'un contrôleur flou :

Il existe trois étapes essentielles dans la mise en œuvre d'un régulateur flou comme le montre le schéma ci-dessous :

Entrées réelles

Sorties réelles



##### IV.4.1. Etape de fuzzification :

L'étape de fuzzification consiste à définir des ensembles flous pour les variables d'entrée et de sortie.

Pour chacune de ces variables, on doit connaître a priori son intervalle de définition. Dans la plupart des cas, le régulateur flou reçoit comme variables d'entrée, l'erreur entre la sortie du processus et le signal de consigne ainsi que la variation de cette erreur. La dérivée de cette erreur suffit pour représenter sa variation.

Ainsi la loi de commande peut être schématisée comme suit [34] :

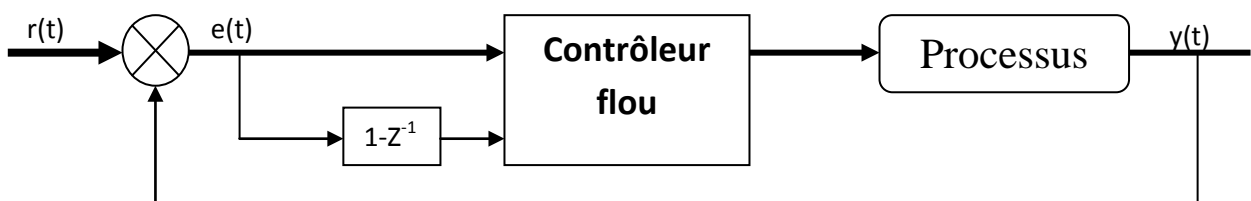


Figure IV.9 : Schéma de principe d'un régulateur flou

Cette étape consiste à définir les fonctions d'appartenance pour les différentes variables, en particulier les variables d'entrées, on réalise ainsi le passage des grandeurs physiques en variables linguistiques (variables floues) qui peuvent être traitées par les inférences.

La forme de ces sous-ensembles, définie par :

⇒ Les fonctions d'appartenance, leurs positions ainsi que leurs chevauchements peuvent être choisis librement, cependant il convient de respecter certaines règles:

- ✓ Leur forme doit être convexe.
- ✓ Les sous-ensembles d'entrées (souvent des trapèzes) doivent se chevaucher partiellement afin qu'il n'y ait pas de zones indéterminées, tandis que pour ceux de sorties (souvent des triangles), cette précaution n'est pas nécessaire.
- ✓ Eviter d'imbriquer plus de deux sous-ensembles, sinon il y a des problèmes d'instabilité.

#### IV.4.2 Etape d'Inférence « Le moteur d'inférence » :

C'est l'étape où l'on établit les règles floues qui permettent d'aboutir à la commande en fonction des valeurs de l'erreur et de sa variation [34].

En général, la commande dépend non seulement de l'erreur mais aussi de sa variation.

Il effectue simplement une identité entre les fonctions d'appartenance des entrées et les coefficients de sorties.

Pour obtenir de telles identités, il faut se baser sur des règles prédéfinies. Une règle floue comporte une prémisse du genre « si l'erreur est négative ET la variation de l'erreur est négative » et une déduction floue du type « alors  $U$  est positive grande ». Dans le cas où les deux variables d'entrée sont définies, chacune, par 3 ensembles flous, on aboutit à 9 règles floues.

**Tableau IV.1**

e/ $\Delta e$	N	Z	P
N	PG	P	Z
Z	P	Z	N
P	Z	N	NG

Après l'édition des règles, il reste à calculer les degrés d'appartenance de la variable de sortie à tous les ensembles flous qui lui sont associés.

Aux 5 ensembles flous de la variable de sortie correspondent 5 déductions floues.

1. **SI** (e est N) **ET** ( $\Delta e$  est N) **ALORS** (u est PG)
2. **SI** (e est N) **ET** ( $\Delta e$  est Z), **OU**, (e est Z) **ET** ( $\Delta e$  est N) **ALORS** (u est P)
3. **SI** (e est Z) **ET** ( $\Delta e$  est Z) **OU** (e est P) **ET** ( $\Delta e$  est N) **OU** (e est N) **ET** ( $\Delta e$  est P) **ALORS** (u est Z)
4. **SI** (e est P) **ET** ( $\Delta e$  est Z) **OU** (e est Z) **ET** ( $\Delta e$  est P) **ALORS** (u est N)
5. **SI** (e est P) **ET** ( $\Delta e$  est P) **ALORS** (u est NG)

Chaque règle est composée de prémisses liées par les opérations **ET**, **OU** et donne lieu à une implication par l'opération **ALORS**. Pour le réglage par logique floue, on utilise généralement les méthodes suivantes :

- Méthode d'inférence (min et max), [méthode de *Mamdani*].
- Méthode d'inférence max-prod.
- Méthode d'inférence somme-prod.

Ainsi pour toutes les combinaisons possibles des entrées, on va définir une règle. Cette règle nous indique à quel sous-ensemble de sortie, le coefficient de modification va être attribué. Pour le choix de la méthode dépend de l'utilisateur et du cas à traiter. Dans notre cas on va employer la méthode de *Mamdani*.

#### ***IV.4.2.1 Méthode de Mamdani:***

Elle consiste à prendre le minimum parmi les conditions liées par l'opérateur **ET**, et à prendre le maximum des conditions liées par l'opérateur **OU**, ensuite prendre en tout point de l'ensemble représentant la conclusion, le minimum entre la valeur de cet ensemble et celle du maximum des conditions. L'ensemble représentant la commande s'obtient en choisissant en tout point le maximum des ensembles flous résultants des règles [34].

### IV.4.3 Etape de défuzzification

En sortie, le système flou ne peut pas communiquer des valeurs floues qu'il peut seul exploiter. Il lui est donc nécessaire de fournir des valeurs précises, c'est le rôle de la défuzzification.

Cette étape s'effectue toujours à l'aide des fonctions d'appartenance. A partir des degrés d'appartenance, on obtient autant de valeur précise à utiliser, on peut soit conserver le maximum, soit calculer la moyenne pondérée, soit déterminer le centre de gravité des valeurs obtenues. Différentes méthodes sont utilisées :

- **Méthode du centre de gravité :**

C'est la méthode de défuzzification la plus courante. L'abscisse du centre de gravité de la fonction d'appartenance résultant de l'inférence correspond à la valeur de sortie du régulateur.

$$dU_n = \frac{\int x \mu_R(x) dx}{\int \mu_R(x) dx} \quad (IV.8)$$

Il apparaît que plus la fonction d'appartenance résultante est compliquée, plus le processus de défuzzification devient long et coûteux en temps de calcul.

- **Méthode par valeur maximum :**

Cette méthode est beaucoup plus simple. La valeur de sortie est choisie comme l'abscisse de la valeur maximale de la fonction d'appartenance.

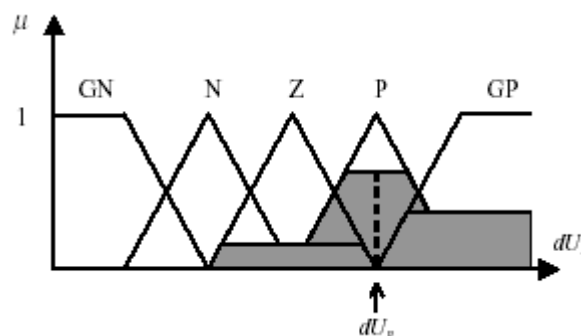


Figure IV.10 défuzzification par valeur maximum

- *Méthode des hauteurs pondérées :*

Elle correspond à la méthode de centre de gravité quand les fonctions d'appartenance ne se recouvrent pas.

$$dU_{\alpha} = \frac{\sum x \mu_{Ri}(x)}{\sum \mu_{Ri}(x)} \quad (IV.9)$$

Cette méthode est surtout utilisée quand les fonctions d'appartenance de la variable de sortie sont des singletons.

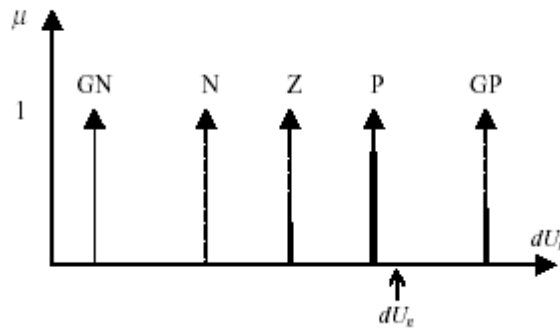


Figure IV.11 : Défuzzification par méthode des hauteurs pondérées

Dans ce cas, le calcul du centre de gravité se trouve grandement simplifié. Le régulateur n'est plus de type **MAMDANI** mais de type **SUGUENO** de part la façon dont la sortie est calculée.

Le régulateur flou à deux entrées est représenté par sa surface caractéristique figure IV.11. Cette dernière exprime les variations de la valeur réelle de la sortie du régulateur en fonction des entrées quand ces dernières parcourent l'univers de discours [35].

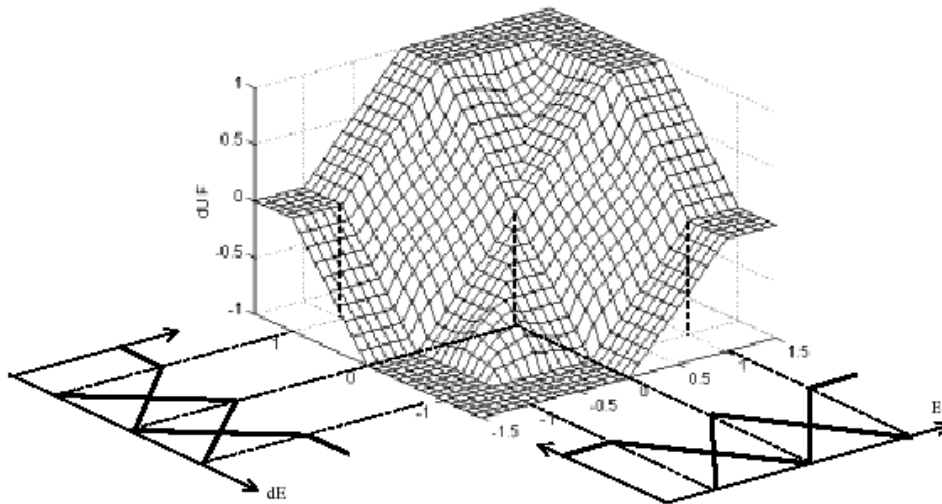


Figure IV.12 : surface caractéristique d'un régulateur flou

## IV.5. Paramètres de la simulation :

### IV.5.1 boucle de régulateur tension :

La stratégie du contrôle par logique floue est représentée précédemment. Elle consiste à comparer la tension  $V_{dc}$  mesurée avec la tension de référence  $V_{dc\_réf}$ .

Cette erreur «  $e$  » est considérée comme étant une première variable d'entrée, tandis que sa dérivé «  $\Delta e$  » est considérée comme une deuxième variable d'entrée.

Sept niveaux flous sont définis pour  $e$  et  $\Delta e$ , qui sont répartis comme suit : négative grand (NG), négatif moyen (NM), négatif petit (NP), zéro (ZE), positif petit (PP), positif moyen (PM), et positif grand (PG).

Chaque variable de l'entrée est assignée à une valeur d'appartenance à chaque ensemble flou, basée sur le degré d'appartenance correspondante. Les fonctions d'appartenance sont représentées par les figures : IV.12 et IV.13.

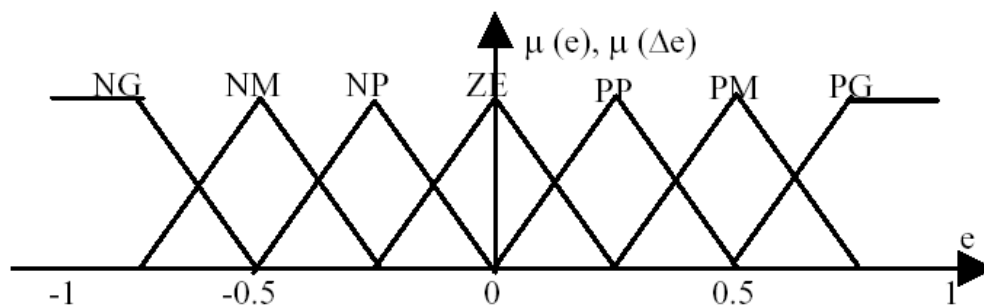


Figure IV.13 : Fonction de répartition pour ( $e$ ) et ( $\Delta e$ )

Notons ici que la sortie du régulateur flou est une fonction de répartition triangulaire qui a cinq ensembles flous : zéro (ZE), positif petit (PP), positif le moyen (PM), positif grand (PG), et positif grand (PTG).

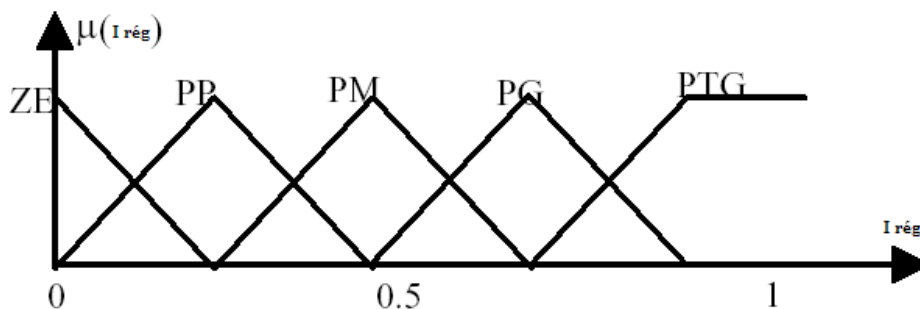


Figure IV.14 : Fonction de répartition pour la sortie.

La stratégie de commande utilise une matrice d'inférence (tableau 2).

Tableau IV.2. Base de règles gérant la sortie en fonction de  $e$  et  $\Delta e$

$e$							
$\Delta e$	NG	NM	NP	EZ	PP	PM	PG
NG						PG	PG
NM				FP		PG	PG
NP	PP	PM	PP	EZ	EZ	PG	PTG
EZ	PG	PM	EZ	EZ	FM	PM	FTG
PP	PTG	PM	PP	EZ	FM	PP	PM
PM	PTG	PG		PP			
PG	PTG	PG					

#### IV.5.2 Boucle de régulation courant

A l'entrée du régulateur courant, on introduit deux grandeurs: l'erreur du courant  $e_a$  de la phase a (respecté b et c) et la variation de l'erreur courant  $\Delta e_a$  (respecté  $\Delta e_b$  et  $\Delta e_c$ ). Pour ce régulateur nous avons considéré trois ensembles représentés par des fonctions d'appartenance sous formes triangulaires, qui sont répartis comme suit : négative grand (NG), zéro (ZE) et positif grand (PG). Les figures IV.14 et IV.15 montrent la fuzzification des grandeurs d'entrées et de sortie.

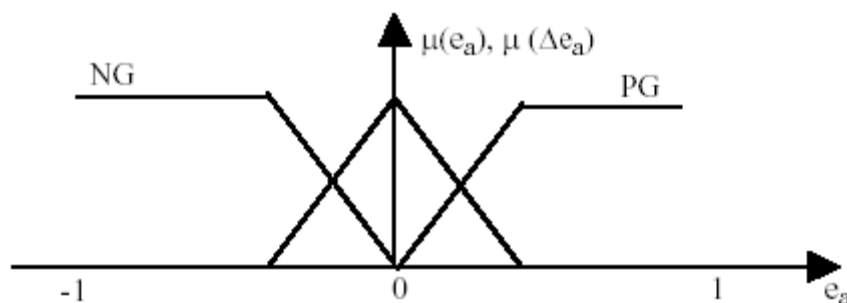
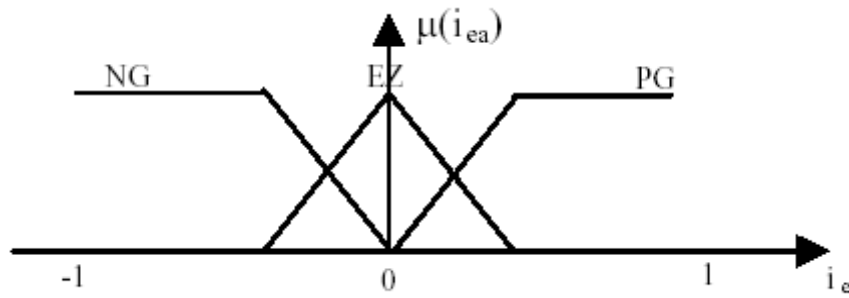


Figure IV.15 : Fonction d'appartenance de «  $e_a$  » et «  $\Delta e_a$  »



**Figure IV.16 :** Fonction d'appartenance pour la sortie  $I_e$

La stratégie de commande utilise une matrice d'inférence (tableau 3).

**Tableau IV.3.** Base de règles gérant la sortie en fonction de «  $e_a$  » et «  $\Delta e_a$  »

	$e_l$			
$\Delta e_l$		NG	EZ	PG
NG		EZ	PG	PG
EZ		NG	EZ	PG
PG		NG	NG	EZ

## IV.6. Résultats de la simulation :

La construction des régulateurs flous s'est effectuée dans la *Toolbox Fuzzy Logic* de Matlab, c'est un éditeur qui permet de créer des systèmes d'inférences floues « *des FIS* » ; pour *fuzzy inference system*.

Cette boîte à outils possède trois éditeurs *de FIS*, de règles et de fonction d'appartenance, qui permettent de saisir l'ensemble des données du *FIS* ainsi que deux interfaces graphiques qui permettent de visualiser les inférences directement sur la base de règles, ainsi que des surfaces de contrôle. Pour les appeler dans l'interface **SIMULINK** de Matlab, il suffit de les sauvegarder dans l'espace de travail « *Work Space* » sur le nom « *nomdefichier.fis* » puis en exécute par l'éditeur principal « *:>>fuzzy* » dans la command Windows de Matlab.

Alors, afin de montrer le comportement du système avec la nouvelle stratégie de commande, nous avons obtenu des résultats illustrés dans les figures IV.12 à IV.16, représentant l'allure de l'onde du courant et son analyse harmonique et aussi le courant de charge, courant injecté par le filtre et la tension au borne du condensateur.

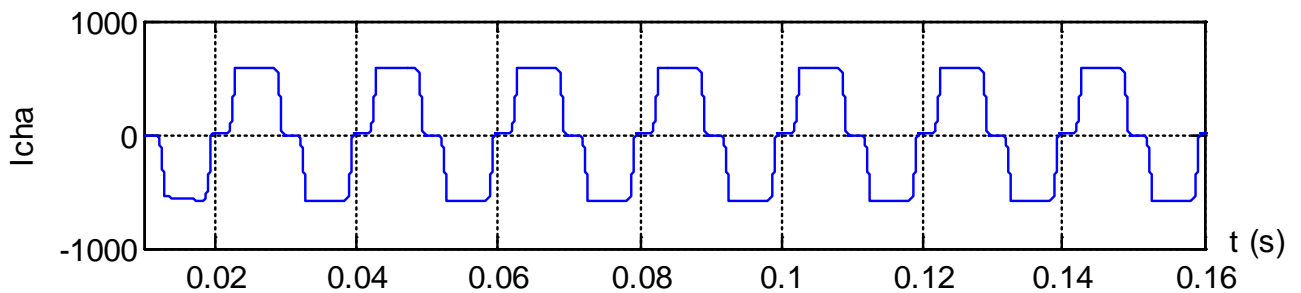


Figure IV.17 : Courant à travers la charge.

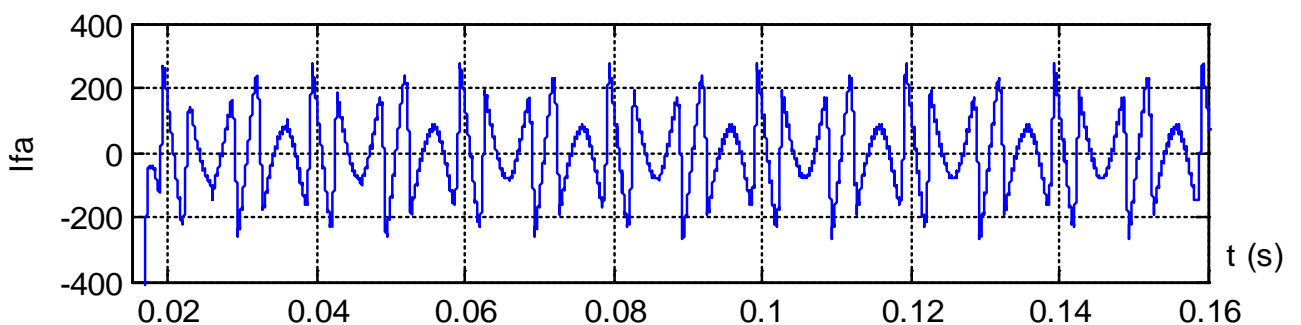


Figure IV.18 : courant du filtre.

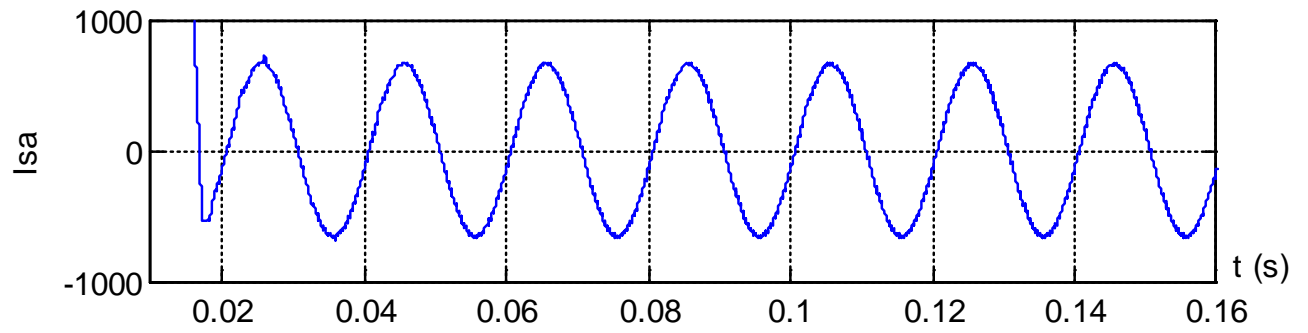


Figure IV.19 : courant de la source.

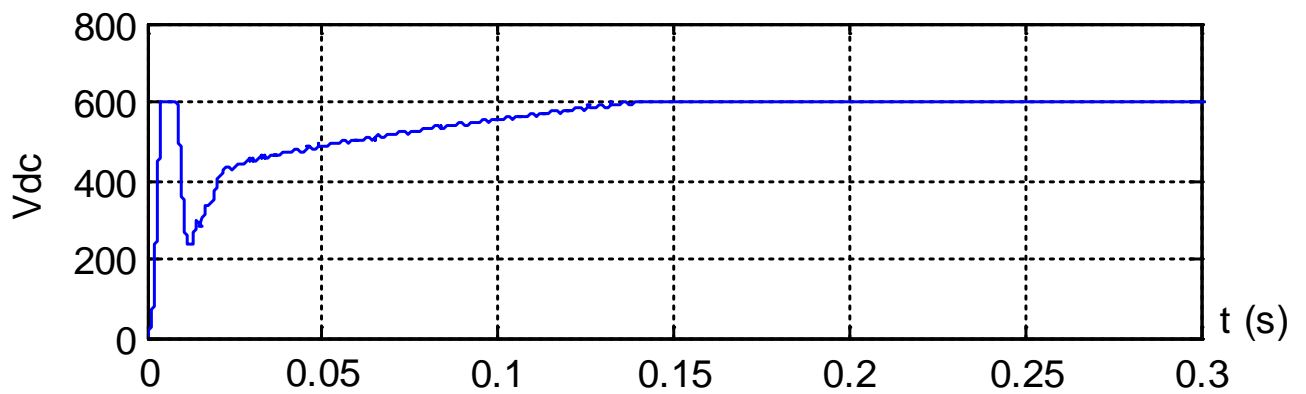


Figure IV.20 : allure de la tension  $V_{dc}$

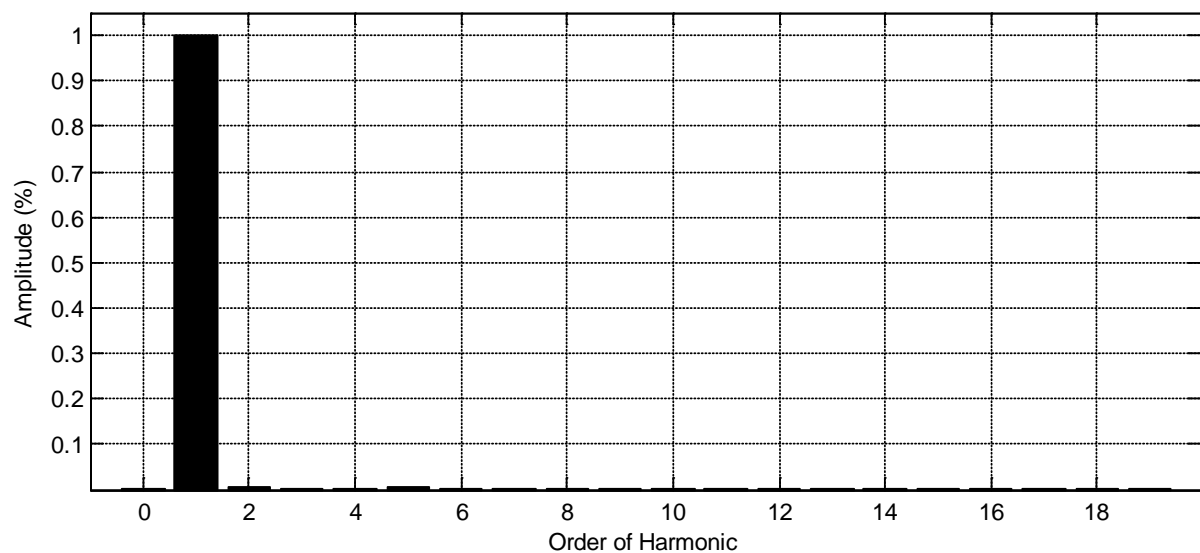


Figure IV.21 : analyse spectrale du courant de la source (THD = 0.90 %)

La figure (IV.20) montre les résultats de la régulation floue de la tension Vdc. Il apparaît clairement sur la figure que la tension Vdc s'établit un peu moins vite à sa référence choisie  $V_{dc_{ref2}} = 600V$  par rapport à la régulation classique  $V_{dc_{ref1}} = 750V$  avec la même fréquence de coupure égale à 300 rad/sec.

Par ailleurs, on remarque que l'effet du régulateur floue est surtout visible dans les ondes du courant et le taux d'harmonique : figures (IV.17) à (IV.19) et la figure (IV.21). En effet, ce résultat à la fois important et intéressant est illustré par la valeur du THD qui est évalué à 4 % environ pour une commande classique, atteint les 0.9% pour une commande à logique floue.

## IV.7 Conclusion :

Ce dernier chapitre a été consacré à l'application de la régulation floue dans le filtrage actif parallèle. Dans la première partie du chapitre nous avons essayé de vulgariser la théorie de la commande floue par des exemples simples et très explicatifs. Nous avons ensuite défini les principaux éléments composants la structure de régulateur floue à partir d'un schéma synoptique d'un contrôleur flou.

De plus, nous n'avons proposé une structure de régulation composée de deux types de régulateur, le premier définie la loi de régulation du courant généré par le filtre actif, tandis que l'autre assure la loi de stabilisation de la tension continue au borne du condensateur de stockage d'énergie. La dernière partie de ce chapitre est consacrée à la présentation et les commentaires des résultats obtenus par le SUMILINK du Matlab.

Les résultats que nous avons obtenus sont très satisfaisants. Nous pouvons constater facilement que la régulation à logique floue est nettement meilleure que celle classique, car elle permet d'une part de diminuer le taux de distorsion harmonique coté réseau, et d'autre part elle assure la compensation de la puissance réactive. Ces caractéristiques assurent que cette commande est plutôt assez robuste. Toutefois, ce type de régulateur est moins avantageux au niveau du régime transitoire, dont l'effet et l'importance sont a notre avis non négligeables.

## Conclusions générales et perspectives

---

Les travaux présentés dans ce mémoire avaient pour but d'atteindre une meilleure compréhension de la compensation des harmoniques et l'amélioration de la qualité du courant de la source.

Nous nous sommes particulièrement intéressés au filtre actif parallèle appelé aussi compensateur shunt. Différentes topologies de filtre actif ont été examinées et une attention particulière a été portée sur les différentes stratégies de la régulation basée sur l'utilisation des régulateurs à logique floue. Ainsi, par le biais des outils de simulation Matlab Simulink, il a été possible de comparer les performances de compensation de ces stratégies de commande.

Les filtres actifs parallèles ont de meilleures performances de compensation que les filtres passifs conventionnels. En effets, ils sont beaucoup moins influencés par les variations de fréquence des harmoniques ainsi que de l'impédance de ligne. Il existe une grande variété de configuration pour le filtre actif. Dans ce travail, le filtre actif parallèle à structure de tension a été étudié. Différentes structures de régulation ont été étudiées et simulées afin d'examiner quelques unes de leurs caractéristiques. L'algorithme de commande utilisé a été basé respectivement sur la méthode des puissances instantanées. Le choix des schémas de régulation des deux paramètres ; la tension continu et le courant harmonique sont très important pour l'auto adaptation du filtre actif aux variations de la charge. Afin d'améliorer les résultats de réglage de ces deux paramètres, une régulation proportionnel a été utilisé. Grâce à la propriété d'adaptation de la valeur du gain  $K_p$ , ce régulateur permet à la fois de limiter les fluctuations avec une bonne atténuation des ondulations. Le taux de distorsion harmonique total pour le courant de source est passé de 10,71% à 4,73% lors de la simulation en régime permanent.

L'apport des régulateurs flous basés sur la logique floue, ont facilité l'étude car ils sont moins sensibles aux variations paramétriques. Le régulateur à logique floue permet d'améliorer les résultats obtenus par le régulateur proportionnel classique avec un THD de 4.73 % à 0.90% coté réseau. De plus cette stratégie de commande ne nécessite pas un model mathématique, Toutefois, cette méthode est moins avantageuse au niveau du régime transitoire.

Il serait très intéressant, dans les prochains projets, d'effectuer le prototypage rapide de la carte de contrôle du filtre actif en lui faisant piloter un onduleur réel qui serait bouclé à un réseau virtuel. Les comparaisons d'algorithmes de commande ouvrent la voie à un autre domaine intéressant celui des réseaux de neurones. La conception de nouvelle stratégie de commande basée sur cette méthode ainsi qu'une implantation dans un DSP, pourrait être très intéressante.

- [1] Steeve Beaulieu, " Etude et mise au point d'un filtre actif d'harmoniques en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique ", Thèse de magister de l'université du Québec a Chicoutimi, Mai 2007.
- [2] W.M. Grady, S. Santoso, « Understanding Power System Harmonies », IEEE Power Engineering Review, November 2001.
- [3] Mohamad Alaa Eddin Alali,"Contribution à l' Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension», Thèse de doctorat de l' Université Louis Pasteur – Strasbourg I, Septembre 2002.
- [4] B. Singh, K. Al-Haddad and A.C. Chandra, « A Review of Active Filters for Power Quality Improvement », IEEE Trans. Industrial Electronics., Vol. 46, pp. 960-971,October 1999.
- [5] T Deflandre, C Courty, C Greiveldinger, EDF, « Impact des Harmoniques sur les Réseaux Publics Français », PPRD ,1995.
- [6] F.Z. Peng and D.J. Adams, "Harmonie sources and filtering approacheseries/ parallel, active/passive, and their combined power filters", Conference Record of the thirty-Fourth IAS IEEE Annual Meeting., Vol. 1, pp. 448-455. 1999.
- [7] F.Z. Peng, « Application issues of active power filter », IEEE Industry Applications Magazine., Vol. 4, pp. 21-30, Sept.-Oct. 1998.
- [8] S. Mouttou, « Nouvelles approches de commande d'un filtre actif parallèle à source de courant », Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Trois-Rivières, Octobre 2002.
- [9] H. Fujita and H. Akagi, « The Unified Power Quality Conditioner : The Integration of Series -and Shunt- Active Filter », IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.13, No. 2, March 1998.
- [10] F. Labrique, G. Segulier et R. Bausiere, « Les Convertisseurs de l'Électronique de puissance », Paris : Technique et Documentation-Lavoisier, 1995.
- [11] J. Xu, «Filtrage actif parallèle des harmoniques des réseaux de distribution d'électricité ». Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 1994.
- [12] H. Akagi, « New trends in active filters for power conditioning », IEEE Trans. on Industry applications, vol.32, No. 6, pp. 1312-1322, November/December 1996.

- [13] H. Akagi, « Control strategy and site selection of a shunt active filter for damping of harmonic propagation in power distribution systems », *IEEE Trans. on power delivery*, vol. 12, No. 1, pp. 354-363, January 1997.
- [14] H. Akagi, Y. Kanazawa and A. Nabae, "Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components", *IEEE Transaction on Industry Applications*, vol. IA-20, No. 3, May/June 1984.
- [15] K. Belacheheb, "Contribution à l'étude des systèmes de compensation FACTS en général, UPFC en particulier, pour le contrôle du transit de puissance dans un réseau de transport ", Thèse de doctorat de l'université de HENRI POINCARÉ NANCY I, 21 Juin 2001.
- [16] H. Haghghat, H. Seifi, and A. Yazdian, "An instantaneous power theory based control scheme for unified power flow controller in transient and steady state conditions", *Electric power systems research*, No. 64, pp 175-180, 2003.
- [17] E. GHOLIPOUR SHAHRAKI "Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques ", Thèse de doctorat de l'université de Henri Poincaré, Nancy-I, Octobre 2003.
- [18] J. XU, "Filtrage active shunt des harmoniques des réseaux de distribution d'électricité", Thèse de doctorat de l'INPL, Nancy, Janvier 1994.
- [19] S. Buso, S. Fasolo, L. Malesani et al, "A Dead-Beat Adaptive Hysteresis Current Control", *IEEE Trans. On Industry Application*, vol. 36, No. 4, pp.1174-1180, July/August 2000.
- [20] B. Sign, K. Haddad, A. Chandra. "A New Control Approach To Three Phase For Active Filters For harmonics And Reactive Power Compensation". In *IEEE Transactions On Power Systems*, Vol.13, N°1, February 1998.
- [21] T. Wildi, "Electrotechnique", *Avec La Collaboration De Gilbert Sybille, 3e édition. DeBoeck-Université, Canada, 1999*
- [22] A. Dell'Aquila, M. Liserre, V.G. Monopoli, M. Capurso, "An Unity Power Factor Front-End Rectifier For DC Power Systems", In *Proceedings of the IEEE Transactions on Power Tech Conference*, Vol.2, pp.6, Bologna, 23-26 June 2003.
- [23] R. M. Schupbach, J. C. Balda, "Comparing DC-DC Converters For Power Management In Hybrid Electric Vehicles", In *Proceeding of the IEEE Transactions on Electric Machines and Drives Conference, IEMDC03*, Vol.3, pp.1369-1374, 1-4 June 2003.
- [24] B. Mazari, F. Mekri, et S. Fasla. "Optimisation de l'énergie de stockage d'un filtre actif de puissance par logique floue". Dans le *CMGE'01*, 5-6 Novembre 2001, Constantine.

- [25] J. W. Dixon, J. M. Contardo, L. A. Morán. " *A Fuzzy-Controlled Active Front-End Rectifier with Current Harmonic Filtering characteristics and minimum Sensing Variables*". in IEEE transactions on power electronics, vol 14, n° 4, , pp. 724- 729.july 1999
- [26] Pierre SCHULZ « *Asservissement par logique floue* », pp 25-72.2002
- [27] L.A ZADEH « *Fuzzy set theory* » Définition des ensembles flous et opérateurs associés, 1965.
- [28] B.B. MEUNIE et C.MARSAL, « *logique floue : principe, aide à la décision* » Edition hermes science, lavoisier, 2003.
- [29] Mamdani, E. H.; Assilian, S., "An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller," *International Journal of Man-Machine Studies*, vol.7, pp.311-323, 1975.
- [30] Zadeh, L. A., "Fuzzy Sets," *Information and Control*, vol. 8, pp. 338-353, 1965.
- [31] L.A ZADEH « *the concept of a Linguistic Variable And Its Application To Approximate Reasoning* », part 3, information sciences, vol. 9, pp. 43-80.1976
- [32] H.kouara « application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un réseau basse tension », Thèse De Magister, Département d'Electrotechnique, Université De Batna, Faculté Des Sciences De l'Ingénieur, 2006.
- [33] J.R.Tong-Tong, « *La Logique Floue* », Édition Hermes, paris, 1995.
- [34] M. Mokhtari, M. Marie « applications de MATLAB 5 et SIMULINK 2 », Springer, pp 95-148,1998.
- [35] L. BAGHLI « Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques », Thèse De doctoral, Département de Formation Doctorale : Electrotechnique-Electronique de Nancy, Faculté des Sciences 1999.