

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE  
N° D'ORDRE : .....



DOMAINE : SCIENCE ET TECHNOLOGIE  
FILIERE : GENIE ELECTRIQUE  
OPTION : ENERGIE REVOUVELABLE EN  
ELECTROTECHNIQUE

**Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme de Master Académique**

**Par : ZOUAK Abd essamed**

**DECHOUCHA Kheirdinne**

**Intitulé**

**COMMANDE PAR LOGIQUE FLOUE D'UN  
FILTRE ACTIF PARALLELE**

**Soutenu devant le jury composé de :**

Mr. M.MAYOUF

Université M'sila

Président

Mr. L.BENYETTOU

Université M'sila

Rapporteur

Mr. A.DJERIOUUI

Université M'sila

Examineur

**Année universitaire : 2018 /2019**

**REMERCIEMENTS**

Nous rendons nos profondes gratitude à Dieu le tout puissant qui nous a aidés à réaliser ce travail.

Je tiens à exprimer mon remerciement et ma gratitude à mon encadreur:

Mr. BENYETTOU Lotfi qui a aidé pour rendre ce travail effectif .Je tiens également à remercier vivement les membres de jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail.

J'exprime toute ma gratitude à mon père, ma mère, mes frères et sœurs qui m'ont apporté soutien et encouragements tout au long de mes études.

Enfin, merci à mes amis qui ont partagé au quotidien mes espoirs et mes inquiétudes, qui m'ont réconforté dans les moments difficiles et avec qui j'ai partagé d'inoubliables instants de détente. Je vous remercie tous chaleureusement

Mr. djerioui . BEDBOUDI Mohamed . BENYETTOU , H . Yousra et tous les collègues.

Un grand merci à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation sans exception

## SOMMAIRE

<i>INTRODUCTION GENERALE</i> .....	1
------------------------------------	---

### *CHAPITRE I:*

#### **PERTURBATION DES RESEAUX ELECTRIQUES ET LEURS SOLUTIONS**

INTRODUCTION.....	3
I.1 Paramètres de la qualité de l'énergie électrique.....	3
I.1.1 Creux et coupures de tension.....	4
I.1.2 Fluctuations de tension.....	4
I.1.3 Déséquilibre du système triphasé de la tension.....	5
I.1.4 variation de fréquence .....	5
I.1.5 Charges linéaires et non linéaires.....	6
I.2 Les harmoniques.....	6
I.2.1 Définition.....	6
I.2.2 différent Type des harmoniques.....	6
I.2.2.1 Inter harmoniques.....	7
I.2.2.2 Infra harmoniques.....	7
I.2.3 Sources des harmoniques et leurs effets.....	8

# Sommaire

---

I.2.4 Caractérisation des perturbations harmoniques .....	9
I.2.4.1 Le taux de distorsion harmonique .....	10
I.2.4.2 Le facteur de puissance .....	10
I.2.5 Conséquences de la distorsion harmonique.....	11
I.2.6. Normes et réglementations.....	12
I.3 Solutions de dépollution du réseau électrique.....	13
I.3.1 Solutions traditionnelles .....	14
I.3.1.1 Filtres passifs résonants.....	14
I.3.1.2 Filtres passifs amortis.....	15
I.3.2 Solution moderne.....	16
I.3.2.1 Filtre actif parallèle.....	16
I.3.2.2 Filtre actif série.....	18
I.3.2.3 La combinaison parallèle-série actifs (UPQC).....	18
I.3.2.4 Filtrage hybride.....	19
I.4 Conclusion.....	21

## CHAPITRE II:

### STRUCTURE ET COMMANDE D'UN FILTRE ACTIF PARALLELE

Introduction.....	22
II.1 Principe de filtre actif parallèle.....	22

# Sommaire

---

II.2 structure générale du filtre actif parallèle.....	23
II.3 Etude de la partie puissance.....	24
II.3.1 Onduleur de tension à deux niveaux.....	25
II.3.1.1 Structure générale .....	25
II.3.1.2 Tension générées par l'onduleur.....	26
II.3.2 Filtre de découplage.....	27
II.3.3 Système de stockage de l'énergie .....	27
II.5 Etude de la partie de commande.....	28
II.5.1 Identification des courants harmoniques de référence.....	28
II.5.2 Stratégie d'identification.....	29
II.6 Comparaison entre les méthodes d'identification des courants harmoniques.....	29
II.6.1 La méthode de puissances instantanées.....	30
II.6.2 Séparation des puissances perturbatrices .....	32
II.6.3. Calcul des courants perturbateurs.....	32
II.6.4 Algorithme d'identification .....	33
II.7 Contrôle des courants du filtre actif.....	34
II.7.1 Commande à hystérésis .....	34
II.7.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) .....	35
II.8 la logique floue .....	36
II.8.1 Domaine d'application.....	36
II.8.2 Principe de la logique floue.....	37
II.8.3 Eléments de base de la logique floue.....	38

## Sommaire

---

II.8.3.1 Variables linguistiques .....	48
II.8.3.2 Ensembles floue.....	39
II.8.3.3 Fonctions d'appartenance .....	39
II.9 Commande par logique floue.....	40
II.9.1 Constitution d'un système floue.....	40
II.9.1.1 Interface de fuzzification.....	41
II.9.1.2 Base de règles .....	41
II.9.1.3 Mécanisme d'inférence floue.....	41
II.9.1.4 Interface de Défuzzification.....	42
II.9.2 Commande par hystérésis à bande floue.....	43
II.9.3 Principe de la commande hystérésis à bande floue.....	45
II .10 Conclusion.....	45

## CHAPITRE III

### RESULTANTS DE SIMULATION

Introduction.....	46
III .1 Résultats de simulation de l'ensemble réseau charge non- linéaire avant Filtrage.....	46
III . 2 Résultats de simulation de l'ensemble réseau charge non-linéaire après le filtrage.....	47
II. 2.1Commande par hystérésis .....	47

## Sommaire

---

II.2.3. Commande par MLI.....	48
II.2.4 Commande hystérésis à bande floue.....	49
III.3 Interprétation.....	49
III.4 conclusion.....	50
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>51</b>

**LISTE DES FIGURES**

*CHAPITRE I*

**PERTURBATION DES RESEAUX ELECTRIQUES ET LEURS SOLUTIONS**

Figure (I.1) : Creux de tension et coupure.....04

Figure (I.2) : Fluctuations de tension.....05

Figure (I.3) : Déséquilibre du système triphasé de la tension.....05

Figure (I.4) : Variation de fréquence.....06

Figure (I.5) : Image d'une onde déformée .....07

Figure (I.6) : Représentation spectral d'un signal périodique.....08

Figure (I.7) : Filtre passif résonnant.....15

Figure (I.8) : Filtre amorti.....15

Figure (I.9) : Structure du filtre actif parallèle.....17

Figure(I.10) : Courants de charge non-linéaire  $I_{c1}$ , de source  $I_{S1}$  et celui du filtre actif  $I_{f1}$ .....17

Figure (I.11) : Structure du filtre actif série.....18

Figure(I.12) : Combinaison Filtre parallèle-série UPQC.....19

Figure (I.13) :présente la structure de filtre hybride.....19

Figure (I.14): Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle.....20

Figure (I.15) : Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.....20

**CHAPITRE II**  
**STRUCTURE ET COMMANDE D'UN FILTRE ACTIF PARALLELE**

Figure(II.1) : Principe du filtre actif parallèle.....23

Figure(II.2) : schéma synoptique d'un filtre actif parallèle.....24

Figure (II.3) : schéma du circuit de puissance d'un filtre actif parallèle à structure tension.....24

Figure (II.4) : Onduleur de tension triphasé.....25

Figure (II.5) : Schéma représentant le principe de séparation des puissances (Y= p ou q).....32

Figure (II.6) : algorithme d'identification des harmoniques.....34

Figure(II.7) : Principe de la commande des courants par hystérésis.....35

Figure(II.8) : Principe de commande des courants par MLI.....35

Figure (II.9) : Classification des personnes en trois ensembles selon la logique classique.....36

Figure (II. 10) : Classification des personnes en trois ensembles selon la logique floue.....38

Figure (II.11) : Différentes formes des fonctions d'appartenance.....38

Figure (II.12): Schéma général d'un système floue [25].....40

Figure (II.13) : Défuzzification par centre de gravité.....41

Figure(II.14) : les fonction d'appatennance des variable.....43

Figure (II.15) : Principe de la Commande hystérésis à bande floue.....44

**CHAPITRE III**  
**RESULTANTS DE SIMULATION**

Figure( III.1 )Schéma global de l'association réseau-charge-onduleur avant et après compensation.....46

Figure (III.2) : La tension de source et le courant de source avec son spectre avant filtrage.47

La Figure (III.3) : Les grandeurs simulées pour la commande par hystérésis à bande fixe...47

La Figure (III.4) : Les grandeurs simulées pour la commande par MLI.....48

La Figure (III.5) : Les grandeurs simulées pour la commande par hystérésis à bande floue..49

**LISTE DES TABLEAUX**

**CHAPITRE I:  
PERTURBATION DES RESEAUX ELECTRIQUES ET LEURS SOLUTIONS**

Tableau (I.1) : Limites des composantes harmoniques en courant.....1

**CHAPITRE II:  
STRUCTURE ET COMMANDE D'UN FILTRE ACTIF PARALLELE**

Tableau (II.1) : Tensions en sortie de l'onduleur..... 27

Tableau (II.2) Comparaison entre les méthodes d'identification des harmoniques..... 30

Tableau (II.3) : Règles de la commande floue.....44

**CHAPITRE III:  
RESULTANTS DE SIMULATION**

Tableau (III.1) Paramètres de simulation d'un filtre actif à deux niveaux.....46

## TABLE DES NOTATIONS ET SYMBOLES

$h$	Rang d'harmonique
$Y_{\text{eff}}$	Valeur efficace d'un signal
THD	Taux distorsion harmonique
$F_p$	Facteur de puissance
$V$	Facteur de déformation
$I$	Courant total (fondamental+ harmonique)
$V_h$	Tension d'harmonique de rang $h$
$P$	Puissance active
$Q$	Puissance réactive
$S$	Puissance apparente
$D$	Puissance déformante
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
$V_s(V)$	Tension de réseau
$I_{s1}, I_{s2}, I_{s3}(A)$	Courant de source après filtrage
$I_{c1}, I_{c2}, I_{c3}(A)$	Courant de la charge polluante
$V_{dc}(V)$	Tension continue
$T_1$	Thyristor numéro 1
$I_{h1\text{eff}}(A)$	Valeur efficace du courant harmonique
$I_{ch}(A)$	Courant de charge
$V_{ch}(V)$	Tension de charge
$V_{\alpha, \beta}(V)$	Les tensions du réseau électrique au point de raccordement du filtre actif dans le repère stationnaire
$I_{\alpha, \beta}(A)$	Les courants du réseau électrique dans le repère stationnaire
$p(t)$	Puissance réelle instantanée
$p_0(t)$	Puissance homopolaire instantanée
$P(t)$	Puissance active instantanée
$I_{1hf}, I_{2hf}, I_{3hf}(A)$	Courant de référence
$\Delta h(A)$	Bande d'hystérésis
$I_f(A)$	Courant du filtre

# **INTRODUCTION GENERALE**

## Introduction générale

Aujourd'hui, la situation au niveau des réseaux d'énergie électrique est devenue très préoccupante, la qualité du courant dans les installations électriques se dégrade incontestablement. Elle devient donc une préoccupation importante pour les distributeurs de cette énergie et pour leurs clients. Cette dégradation découle directement de la prolifération des charges qui consomment un courant non sinusoïdal, appelées « charges non linéaires ». Ce type de charge est utilisé pour assurer la conversion, la variation et la régulation du courant électrique dans les installations commerciales, industrielles et résidentielles .[1]

L'énergie électrique est généralement distribuée sous la forme de trois tensions constituant un système sinusoïdal triphasé, un des paramètres de ce système est la forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde.

Parmi les solutions adoptées, l'efficacité des filtres passifs se limite à la connaissance préalable de la charge polluante imposant la distorsion du courant.

Mais aujourd'hui, les récents progrès en matière de technologie de l'électronique de puissance apportent une capacité sans précédent de compensation et de correction de la distorsion harmonique générée par les charges non linéaires en utilisant un compensateur actif parallèle, permettant de dépolluer les réseaux électriques.

Le principe de compensation est basé sur l'injection en permanence, au point de connexion (filtre actif parallèle - réseau), des courants qui correspondent à tout moment aux composantes harmoniques des courants absorbés par la charge, de cette manière, le courant fourni par la source d'énergie reste sinusoïdal.

Ce dispositif facile à mettre en œuvre, et peut être installé en n'importe quel point d'un réseau notamment de basse tension, pour compenser la puissance absorbée par une ou plusieurs charges non linéaires, évitant ainsi la circulation des courants harmoniques dans tout le réseau.

Ce mémoire comporte trois chapitres :

**Dans le premier chapitre**, nous présenterons les perturbations, en courant et en tension, des réseaux électriques connectés à des charges dites polluantes. Les origines de cette pollution harmonique, les conséquences et les normes inhérentes à ces perturbations sont examinées.

Ensuite, les différentes solutions traditionnelles et modernes de filtrage possibles sont présentés : filtrage passif, actif et hybride.

**Dans le second chapitre**, nous étudions la structure générale des FAP triphasés permettant de compenser les courants harmoniques présents sur les réseaux électriques triphasés à trois fils . Dans ce chapitre nous intéresserons à l'étude , la partie puissance , onduleur de tension deux niveaux à trois bras , Système de stockage de l'énergie , Filtre de découplage sera consacré plutôt à l'étude des stratégies de commande des filtres actifs de puissance, pour la compensation des harmoniques de courant d'un réseau électrique à trois fils, nous présenterons la partie contrôle-commande du FAP ,La méthode d'identification des courants perturbés (méthode de puissance imaginaire instantanées  $pq$  ), contrôle du courant de sortie du compensateur actif (contrôle de courant par hystérésis , la Commande par MLI à porteuse triangulaire et command par hystérésis à bonde floue ).

**Dans le troisième chapitre**, en utilisant le logiciel de simulation MATLAB 7.1 et nous permettent d'analyser les performances et la faisabilité du système de compensation des harmoniques aussi bien dans le domaine temporel que spectral. En fin, une conclusion générale de ce travail ainsi que des perspectives clôturent le document.

# **Chapitre I**

PERTURBATION DES RESEAUX  
ELECTRIQUES ET LEURS  
SOLUTION

## INTRODUCTION

L'énergie électrique, principalement produite et distribuée sous forme de tensions triphasées sinusoïdales, permet de fournir la puissance électrique nécessaire aux différents consommateurs d'énergie électrique. Dans le cas idéal, cette énergie doit être fournie sous la forme d'un ensemble de tensions constituant un système alternatif triphasé équilibré, qui possède quatre caractéristiques principales : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie. Cependant cet objectif semble idéal et n'est jamais facile à assurer, car le réseau électrique aujourd'hui est appelé à fonctionner sous un environnement de plus en plus perturbateur.

Le regain d'acuité de cette perturbation provient de la prolifération récente d'emploi des charges non linéaires, notamment les convertisseurs statiques. En effet, ces dispositifs consomment des courants non-sinusoïdaux, même s'ils sont alimentés par une tension sinusoïdale : ils se comportent comme des générateurs de courants harmoniques. La circulation de ces courants à travers les diverses impédances du réseau jusqu'à l'utilisateur final fait apparaître des tensions harmoniques superposées à l'onde fondamentale. Les conséquences sont néfastes tant pour le distributeur de l'électricité que pour l'utilisateur.

Pour faire face à ce problème, il est indispensable de comprendre l'origine des perturbations des réseaux électriques et de chercher les solutions appropriées permettant l'atténuation des effets les plus nuisibles.

Ce chapitre est consacré à la présentation des principales perturbations électriques. Dans sa première partie nous présenterons les origines et conséquences de ces perturbations sur le réseau. Dans sa deuxième partie, seront représentées les solutions usuelles de compensation de ces perturbations, avec un intérêt particulier pour les différents types de filtrage.

### **I.1 Paramètres de la qualité de l'énergie électrique**

L'énergie électrique est fournie sous forme de tension constituant un système sinusoïdal triphasé dont les paramètres caractéristiques sont les suivants :

- La fréquence.
- L'amplitude.
- La forme d'onde qui doit être sinusoïdale.
- La symétrie du système triphasé caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leurs déphasages relatifs.

La qualité de l'énergie peut être affectée, soit du fait de certains incidents inhérents à la nature physique et aux sujétions liées à l'exploitation du réseau, soit du fait de certains récepteurs. Ces défauts se manifestent sous forme de différentes perturbations affectant un ou plusieurs des quatre paramètres précédemment définis. On a donc quatre possibilités distinctes de perturbation [1] :

### I.1.1 Creux et coupures de tension

Un creux de tension est une diminution de la tension à une valeur située entre 1 et 90% de la tension nominale et d'une durée allant de 10 ms jusqu'à 1 minute. Une coupure brève est un cas particulier du creux de tension.

Les creux de tension sont dus à l'apparition de défauts sur l'installation ou sur le réseau de distribution. Les coupures brèves sont généralement la cause de manœuvres des automatismes des réseaux de distribution (réenclencher, isolations de défaut), la figure I-1 montre un exemple de creux et de coupure de tension.

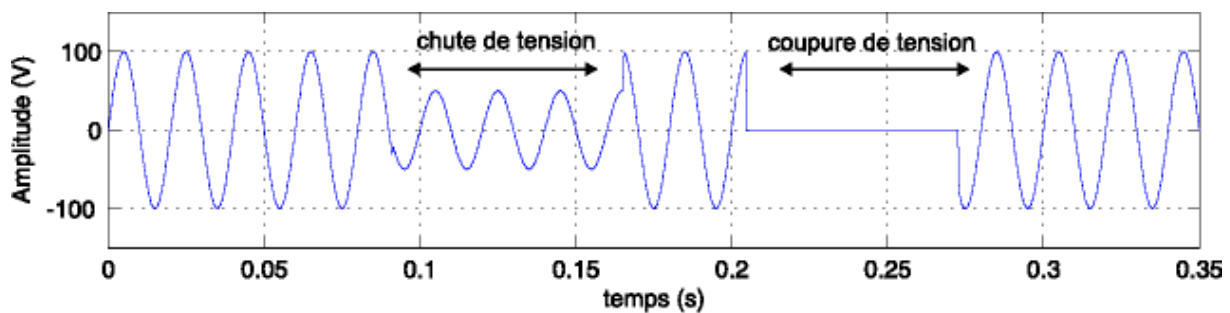


Figure (I.1) : Creux de tension et coupure.

### I.1.2 Fluctuations de tension

Les variations de tension sont des variations de la valeur efficace ou de la valeur crête d'amplitude inférieure à 10 % de la tension nominale et les fluctuations de tension sont des suites de variations de tension ou des variations cycliques ou aléatoires de l'enveloppe d'une tension dont les caractéristiques sont la fréquence de la variation et l'amplitude, un exemple de fluctuation de tension est montré dans la figure (I.2)

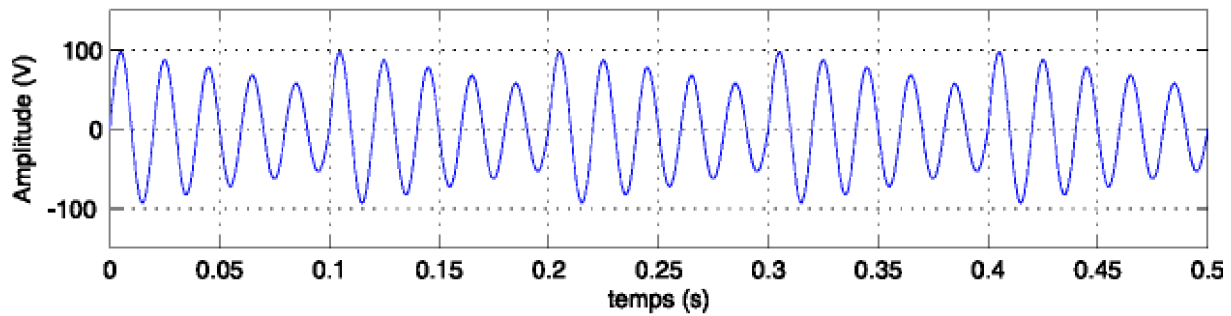


Figure (I.2) : Fluctuations de tension.

### I.1.3 Déséquilibre du système triphasé de la tension

Le distributeur d'électricité fournit à l'utilisateur un ensemble de trois tensions sinusoïdales appelé système triphasé. Ces trois tensions ont théoriquement la même valeur efficace et sont également décalées d'un angle de  $120^\circ$  les unes par rapport aux autres. Lorsque les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalées d'un angle de  $120^\circ$  les unes par rapport aux autres, on parlera de déséquilibre du système triphasé, comme le montre la Figure (I.3)

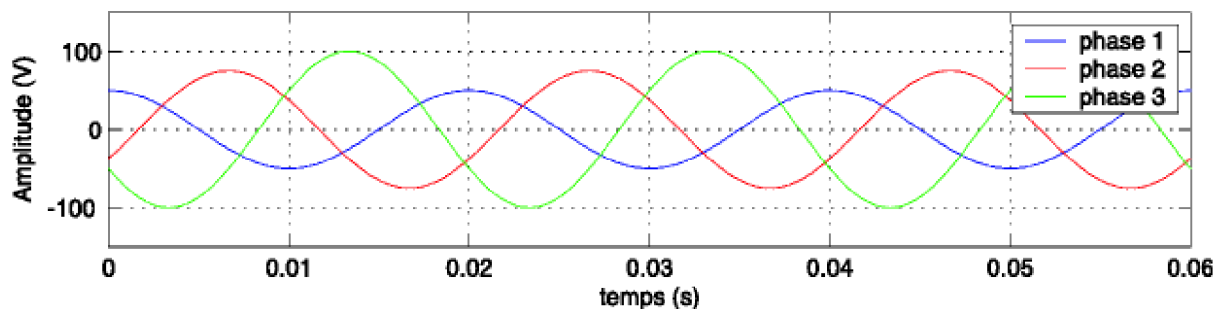


Figure (I.3) : Déséquilibre du système triphasé de la tension.

### I.1.4 variation de fréquence

Une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non inter connectés ou alimentés par une source thermique autonome, comme le montre la figure I.4. Au niveau des réseaux de distribution ou de transport, cette variation de la fréquence est très rare et n'est présente que lors de circonstances exceptionnelles comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle  $50 \text{ Hz} \pm 1\%$ .

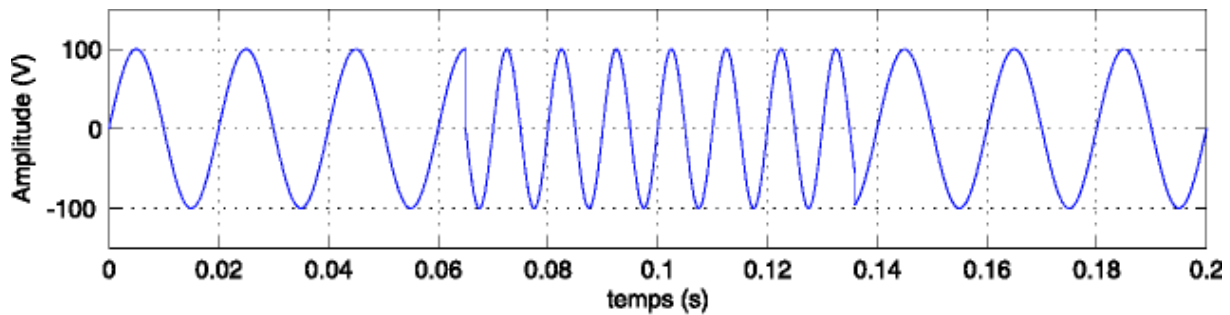


Figure (I.4) : Variation de fréquence.

### I.1.5 Charges linéaires et non linéaires

Les récepteurs peuvent être classés en deux familles principales :

- les récepteurs linéaires (ou charges linéaires).
- les récepteurs non-linéaires (ou charges non-linéaires).

Une charge est dite linéaire si, alimentée par une tension sinusoïdale, elle consomme un courant sinusoïdal. Cependant, le courant et la tension peuvent être déphasés. Les charges linéaires couramment utilisées sont constituées de résistances, de capacités et d'inductances.

Une charge est dite non-linéaire lorsque la relation entre la tension et le courant n'est plus linéaire. Un tel récepteur alimenté par une tension sinusoïdale, consomme un courant non-sinusoïdal [2].

## I.2 Les harmoniques

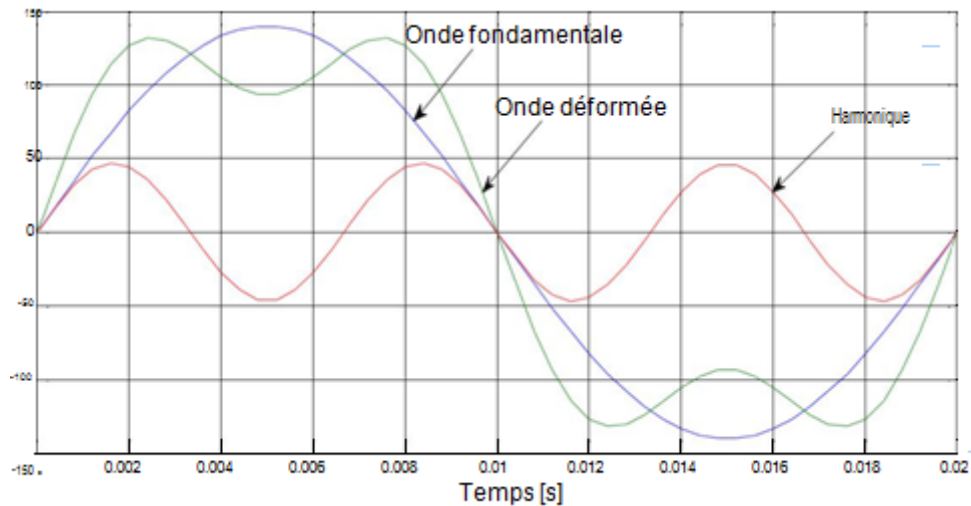
### I.2.1 Définition

Un harmonique est défini comme étant une composante sinusoïdale d'un signal périodique, ayant une fréquence multiple de l'onde fondamentale. Le domaine des fréquences qui correspond à l'étude des harmoniques est généralement compris entre 100 Hz et 2000 Hz (entre les harmoniques de rangs  $h=2$  et  $h=40$ ) [03-04].

L'amplitude de rang 1 est appelée la composante fondamentale du signal électrique périodique; dans notre cas c'est la (50 Hz).

L'amplitude de chaque harmonique est inversement proportionnelle à son ordre.

Les premiers rangs harmoniques tel que (3, 5, 7,9) ont des amplitudes élevées, d'où l'importance des courants injectés, raison pour laquelle il faut limiter ces harmoniques dans les normes [03-04].



**Figure (I.5) :** Image d'une onde déformée

## I .2.2 défèrent Type des harmoniques

### *I.2.2.1 Inter harmoniques :*

Les inter-harmoniques sont des composantes sinusoïdales qui ne sont pas des fréquences entières de celle du fondamental

La grande majorité des tensions et courants inter harmoniques sur le réseau est générés par des convertisseurs de fréquence statiques, tels les variateurs de vitesse pour moteurs asynchrones qui renvoient vers le réseau des multiples de la fréquence de sortie de l'onduleur.

### *I.2.2.2 Infra harmoniques :*

Ce sont des composantes sinusoïdales qui sont à des fréquences inférieurs à celles du Fondamental : 10Hz, 20Hz .Dans ce cas, le signal n'est pas périodique à T

(T : période du Fondamental).

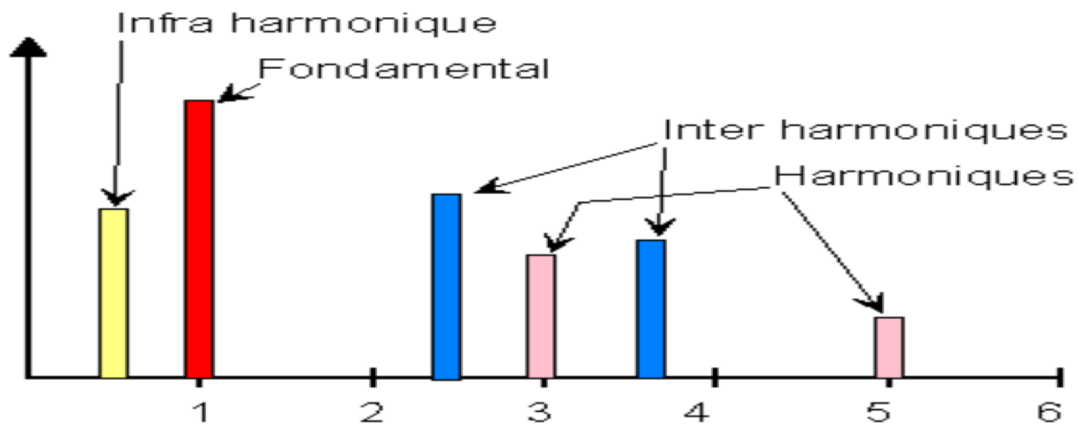


Figure (I.6) : Représentation spectrale d'un signal périodique

### I.2.3 Sources des harmoniques et leurs effets

L'utilisation des équipements électriques comportant des convertisseurs statiques dans les installations de conversion d'énergie électrique a entraîné ces dernières années une augmentation sensible du niveau de pollution harmonique. Ils ont contribué à la détérioration de la qualité du courant et de la tension des réseaux de distribution.

Les principales sources à l'origine des harmoniques sont les appareils d'éclairage fluorescent, les appareillages informatiques, les appareils domestiques (téléviseurs, appareils électroménagers en grand nombre), les arcs électriques et tous les convertisseurs statiques raccordés aux réseaux tels que les redresseurs et les onduleurs. Tous ces systèmes contribuent à la pollution harmonique du réseau auquel ils sont connectés.

En effet, ces systèmes absorbent des courants non sinusoïdaux, même s'ils sont alimentés par une tension sinusoïdale. Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers ou non entiers de la fréquence fondamentale.

La présence d'harmoniques de courant ou de tension conduit à des effets néfastes sur réseau de distribution, comme par exemple [05],[06],[07].

- L'échauffement des conducteurs, des câbles, des condensateurs et des machines dû au pertes cuivre et fer supplémentaires.

- L'interférence avec les réseaux de télécommunication, causée par le couplage électromagnétique entre les réseaux électriques et les réseaux de télécommunication qui peut induire dans ces derniers des bruits importants.

- Le dysfonctionnement de certains équipements électriques comme les dispositifs de commande et de régulation. En présence d'harmoniques, le courant et la tension peuvent changer plusieurs fois de signe au cours d'une demi-période. Par conséquent, les équipements sensibles au passage par zéro de ces grandeurs électriques sont perturbés.

- Des phénomènes de résonance. Les fréquences de résonance des circuits formés par les inductances du transformateur et les capacités des câbles sont normalement assez élevées, mais celles peuvent coïncider avec la fréquence d'un harmonique. Dans ce cas, il y aura une amplification importante qui peut détruire les équipements raccordés au réseau.

La dégradation de la précision des appareils de mesure. Des perturbations induites sur les lignes de communication, rayonnement électromagnétique notamment

- ceux provenant du fonctionnement d'appareils à charge fluctuante ou de la mise en service d'appareils appelant un courant élevé au démarrage (moteurs ...etc.),

- ceux liés aux phénomènes aléatoires, comme la foudre ou tous les courts-circuits accidentels sur les réseaux de distribution, ou les réseaux internes des clients (défaut d'isolation, blessure de câble, projection de branches sur les lignes aériennes).

Les creux de tension sont caractérisés par leur amplitude et par leur durée. Ils sont monophasés, biphasés ou triphasés suivant le nombre de phases concernées.

Les creux de tension sont susceptibles de perturber le fonctionnement de certaines installations industrielles et tertiaires. En effet, ce type de perturbation peut causer des dégradations de fonctionnement des équipements électriques qui peuvent aller jusqu'à la destruction totale de ces équipements.

#### **I.2.4 Caractérisation des perturbations harmoniques**

Plusieurs critères sont définis pour caractériser les perturbations. Le taux de distorsion harmonique et le facteur de puissance sont les plus employés pour quantifier respectivement les perturbations harmoniques et la consommation de puissance réactive.

### 1.2.4.1 Le taux de distorsion harmonique

On utilisera le terme THD (Total Harmonic Distortion) pour désigner le taux de distorsion Harmonique . Le THD s'exprime par rapport à la fréquence fondamentale et caractérise l'influence des harmoniques sur l'onde de signal déformée. Deux taux de distorsion harmonique sont distingués [7] :

- le taux de distorsion harmonique en courant, noté  $THD_i$
- le taux de distorsion harmonique en tension, noté  $THD_v$

Le premier s'exprime sous la forme :

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left( \frac{I_h}{I_1} \right)^2} \quad (I,1)$$

Avec :  $I_1$  la valeur efficace du courant fondamental et  $I_h$  les valeurs efficaces des différentes harmoniques du courant.

Le  $THD_i$  ne dépend que des valeurs efficaces du courant de charge. En revanche, le  $THD_v$  est fonction des courants harmoniques, caractérisant la charge, et de l'impédance de court circuit, imposée par le réseau :

$$THD_v = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left( \frac{I_h}{I_1} \right)^2} = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left( \frac{|Z_{cc}^h| I_h}{V_1^2} \right)^2} \quad (I,2)$$

$V_1$ : désigne la valeur efficace de  $V_1$

Ainsi, plus les impédances  $z_{cc}^h$  ( $h > 1$ ) sont faibles, plus la distorsion en tension est faible.

### 1.2.4.2 Le facteur de puissance

Normalement, pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance est donné par le rapport entre la puissance active  $P$  et la puissance apparente  $S$ . Les générateurs, les transformateurs, les lignes de transport et les appareils de contrôle et de mesure sont dimensionnés pour la tension et le courant nominaux. Une faible valeur du facteur de puissance se traduit par une mauvaise utilisation de ces équipements.

Dans le cas où il y a des harmoniques, une puissance supplémentaire appelée la puissance déformante ( $D$ ) entre en considération. Elle est donnée par la relation [8] :

$$D = V \cdot \sqrt{\sum_{n \neq 1}^{\infty} I_{sn}^2} \quad (I,3)$$

Le facteur de puissance est donc égale :

$$F_P = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (I.4)$$

Avec :

$$P = V I_{s1} \cos \varphi_1 \quad (I.5)$$

$$Q = V I_{s1} \sin \varphi_1 \quad (I.6)$$

On peut aussi calculer le facteur de puissance de la manière suivante :

$$F_p = \frac{V \cdot I_{s1} \cdot \cos \varphi_1}{V \cdot I_s} = \frac{I_{s1}}{I_s} \cos \varphi_1 \quad (I.7)$$

On constate que la puissance déformante et la puissance réactive contribuent à la dégradation du facteur de puissance.

### I.2.5 Conséquences de la distorsion harmonique

De nombreux effets des harmoniques sur les installations et les équipements électriques peuvent être cités. Les effets les plus importants sont l'échauffement, l'interférence avec les réseaux de télécommunication, les défauts de fonctionnement de certains équipements électriques et le risque d'excitation de résonance [7] :

- **Echauffement**

Les pertes par effet Joule se décomposent en la somme des pertes issues du fondamental et de celles engendrées par les harmoniques :

$$p_j = R I^2 = R I_1^2 + R \sum_{h=2}^{\infty} I_h^2 \quad (I.8)$$

Ces pertes supplémentaires occasionnées par la présence des courants harmoniques réduisent le rendement des équipements tels que les moteurs, les transformateurs, ... etc.

- **Dysfonctionnement de certains équipements**

En présence d'harmoniques, le courant et la tension peuvent changer plusieurs fois de signe au cours d'une demi-période. Par conséquent, les équipements sensibles au passage par zéro de ces grandeurs électriques sont perturbés.

- **Interférences dans les systèmes de communication**

Le couplage électromagnétique entre les réseaux électriques et de communication peut provoquer des interférences. Le courant circulant dans le réseau électrique engendre un

champ magnétique qui induit un courant dans les conducteurs des réseaux de communication. L'importance des interférences est fonction de l'amplitude et de la fréquence des courants électriques ainsi que de l'importance du couplage électromagnétique entre les réseaux.

#### •Excitation des résonances

Des équipements constitués de capacités ou d'inductances peuvent avoir des fréquences de résonance proches de celles des harmoniques. Ainsi, les harmoniques sont amplifiées et il peut apparaître des surtensions ou des surintensités qui détériorent les câbles, font disjoncter les fusibles.

### **I.2.6. Normes et réglementations**

Afin de limiter les dysfonctionnements occasionnés par les harmoniques et en même temps pour limiter l'influence des charges sur le réseau de façon à éviter la modification de ses caractéristiques, des normes sur la qualité de l'énergie ont été imposées.

La CEI (Commission Electrotechnique Internationale) et l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) sont les deux principaux organismes de normalisation internationaux dans le domaine de l'électrotechnique. La CEI est un organisme officiel composé de comités nationaux de 63 pays, tandis que l'IEEE est une association professionnelle. Ces deux organismes réalisent la principale activité de normalisation dans le domaine des perturbations électriques au niveau mondial mais n'ont pas une uniformité de critères en ce qui concerne la définition des interactions entre le réseau et les charges connectées [9].

Afin de faciliter la connaissance des normes pour chaque domaine, les normes CEI qui couvrent tous les domaines de l'électrotechnique sont numérotées et référencées comme par exemple CEI 61000 sur la compatibilité électromagnétique et CEI 60063 qui définit les séries de valeurs normalisées pour les résistances et condensateurs.

Au niveau international (CEI), les normes CEI-1000 définissent les niveaux des courants et des tensions harmoniques à respecter. Le Tableau I.1 présente la norme CEI-1000-3-2 qui fixe la limitation des courants injectés dans un réseau public basse tension pour des équipements dont le courant par phase est inférieur à 16 A. Il s'agit là des appareils du domaine domestique. Aussi, du fait de leur puissance, les équipements industriels sont exclus du champ d'application de cette norme [10].

Harmoniques impaires		Harmoniques paires	
Rang	Courant harmonique admissible maximal (A)	Rang	Courant harmonique admissible maximal (A)
3	2.30	2	1.08
5	1.14	4	0.43
7	0.77	6	0.30
9	0.40	$8 \leq h \leq 40$	$0.23 \cdot 8/h$
11	0.33		
13	0.21		
$15 \leq h \leq 39$	$0.15 \cdot 15/h$		

**Tableau (I.1) :** Limites des composantes harmoniques en courant.

Les limitations en tension harmonique que les clients de EDF doivent respecter sont [11] :

- pour un harmonique pair :  $\frac{v_h}{v_1} \leq 0.6\%$ ;
- pour un harmonique impair :  $\frac{v_h}{v_1} \leq 1\%$ ;
- pour le taux de distorsion global de tension :  $THD \leq 1.6\%$ ;

Il est d'usage de dire que, dans les installations industrielles, les tensions harmoniques dont le THD est inférieur à 5 % ne produisent pas d'effet notable. Entre 5 % et 7 % on commence à observer des effets, et pour plus de 10 % les effets sont quasi certains.

D'autre part, la norme principale, IEEE 519-1992, recommande practices and requirements for harmonic control in power Systems, détermine la procédure pour contrôler les harmoniques présents sur le réseau électrique. Elle impose également les limites recommandées de la pollution harmonique générée par les clients et de distorsion harmonique totale sur le réseau[12] . Cette norme limite la distorsion harmonique THD du courant des réseaux < 69 kV à 5 %.

### I.3 Solutions de dépollution du réseau électrique

Afin de compenser toutes les perturbations, deux méthodes de solution de dépollution, traditionnelle et moderne sont présentés. Le filtrage est une méthode de réduction des missions harmoniques au sein d'un site industriel, où la distorsion harmonique a graduellement augmenté ou comme solution globale pour un nouveau site, donc le filtre est un absorbeur de courants harmoniques [13].

On distingue les techniques suivantes:

**a) les filtres passifs.**

**b) les filtres actifs.**

**c) les filtres hybrides.**

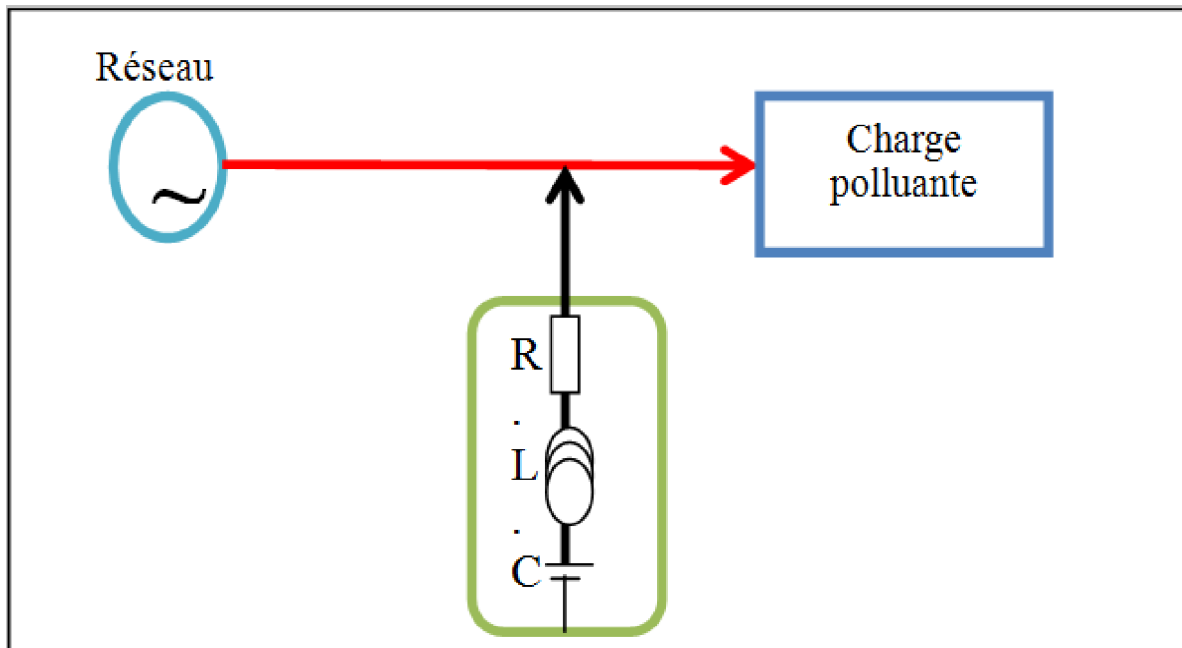
### **I.3.1 Solutions traditionnelles**

A fin de dépolluer les réseaux électriques, plusieurs solutions ont été proposées, dont le but est de limiter la propagation et l'effet des harmoniques dans les réseaux électriques [14].

- L'augmentation de la puissance de court circuit du réseau et l'utilisation des convertisseurs peu polluants qui ont pour effet de diminuer la distorsion harmonique.
- L'utilisation de dispositif du filtrage pour réduire la propagation des harmoniques produits par les charges non-linéaires.
- Les filtres passifs: cette solution de dépollution consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau. Parmi les dispositifs du filtrage les plus répondus, On distinguera deux types de filtres assurant la limitation des tensions harmoniques
  - **filtre passif résonnant.**
  - **filtre passif amortie ou passe-haut:**

#### **I.3.1.1 Filtres passifs résonants**

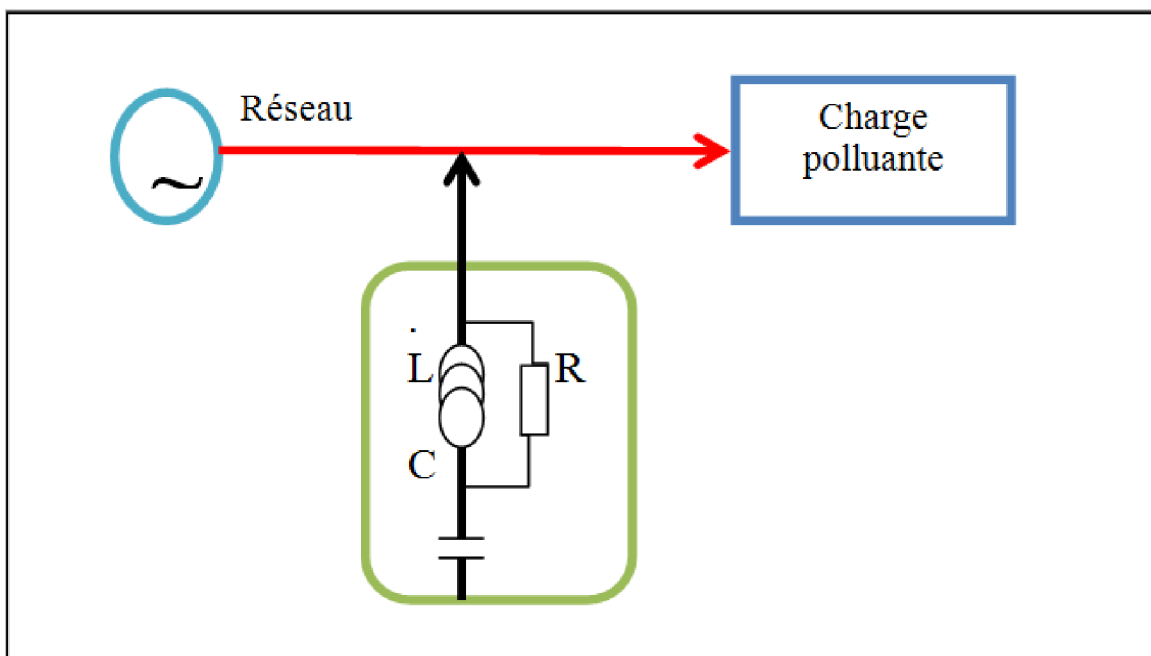
Il est constitué par la mise en série d'une inductance, d'une résistance, et d'un condensateur. La figure I.8 montre clairement le montage de ce dernier ainsi que leurs impédances en fonction de la fréquence. Ce type de filtre est caractérisé par l'emplacement de trois filtres, deux pour les harmoniques d'ordre inférieurs et un filtre pour les harmoniques d'ordres supérieurs, c'est-à-dire pour un pont triphasé nous avons besoin d'un filtre passe bas pour le cinquième et l'autre pour le septième harmonique et d'un filtre passe haut pour tous les harmoniques au-delà de la 11ème [15].



**Figure (I.7) :** Filtre passif résonnant.

### *1.3.1.2 Filtres passifs amortis*

Le filtre amorti peut réduire le risque de résonance non souhaitée, et permet de réduire considérablement la taille du filtre passif [16], comme le montre la figure( I.9)



**Figure (I.8) :** Filtre amorti.

Ces dispositifs sont utilisés pour empêcher les courants harmoniques de se propager dans les réseaux électriques. Ils peuvent aussi être utilisés pour compenser la puissance réactive [10].

Malgré leur large utilisation dans l'industrie, ces dispositifs peuvent présenter beaucoup d'inconvénients :

- Manque de souplesse à s'adapter aux variations du réseau et de la charge.
- Equipements volumineux.
- Problème de résonance avec l'impédance du réseau [14] [17].

### **I.3.2 Solution moderne**

La première solution de dépollution consiste à fabriquer la charge la moins polluante possible, comme le pont redresseur dodécaphasé, de manière à réduire le taux d'émission d'harmoniques. Les appareils à prélèvement sinusoïdal sont aussi proposés pour la compensation des harmoniques et de la puissance réactive. Cependant, ces solutions entraînent un coût supplémentaire et demandent plus que le savoir-faire habituel pour les mettre en œuvre. De plus, ces solutions ne résolvent pas les problèmes causés par les charges polluantes qui existent sur le marché [18]

Afin d'accompagner l'évolution des contraintes du fournisseur et du consommateur sans imposer un changement aux installations, une famille de filtres a été proposée comme une solution de dépollution des perturbations en courant.

#### ***I.3.2.1 Filtre actif parallèle***

Le filtre actif parallèle composé d'un onduleur connecté au réseau par l'intermédiaire d'un filtre passif L-R. Il se connecte en parallèle avec le réseau triphasé et injecte en temps réel les composantes harmoniques des courants absorbés par les charges non linéaires connectées au réseau. Ainsi, le courant fourni par la source d'énergie devient sinusoïdal. Ces filtres actifs shunt présentent des avantages et des inconvénients par rapport aux filtres passifs [18-19-20]

Réseau

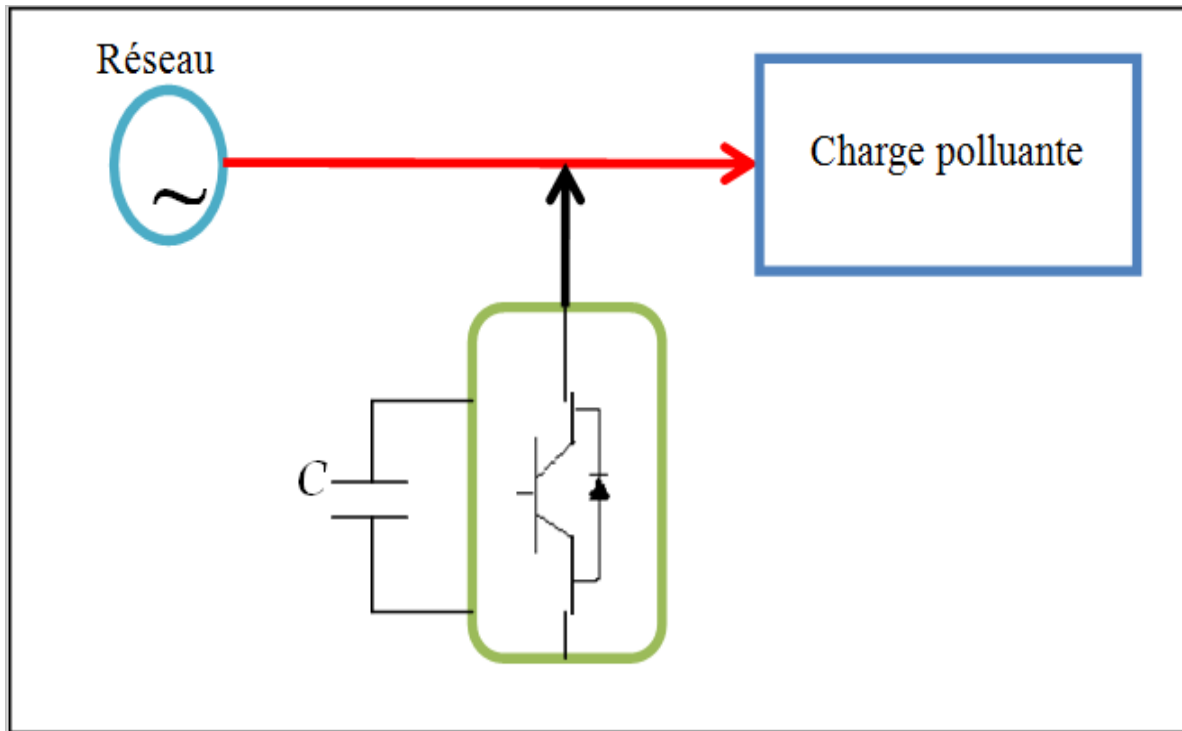
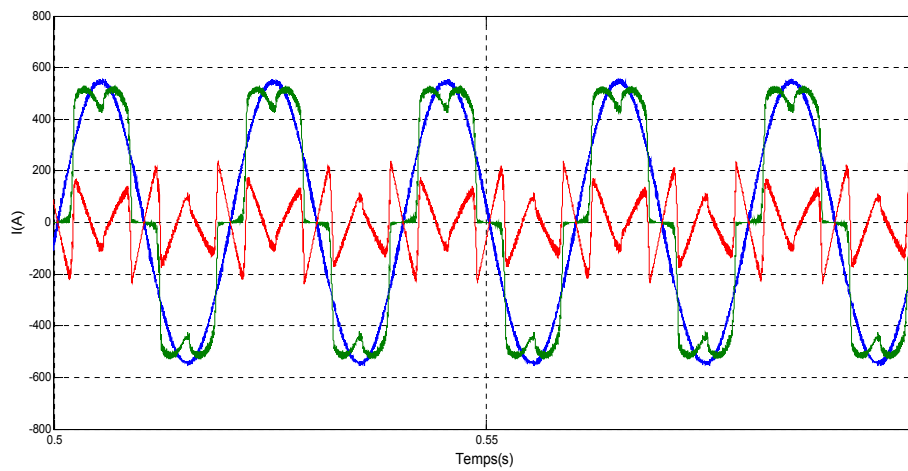


Figure (I.9) : Structure du filtre actif parallèle.

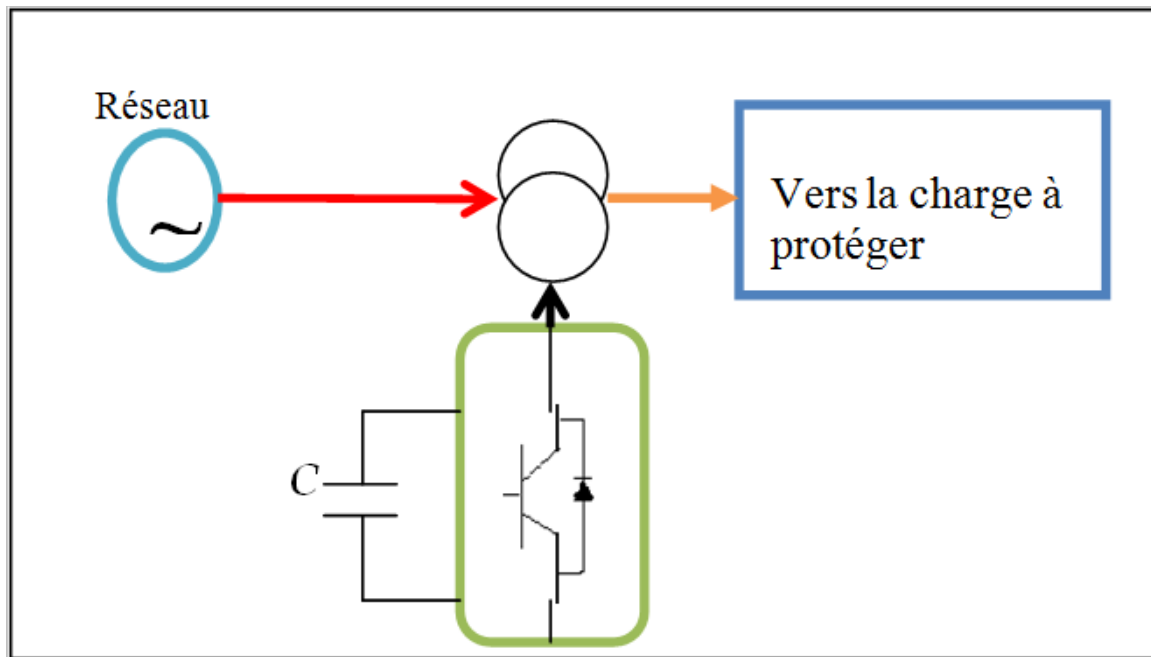


Figure(I.10): Courants de charge non-linéaire  $I_{c1}$ , de source  $I_{s1}$  et celui du filtre actif  $I_{f1}$ .

- Courants de charge non-linéaire  $I_{c1}$
- Courants de de source  $I_{s1}$
- Courant injecté par le filtre  $I_{f1}$

### *1.3.2.2 Filtre actif série*

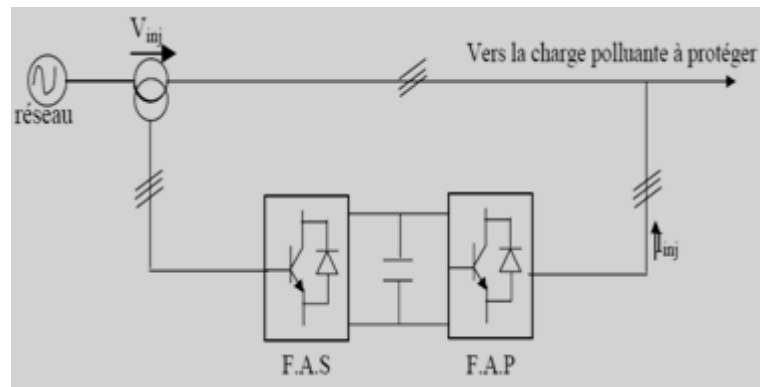
C'est une solution pour protéger les charges sensibles contre les perturbations de tension du réseau électrique. Donc l'objectif (compensateur de tension harmonique) est de jouer le rôle d'une source de tension qui fournit la tension harmonique. Ce type de configuration est indiqué par la figure ( I.6 ) :



**figure (I.11) :** Structure du filtre actif série.

### *1.3.2.3 La combinaison parallèle-série actifs (UPQC)*

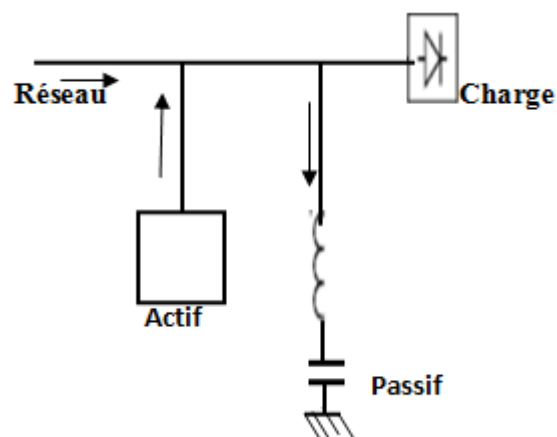
Cette combinaison parallèle-série actifs, aussi appelée Unified Power Quality Conditioner (UPQC), résulte de l'association des deux filtres actifs parallèle et série, comme le montre la figure (I.7) Profitant des avantages des deux filtres actifs, l'UPQC assure un courant et une tension sinusoïdaux du réseau électrique à partir d'un courant et d'une tension perturbés de celui-ci [21].



**Figure(I.12)** : Combinaison Filtre parallèle-série UPQC.

#### *1.3.2.4 Filtrage hybride*

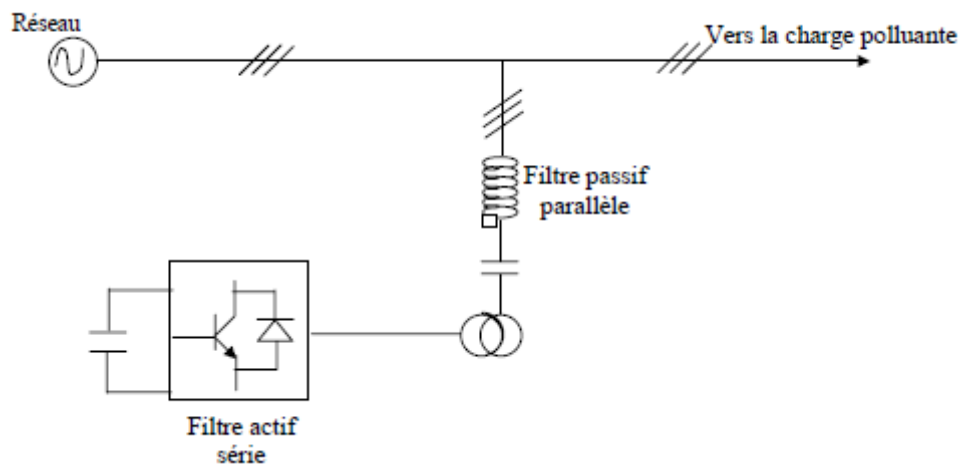
Afin de réduire le dimensionnement et par conséquent le prix des filtres actifs, l'association de filtres actifs de faible puissance à des filtres passifs peut être une solution. Dans ce cas, les filtres passifs ont pour rôle d'éliminer les harmoniques prépondérants permettant de réduire le dimensionnement des filtres actifs qui ne compensent que le reste des perturbations.



**Figure (I.13)**: présente la structure de filtre hybride.

Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles :

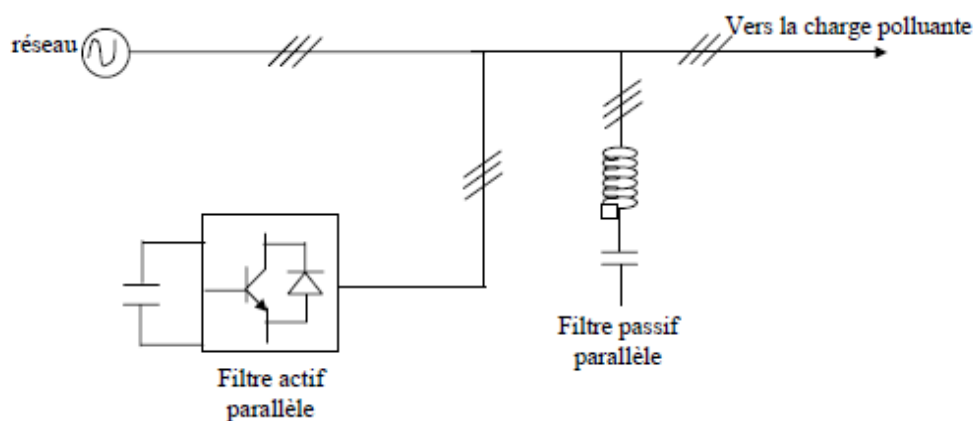
Le principe de fonctionnement de cette configuration, présentée en figure (I.14) est la même que la précédente avec l'avantage de réduire encore le dimensionnement du filtre actif série car le courant qui le traverse est plus faible [05]. De plus, le filtre actif série est à l'abri d'un éventuel court-circuit de la charge.



**Figure (I.14):** Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle.

Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle:

Dans cette topologie, le filtre passif parallèle (FPP) 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 FAP, 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 FAP peut être utilisé pour éliminer la résonance entre l'impédance de source et le FPP. Le FAP agit dans ce cas comme une résistance variable qui amortit les harmoniques [22].



**Figure (I.15):** Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.

## **I.4 Conclusion**

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

Alors que pour éliminer ces effets, plusieurs solutions traditionnelles et modernes de dépollution ont été présentées. La solution classique à base de filtres passifs est souvent pénalisée en termes d'encombrement et de résonance, de plus elles ne peuvent pas s'adapter à l'évolution du réseau et aux charges polluantes. Contrairement, les filtres actifs ont un objet de s'adapter et dépolluer le réseau de tous types de perturbations.

# **Chapitre II**

**STRUCTEUR ET COMMANDE  
D'UN FILTER ACTVE PARALLELE**

## INTRODUCTION

La prolifération de perturbations électriques est due à un nombre croissant de charges non linéaires présentes dans les lignes électriques. Tous ces appareils possèdent la particularité d'absorber des courants non sinusoïdaux et donc d'introduire dans les lignes électriques des pollutions harmoniques en courant.

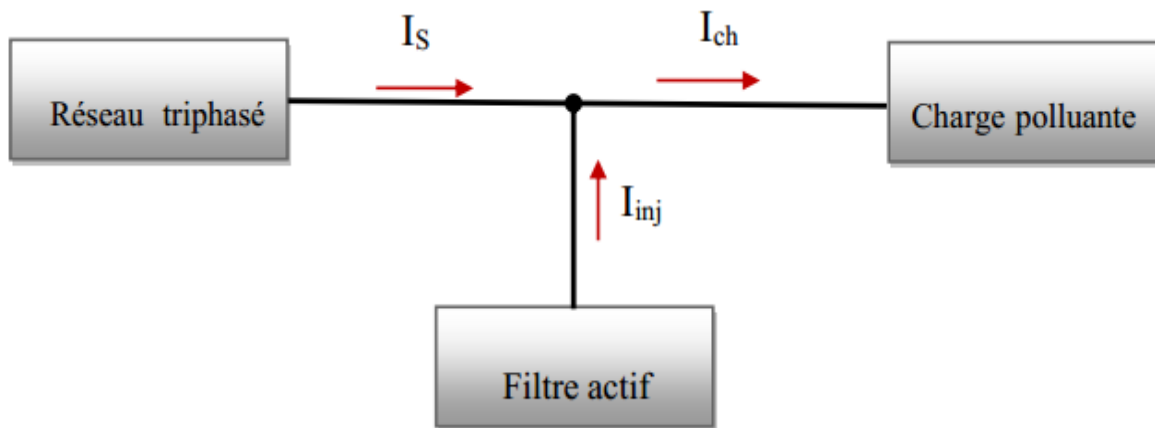
Les filtres actifs parallèles se sont révélés être des techniques efficaces pour la compensation des composantes harmoniques. Dans ce chapitre nous allons étudier le filtre actif parallèle. Sa structure a été divisée en deux parties, la partie puissance et la partie commande.

Dans la partie puissance on a les trois principaux blocs de cette structure, l'onduleur de tension, l'élément de stockage d'énergie et le filtre de sortie. Dans la partie commande, on a l'identification des courants perturbateurs, la régulation du courant injecté par l'onduleur et la régulation de la tension continue. Aussi nous présenterons la modélisation du réseau électrique et la charge non linéaire.

### II.1 Principe de filtre actif parallèle

Ce filtre est le plus souvent commandé comme un générateur de courant, il génère des courants harmoniques, en opposition de phase avec le réseau, afin que la somme avec ceux soit nulle. On obtient alors des courants alternatifs au niveau du réseau. Il permet donc de supprimer au point de raccordement tous les harmoniques de courants de charge non linéaire.

En générale, le filtre actif parallèle est utilisé pour la dépollution des réseaux BT MT. Son impédance totale vis à vis de la source et de la charge lui confère une bonne auto adaptabilité avec les performances appréciables [10]. Sa structure est la suivante :



Figure(II.1) : Principe du filtre actif parallèle.

## II.2 structure générale du filtre actif parallèle :

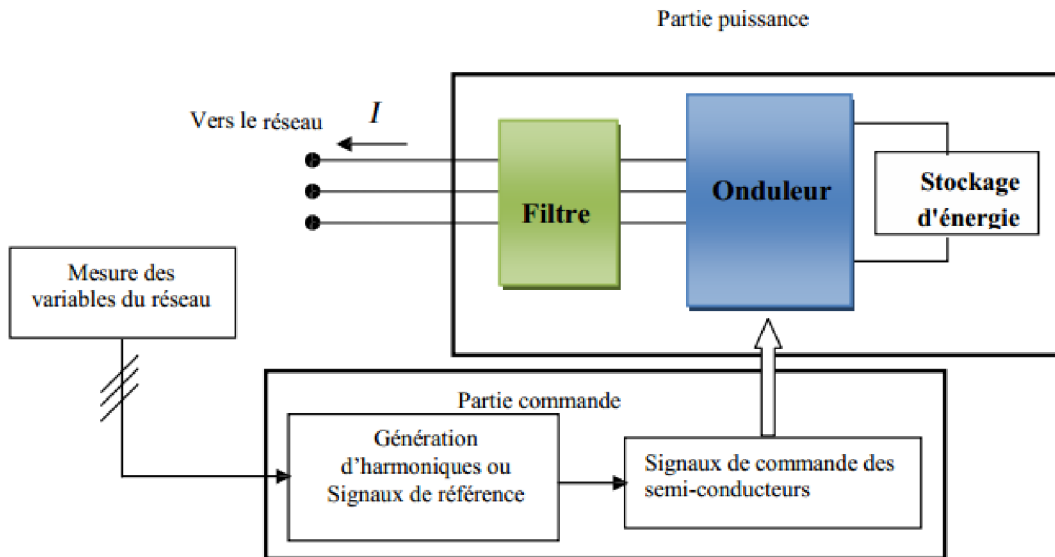
La Figure(II.2) donne la structure générale du filtre actif parallèle, laquelle se présente sous la forme de deux blocs : la partie puissance et la partie contrôle-commande.

### a) La partie puissance est constituée :

- d'un onduleur de tension à base d'interrupteurs de puissance, commandés à l'amorçage et au blocage (GTO, IGBT, ...etc.) avec des diodes en antiparallèle.
- d'un circuit de stockage d'énergie, souvent capacitif.
- d'un filtre de sortie.

### b) La partie contrôle-commande quant à elle est constituée :

- de la méthode d'identification des courants perturbés.
- du système à base de PLL qui sera intégré dans la méthode d'identification des courants.
- de la régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie.
- de la régulation du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension.
- de la commande de l'onduleur de tension.



Figure(II.2) : schéma synoptique d'un filtre actif parallèle.

### II.3 Etude de la partie puissance :

Le schéma du circuit de puissance d'un filtre actif parallèle à structure tension est donné sur la figure (II.3) On y distingue trois éléments :

- un onduleur de tension.
- un filtre de découplage.
- un élément de stockage capacitif.

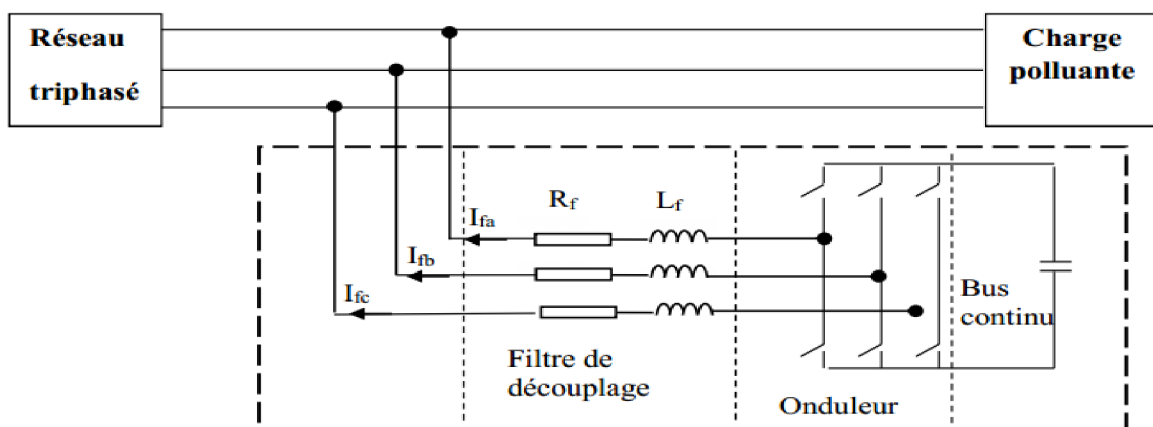
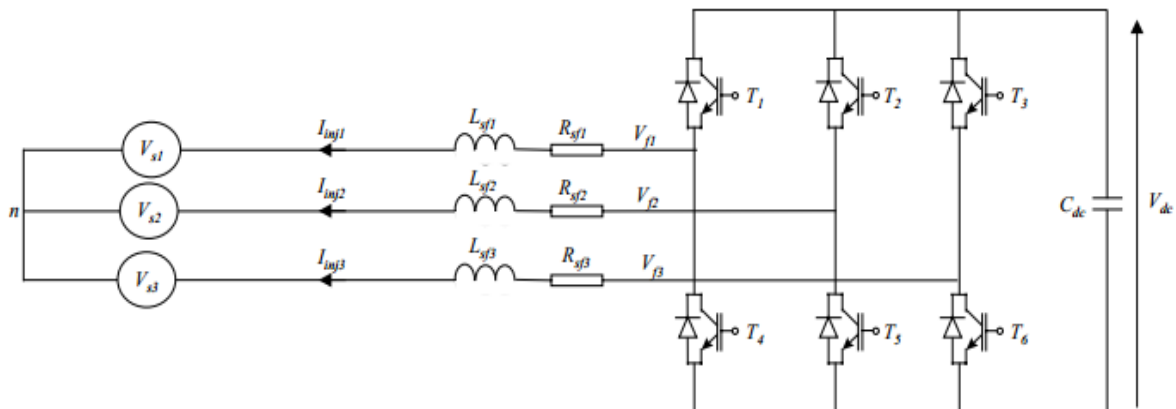


Figure (II.3) : schéma du circuit de puissance d'un filtre actif parallèle à structure tension.

### II.3.1 Onduleur de tension à deux niveaux

#### II.3.1.1 Structure générale

La Figure . II.4 présente un onduleur triphasé à structure de tension. Il se compose de trois bras à interrupteurs réversibles en courant, commandés à la fermeture et à l'ouverture, réalisés à partir d'un transistor (GTO ou IGBT) et d'une diode en antiparallèle. Le stockage de l'énergie du côté continu se fait par l'intermédiaire d'un condensateur  $C_{dc}$  de tension  $V_{dc}$ . Le filtre de sortie est un filtre passif habituellement du premier ordre ( $L_f, R_f$ ) employé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique.



**Figure (II.4) :** Onduleur de tension triphasé.

Cette structure du filtre actif parallèle ne permet pas la fermeture simultanée des semi-conducteurs d'un même bras sous peine de court-circuiter le condensateur de stockage. Par contre, ils peuvent être tous les deux ouverts (pendant un temps mort). La continuité des courants est alors assurée par la mise en conduction d'une des diodes d'un même bras.

En pratique, nous commandons les deux semi-conducteurs d'un même bras de façon complémentaire : la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre. En réalité, le mode, où les semi-conducteurs d'un même bras sont tous les deux fermés, n'existe que durant les commutations.

Afin d'éviter un court-circuit à cause du délai de blocage des interrupteurs, il faut insérer sur un même bras, un temps d'attente, également appelé temps mort, entre la commande de blocage d'un interrupteur et la commande d'amorçage de l'autre [23]. Avec l'hypothèse des

commutations instantanées, ce mode de fonctionnement ne sera pas pris en compte et par conséquent, aucun risque de court-circuiter le condensateur n'est à craindre.

### II.3.1.2 Tension générées par l'onduleur

L'onduleur de tension deux niveaux délivre, en sortie, deux niveaux de tensions  $V_{dc}$  et 0, en fonction des états des interrupteurs. En théorie, nous commandons les deux semi conducteurs d'un même bras de façon complémentaire : la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre. Avec cette hypothèse, l'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur de la Figure (II.1) dépendent de l'état de trois signaux de commande [23].

Pour chaque interrupteur  $T_{ki}$  ( $K=a, b, c$   $i=1, 2$ ), on définit une fonction de commutation  $S_{ki}$  :

$$S_{ki} = \begin{cases} 1 & \text{Si } T_{ki} \text{ est fermé} \\ 0 & \text{Si } T_{ki} \text{ est ouvert} \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

La complémentarité entre les deux interrupteurs de chaque bras impose l'équation suivante:

$$S_{k2} = 1 - S_{k1} \quad (\text{II.2})$$

Les tensions triphasées de sortie par rapport à la référence de la source continue « o » peuvent être exprimées par :

$$\begin{bmatrix} V_{A0} \\ V_{B0} \\ V_{C0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{a1} \\ S_{b1} \\ S_{c1} \end{bmatrix} V_{dc} \quad (\text{II.3})$$

Les tensions composées entre les phases sont données par:

$$\begin{bmatrix} V_{Ab} \\ V_{Bc} \\ V_{Ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bo} - V_{co} \\ V_{co} - V_{ao} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{a1} - S_{b1} \\ S_{b1} - S_{c1} \\ S_{c1} - S_{a1} \end{bmatrix} V_{dc} \quad (\text{II.4})$$

Ainsi, on peut facilement exprimer les tensions  $V_{kn}$  ( $k=a, b, c$ ) en fonction des fonctions de commutation  $S_{ki}$  comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} V_{ab} - V_{ca} \\ V_{bc} - V_{ab} \\ V_{ca} - V_{bc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2S_{a1} - S_{b1} - S_{c1} \\ -S_{a1} - 2S_{b1} - S_{c1} \\ -S_{a1} - S_{b1} - 2S_{c1} \end{bmatrix} V_{dc} \quad (\text{II.5})$$

Puisque les variables  $S_{ai}$ ,  $S_{bi}$  et  $S_{ci}$  prennent chacune deux valeurs, il en résulte huit combinaisons de commande, qui sont présentées dans le Tableau (II.1)

vecteur	$S_{a1}$	$S_{b1}$	$S_{c1}$	$V_{fa}$	$V_{fb}$	$V_{fc}$
$V_0$	0	0	0	0	0	0
$V_1$	1	0	0	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$
$V_2$	1	1	0	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$
$V_3$	0	1	0	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$
$V_4$	0	1	1	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$
$V_5$	0	0	1	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$
$V_6$	1	0	1	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$
$V_7$	1	1	1	0	0	0
$V_7$	1	1	1	0	0	0

**Tableau (II.1):** Tensions en sortie de l'onduleur

### II.3.2 Filtre de découplage

Le but du filtre de découplage est de permettre la connexion de l'onduleur de tension au réseau électrique qui est très souvent considéré comme une source de courant qui génère des courants harmoniques à partir de la différence des tensions entre la sortie du pont onduleur et le réseau [4]. Ce filtre est un filtre qui limite certes la dynamique du courant mais réduit en même temps la propagation sur le réseau électrique des composantes dues aux commutations.

Dans ce travail, nous avons utilisé un filtre entre l'onduleur et le réseau électrique qui se compose d'une inductance  $L_f$  de résistance interne  $R_f$ , comme le montre la figure (II.4)

Notons toutefois que des filtres de découplage du troisième ordre, de type L-C-L, pourraient également être utilisés. Dans notre étude, nous emploierons ce filtre du premier ordre.

### II.4.3 Système de stockage de l'énergie

Le stockage de l'énergie est réalisé côté continu à l'aide d'un système de stockage capacitif, représenté par un condensateur  $C_{dc}$  jouant le rôle d'une source de tension continue. Le choix des paramètres du système de stockage ( $v_{dc-ref}$  et  $C_{dc}$ ) a une influence directe sur la dynamique du FAP et sur ses performances de compensation. D'une part, une tension  $v_{dc-ref}$  élevée améliore la dynamique du FAP. D'autre part, les ondulations de la tension continue  $v_{dc}$ , causées par les courants engendrés par le FAP et limitées par le choix de la valeur de  $C_{dc}$ , peuvent dégrader la qualité de compensation du FAP. Une valeur élevée

de Cdc réduit les ondulations de vdc mais augmente le coût et la taille du FAP. Sachant que l'augmentation de la valeur de la tension continue améliore la marge de commandabilité du FAP et sachant que le choix de cette tension se répercute en grande partie sur le choix des interrupteurs, la tension continue  $v_{dc}$  doit être choisie la plus élevée possible tout en respectant les contraintes nominales des semi-conducteurs et la contrainte de commandabilité de l'onduleur.

## II.5 Etude de la partie de commande

### II.5.1 Identification des courants harmoniques de référence

- **Méthodes du domaine fréquentiel**

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

Les inconvénients les plus importants de ces méthodes sont des résultats moyens en régime transitoire et un volume de calcul et une allocation de mémoire très considérables [24].

- **Méthode du domaine temporel**

Les méthodes du domaine temporel permettent une réponse plus rapide et requièrent moins

d'opérations que les méthodes précédentes. Le principe de ce type de méthodes est la séparation

du fondamental ou de certains harmoniques du reste des harmoniques par filtrage. Les méthodes

les plus importantes sont [25] :

- La théorie P-Q de la puissance instantanée.
- Algorithme du Repère de Référence Synchronisé (SRF).
- Algorithme de la détection synchronisée (SDA).
- Algorithme Fryze-Bucholz Depenbanck (FBD).

- La méthode sinusoïdale Généralisée de Fryze (SGF).
- La méthode basée sur le courant actif.
- La méthode tri-monophasée.
- La méthode basée sur la régulation de la tension.

### **II.5.2 Stratégie d'identification**

La stratégie de commande se base sur la détection des courants perturbateurs dans le domaine temporel. Il existe 3 possibilités d'identification des courants perturbateurs.

- ✓ 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 de la tension de la source.

La première méthode est la plus utilisée pour le filtre actif parallèle pour compenser les courants perturbateurs causés par les charges polluantes. Cette méthode de détection sera employée dans cette étude [26].

## **II.6 Comparaison entre les méthodes d'identification des courants harmoniques**

La méthode de la théorie (P-Q) a l'avantage d'être assez simple pour la mettre en application sous forme analogique puisqu'elle a besoin seulement des opérations de multiplication et de filtrage simple.

L'inconvénient le plus évident de la méthode (P-Q) est qu'elle s'exécute mal dans des conditions non équilibrées de tension d'alimentation, parce que l'algorithme suppose que les tensions d'alimentation sont sinusoïdales et équilibrées.

Un avantage de la méthode SRF est qu'elle s'exécute bien avec n'importe quelle forme d'onde du courant. Un inconvénient est que l'algorithme est assez complexe et exige un circuit PLL pour fonctionner correctement.

Dans la méthode SDA, l'exécution est bonne pour les conditions de la tension d'alimentation en cas de déséquilibre. Un inconvénient de cette méthode est qu'elle suppose que les courants dans chaque phase sont égaux, ou la charge est équilibrée.

La méthode	Analogique	Numérique	Avantages	Inconvénient
<b>Théorie P-Q</b>	Oui	Oui	Simple	Bonne pour des tensions sinusoïdales uniquement.
<b>SRF</b>	Non	Oui	Utilisé pour une source déséquilibré avec/sans distorsion	Exige un circuit PLL.
<b>SDA</b>	Oui	Oui	Utilisé pour une source déséquilibré.	Suppose que les courants dans les phases sont équilibrés.
<b>SGF</b>	Non	Oui	Utilisé pour une source déséquilibré avec/sans distorsion	Exige un circuit PLL.

**Tableau (II.2)** Comparaison entre les méthodes d'identification des harmoniques.

### II.6.1 La méthode de puissances instantanées

Cette méthode exploite la transformation des paramètres du système dans le repère triphasé  $abc$  en biphasé dans le repère stationnaire  $\alpha\beta$ , pour obtenir les puissances réelles et imaginaires. Notons par  $(V_\alpha, V_\beta)$  et  $(I_\alpha, I_\beta)$  les composantes orthogonales du repère  $\alpha$ - $\beta$  associées respectivement aux tensions de raccordement du filtre actif parallèle ( $V_s$ ) et aux courants absorbés par les charges polluantes ( $I_s$ ). La transformation  $\alpha$ - $\beta$ -0 triphasée permet d'écrire la relation des tensions suivante [15].

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

Et la relation des courants ci-dessous

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a1} \\ I_{b2} \\ I_{c3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

Les composantes avec l'indice (0) représentent les séquences homopolaires du système triphasé du courant et de tension.

La puissance active instantanée, notée  $P(t)$ , est définie par la relation suivante

$$\left\{ \begin{array}{l} P(t) = V_{a1} I_{a1} + V_{b2} I_{b2} + V_{c3} I_{c3} = P(t) + P_0(t) \\ P(t) = V_{\alpha} I_{\alpha} + V_{\beta} I_{\beta} \\ P_0(t) = V_0 I_0 \\ P(t) : \text{la puissance réelle instantanée.} \end{array} \right. \quad (\text{II.3})$$

$P_0(t)$  : la puissance homopolaire instantanée.

L'avantage de la transformation  $\alpha$ - $\beta$ -0 est la séparation des séquences homopolaires du système triphasé de courant ou de tension. De la même manière, la puissance imaginaire instantanée peut s'écrire sous la forme suivant [10] :

$$q(t) = \frac{1}{\sqrt{3}} [(V_{a1}-V_{b2})I_{1c} + (V_{b2}-V_{c3})I_{1a} + (V_{c3}-V_{a1})I_{1b}] = V_{\alpha} I_{\beta} - V_{\beta} I_{\alpha} \quad (\text{II.4})$$

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

A partir des relations (II.1) et (II.2), nous pouvons établir la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} P \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{\alpha} & V_{\beta} \\ -V_{\beta} & V_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

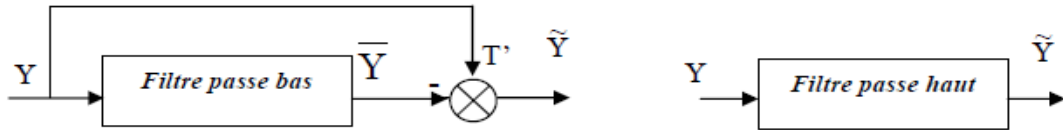
Dans le cas général, chacune des puissances  $p$  et  $q$  comporte une partie continue et une partie alternative, ce qui nous permet d'écrire l'expression ci-dessous :

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

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

### II.6.2 Séparation des puissances perturbatrices

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



**Figure (II.5):** Schéma représentant le principe de séparation des puissances ( $Y = p$  ou  $q$ )

### II.6.3. Calcul des courants perturbateurs

En inversant la relation (II.5), nous pouvons recalculer les courants dans le repère  $(\alpha-\beta)$  comme le montre l'équation (II.8).

$$\begin{bmatrix} i\alpha \\ i\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{s\alpha}^2 + V_{s\beta}^2} \begin{bmatrix} V\alpha & -V\beta \\ V\beta & V\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

En considérant les équations (II.7) et (II.8), nous pouvons séparer le courant dans le repère  $(\alpha-\beta)$  en trois composantes, active et réactive à la fréquence fondamentale et les harmoniques. Ceci conduit à [36]:

$$\begin{bmatrix} i\alpha \\ i\beta \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v\alpha & -v\beta \\ v\beta & v\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ 0 \end{bmatrix}}_{\text{Courant actif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v\alpha & -v\beta \\ v\beta & v\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ q \end{bmatrix}}_{\text{courant réactif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v\alpha & -v\beta \\ v\beta & v\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix}}_{\text{courants harmoniques}} \quad (\text{II.8})$$

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

Cette expression montre donc que l'identification des différentes composantes du courant dans le repère ( $\alpha$ - $\beta$ ) revient à séparer des termes continus des puissances réelle et imaginaire

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

$$\begin{bmatrix} i_{1h} \\ i_{2h} \\ i_{3h} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} i_{\alpha h} \\ i_{\beta h} \end{bmatrix} \tag{II.9}$$

On trouve la relation globale des courants harmoniques :

$$\begin{bmatrix} i_{1h} \\ i_{2h} \\ i_{3h} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{1}{\sqrt{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{\alpha} & -V_{\beta} \\ V_{\beta} & V_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \tag{II.10}$$

### II.6.4 Algorithme d'identification

Le schéma de la figure (II.6) illustre les différentes étapes permettant l'obtention des composantes harmoniques du courant d'une charge non linéaire [27].

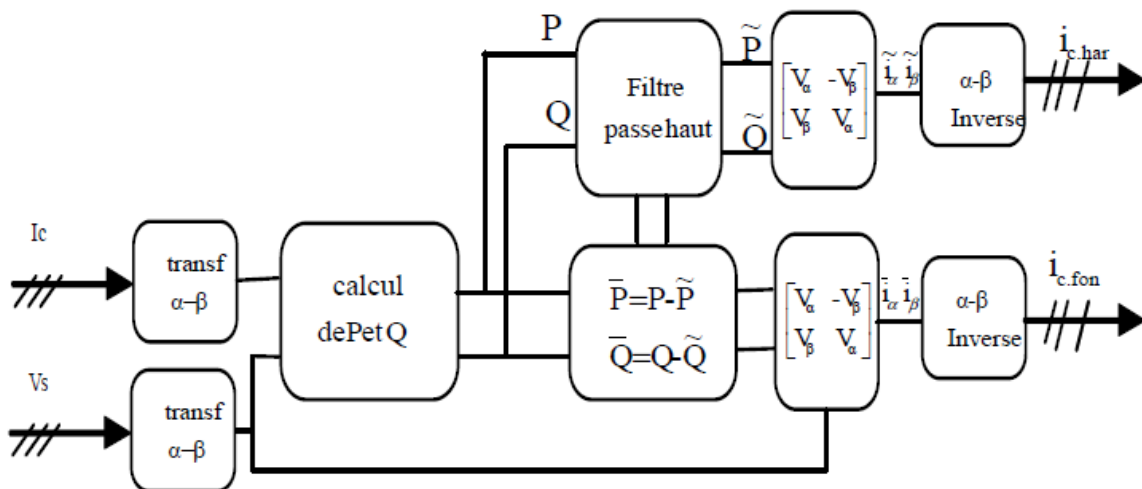


Figure (II.6): algorithme d'identification des harmoniques.

## II.7 Contrôle des courants du filtre actif

Pour maintenir le courant à la sortie du filtre actif autour de sa référence calculée au chapitre précédent, deux techniques de commande peuvent être utilisées :

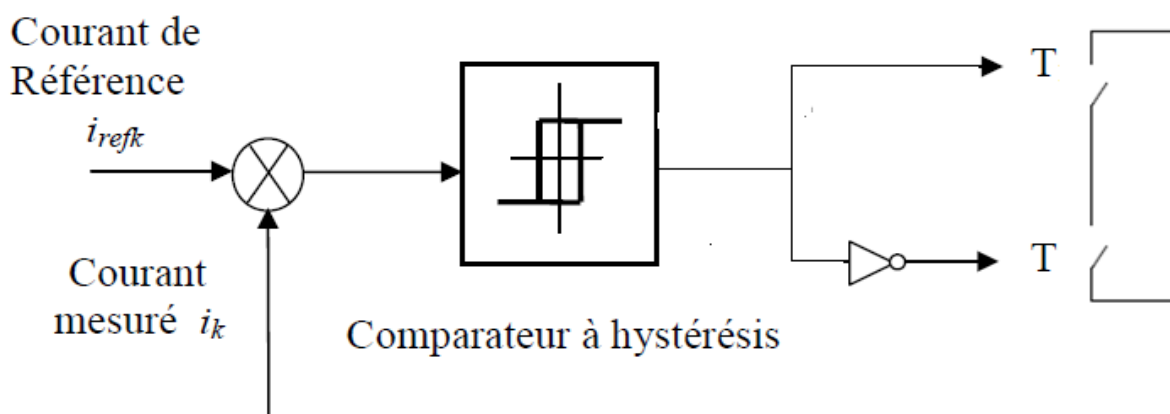
- la commande par hystérésis.
- La commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI).

L'objectif de la commande, que se soit à MLI, ou par hystérésis, est de générer les ordres d'ouverture/fermeture des interrupteurs de manière à ce que le courant du filtre actif soit le plus proche de sa référence [21].

### II.7.1 Commande à hystérésis

La commande conventionnelle par hystérésis est très couramment utilisée de par sa simplicité d'utilisation et sa robustesse. En fait, cette stratégie assure un contrôle satisfaisant du courant sans exiger une connaissance poussée du modèle du système à contrôler ou de ses paramètres.

La figure (II.5) expose son principe qui consiste à établir dans un premier temps le signal d'erreur, différence entre le courant de référence  $i_{refk}$  et le courant produit par l'onduleur  $i_f$ . Cette erreur est ensuite comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis afin de fixer les ordres de commande des interrupteurs. Cette commande présente cependant un inconvénient majeur : elle ne permet pas de contrôler la fréquence de commutatif des semi-conducteurs,



d'où la présence d'un nombre important d'harmoniques dans les courants générés.

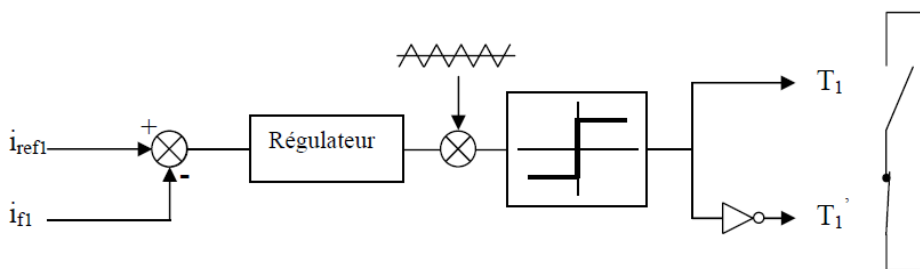
**Figure(II.7):** Principe de la commande des courants par hystérésis.

### II.7.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)

Afin de contourner les problèmes précédents, nous introduirons une deuxième famille de commande de l'onduleur :

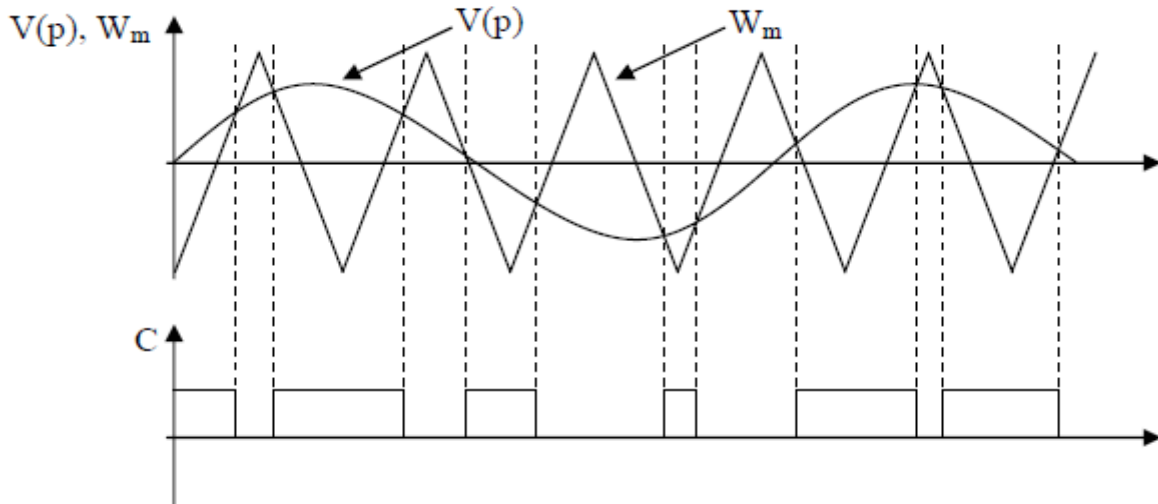
la commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI). La technique de commande par MLI résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation en fonctionnant avec une fréquence fixe facile à filtrer en aval de l'onduleur.

La plus simple et la plus connue des modulations de largeur d'impulsion est sans doute la MLI à échantillonnage naturel, dite MLI intersective. Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur (modulatrice) à partir de l'écart entre le courant mesuré et sa référence. Cette dernière est ensuite comparée avec un signal triangulaire (porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs. Le schéma de principe est donné par la figure (II.8)[21].



**Figure(II.8):** Principe de commande des courants par MLI.

Les signaux logiques C qui en résultent donnent l'ordre de commutation des interrupteurs du filtre (Figure II.9) :



**Figure (II.9):** commutations sur un bras d'un onduleur.

Cette -MLI- sert à remédier ces problèmes et elle a les avantages suivantes :

- 1)- Variation de la fréquence de la tension de sortie.
- 2)- Elimination de certaines harmoniques de tension.
- 3)- Elle repousse les harmoniques vers des fréquences plus élevées .

## II.8 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 ou de commande.

### II.8.1 Domaine d'application

Les systèmes flous ont été utilisés dans une large variété d'applications industrielles, gestionnaires et médicales. Parmi ses applications on peut citer [43] :

- Systèmes audio-visuels (appareils de photos autofocus, caméscope à stabilisateur d'images, photocopieurs, ...).
- Appareils électroménagers (lave-linge, aspirateurs, autocuiseurs, ...etc.).
- Systèmes autonomes mobiles.
- Systèmes de transport (train, métro, ascenseur, ...).

- Systèmes de contrôle/commande dans la plupart des domaines industriels de production

### **II.8.2 Principe de la logique floue**

La logique floue repose sur la théorie des ensembles flous développée par LOTFIA ZADEH début des années 1960, (automaticien contemporain de kalman de l'université de Californie de Berkeley) [44]. A côté d'un formalisme mathématique fort développé, nous préférons aborder la présentation de manière intuitive [39]. Le terme «logique floue » a deux aspects :

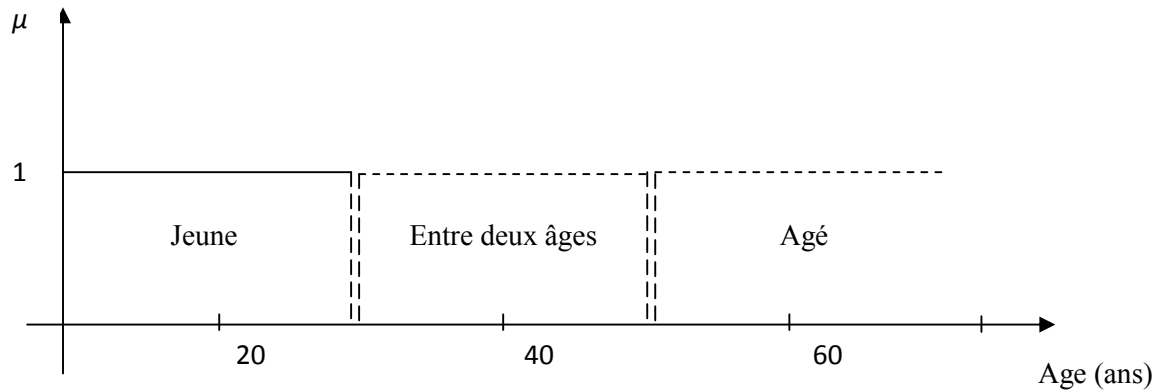
- Le premier correspond à tous les développements concernent la théorie des ensembles flous.
- Le deuxième représente une extension de la logique classique dans le but de raisonner sur des connaissances imparfaites.

Pour le cas de la logique classique (logique de Boole) qui admet deux valeurs 0 ou 1, la classification des personnes selon leurs âges pourrait se faire comme illustré dans la figure (III.1)

Toutes les personnes âgées de moins de 30 ans appartiennent à l'ensemble jeune et toutes les personnes âgées de plus 50 ans sont considérées comme appartenir à l'ensemble « âgé ».

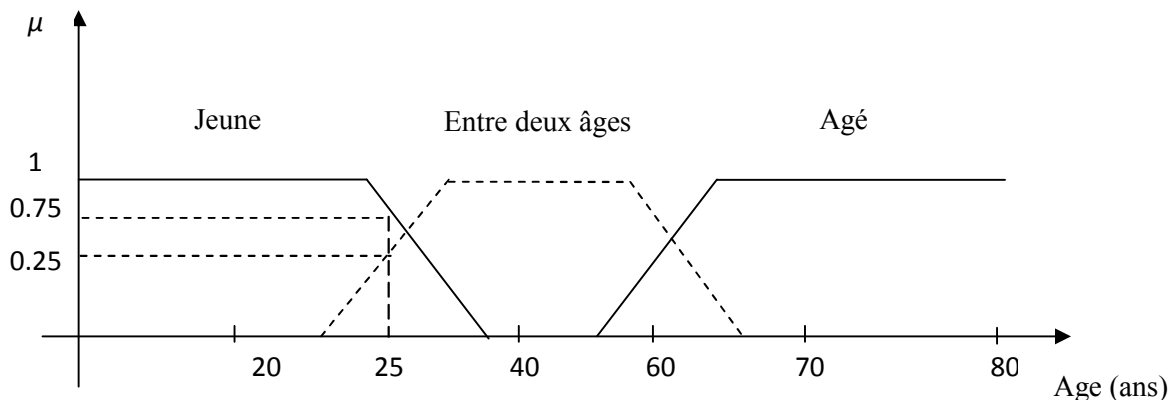
Cependant une telle logique de classification n'est même pas logique car la question qui se pose : pourquoi une personne âgée de 50 ans doit être considérée comme appartenant à l'ensemble « âgé » ? En réalité un tel passage ce fait progressivement et individuellement.

En outre lors de la classification par logique classique on ne prend pas en considération des personnes situées dans la zone « entre deux âges ».



**Figure (II.10):** Classification des personnes en trois ensembles selon la logique classique.

La logique floue, dont la fonction d'appartenance peut prendre n'importe quelle valeur entre 0 et 1 permet de tenir compte de cette réalité. Il est donc possible de trouver une autre classification pour l'exemple précédant à l'aide de la logique floue. Les limites ne varient pas soudainement mais progressivement comme le montre la figure (II.11). [29]



**Figure (II. 11):** Classification des personnes en trois ensembles selon la logique floue.

### II.8.3 Eléments de base de la logique floue

Dans cette partie, on va exposer d'une façon non exhaustive les éléments de base de la logique floue.

#### II.8.3.1 Variables linguistiques

La description imprécise d'une certaine situation, d'un phénomène ou d'une grandeur physique ne peut se faire que par des expressions relatives ou floues à savoir: grand, petit, positif, négatif, nul, chaud, froid, etc. Ces différentes classes d'expressions floues dénommées ensembles flous constituent ce que on appelle les variables linguistiques.

Afin de pouvoir traiter numériquement ces variables linguistiques (normalisées généralement sur un intervalle bien déterminé appelé univers de discours), il faut les soumettre à une définition mathématique à base de fonctions d'appartenance qui montrent le degré de vérification de ces variables linguistiques relativement aux différents sous-ensembles flous de la même classe [30].

### ***II.8.3.2 Ensembles floue***

Dans la théorie classique des ensembles, c'est la fonction caractéristique qui définit l'ensemble. Cette fonction ne prend que les deux valeurs discrètes 0 (l'élément n'appartient pas ...) ou 1 (l'élément appartient à l'ensemble). Par contre l'élément de base de la logique floue est l'ensemble flou ; défini par une fonction d'appartenance qui peut prendre toutes les valeurs réelles comprises entre 0 et 1 et qui joue un rôle fondamental pour le passage du qualitatif au quantitatif. Le concept de ce dernier a pour but d'éviter le passage brusque d'une classe à une autre et de permettre des graduations dans l'appartenance d'un élément à une classe ; c'est-à-dire d'autoriser un élément à appartenir plus ou moins fortement à une classe [31].

### ***II.8.3.3 Fonctions d'appartenance***

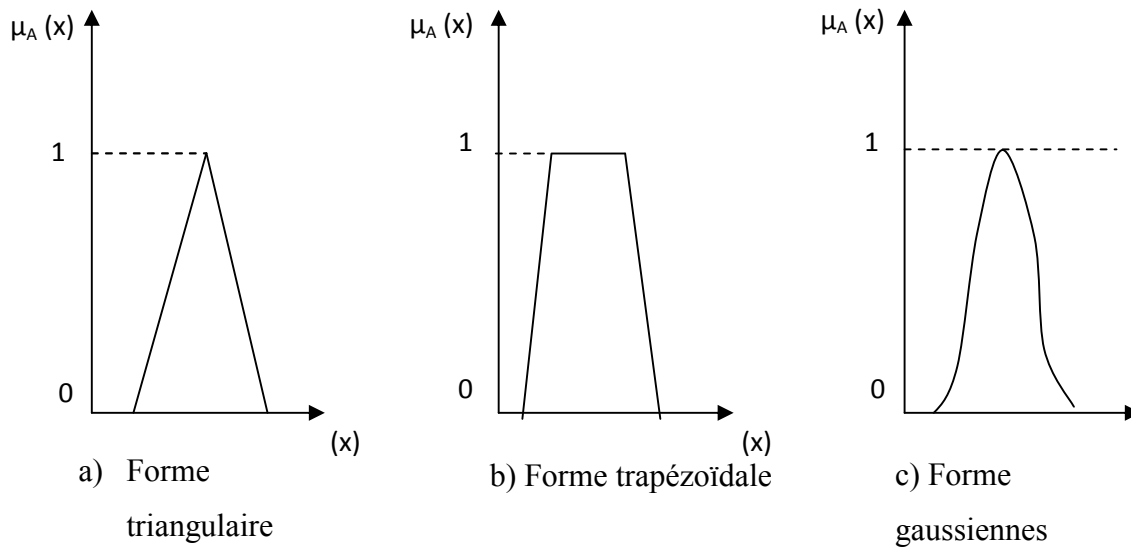
Afin de pouvoir traiter numériquement les variables linguistiques, il faut les soumettre à une définition mathématique à base de fonctions d'appartenance qui montrent le degré de vérification de ces variables aux différents sous-ensembles.

Les fonctions d'appartenance peuvent théoriquement prendre n'importe quelle forme, mais en général, les fonctions d'appartenance les plus utilisées sont définies par des formes géométriques ou des fonctions, on cite les suivantes:

Les fonctions d'appartenance sont le plus souvent représentées par les fonctions triangulaire et trapézoïdale, donc par des segments de droite, les fonctions sont alors dites linéaires par morceaux.

Dans la plupart des cas, et en particulier pour le réglage par la logique floue, ces deux formes sont suffisantes pour délimiter des ensembles flous [32].

Généralement, les plus souvent utilisées sont les fonctions de forme trapézoïdale ou triangulaire ou gaussiennes.



**Figure (II.12)** : Différentes formes des fonctions d'appartenance.

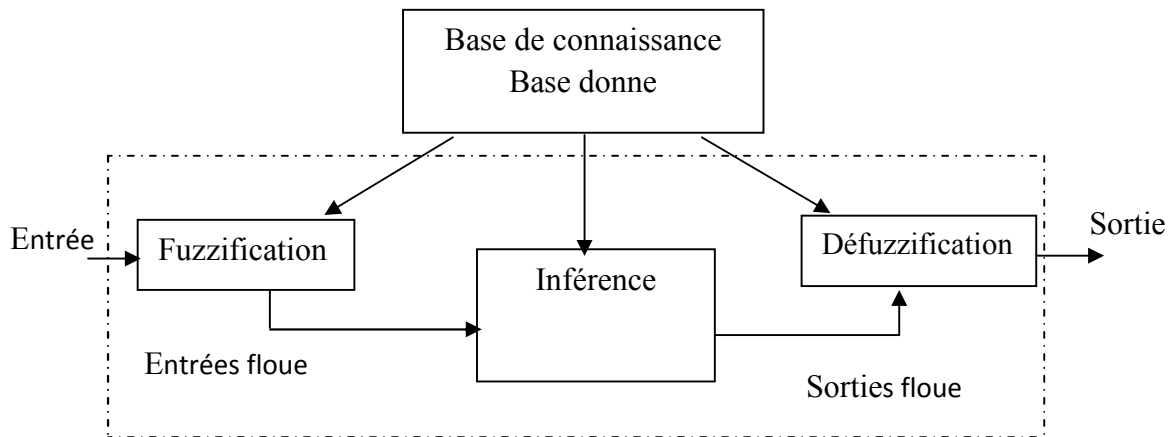
## II.9 Commande par logique floue

La commande floue est certainement le domaine d'application de la logique floue le plus utilisé. Son but est, comme en automatique classique de gérer un processus selon une consigne désirée, par action sur des grandeurs physiques. Sa particularité est de reproduire le comportement d'un opérateur humain, plutôt que de réaliser un modèle mathématique du système [3].

### II.9.1 Constitution d'un système floue

Un système flou est composé de quatre parties essentielles [34]:

- La base de connaissance constituée d'une base de données et d'une base de règles.
- Le système d'inférence.
- L'interface de fuzzification.
- L'interface de déffuzzification.



**Figure (II.13):** Schéma général d'un système flou [25].

### II.9.1.1 Interface de fuzzification

La fuzzification est l'opération de projection des variables physiques réelles sur des ensembles flous caractérisant les valeurs linguistiques prises par ces variables. Le bloc de fuzzification effectue les fonctions suivantes [28]:

- établit les plages de valeurs pour les fonctions d'appartenance à partir des valeurs des variables d'entrées.
- effectue une fonction de fuzzification qui convertit les données d'entrée en valeurs linguistiques convenables qui peuvent être considérées comme l'étiquette des ensembles flous. Cette opération doit être effectuée dans un domaine normalisé généralement par l'intervalle  $[-1,1]$  afin de faciliter le calcul.

### II.9.1.2 Base de règles

C'est la collection de règle qui permet de lier les variables floues d'entrée et de sortie, elles ont la forme: "if- then" ou "si-alors", elles peuvent être écrites textuellement faisant appel à des entrées et à des sorties et elles sont données par des experts d'une manière directes numériques ou par des termes ou variables linguistique à travers des fonctions d'appartenance [33].

### II.9.1.3 Mécanisme d'inférence floue

Le principe de cette opération consiste à établir la liaison entre les grandeurs d'entrée du régulateur exprimées par des termes linguistiques et la variable de sortie sous sa forme

linguistique à partir d'une parfaite connaissance du système à régler et d'une expertise concernant le fonctionnement du processus à régler. Les trois méthodes d'inférence les plus usuelles sont :

- Max-Produit.
- Somme-produit.
- Max-Min (Implication de Mamdani).

#### ***II.9.1.4 Interface de Défuzzification***

Comme nous avons vu dans la section précédente, les méthodes d'inférence fournissent un résultat qui est une fonction d'appartenance. Or, la sortie du contrôleur est en général une grandeur continue, prenant sa valeur dans un intervalle. La défuzzification est le traitement qui permet de définir une correspondance entre le résultat de l'inférence et la grandeur continue fournie en sortie [34].

Plusieurs stratégies de Défuzzification ont été développées. Les plus utilisées sont :

##### **a) Méthode du maximum**

Comme son nom l'indique, la commande en sortie est égale à la commande ayant la fonction d'appartenance maximale.

La méthode du maximum simple, rapide et facile mais elle introduit des ambiguïtés et une discontinuité de la sortie (parfois on trouve deux valeurs maximales).

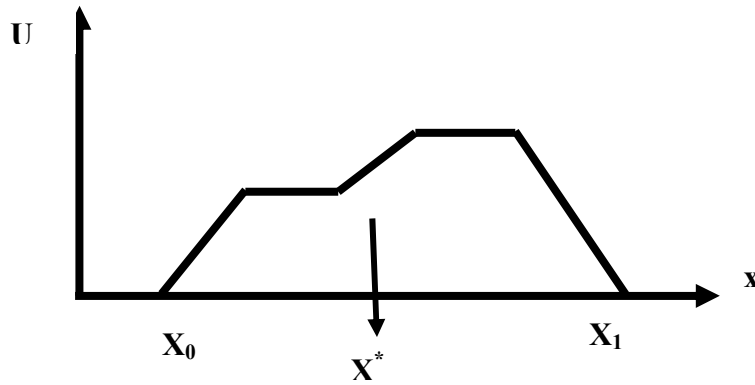
##### **b) Méthode de la moyenne des maxima**

Elle considère, comme valeur de sortie, la moyenne de toutes les valeurs pour lesquelles la fonction d'appartenance issue de l'inférence est maximale.

##### **c) Méthode du centre de gravité**

La méthode du centre de gravité c'est la méthode de Défuzzification la plus utilisée, son principe repose sur la détermination de l'abscisse du centre de gravité  $x^*$  de la fonction

d'appartenance résultante de l'inférence  $\mu_C(z)$ . Cette abscisse correspond à la valeur de sortie du régulateur [17].

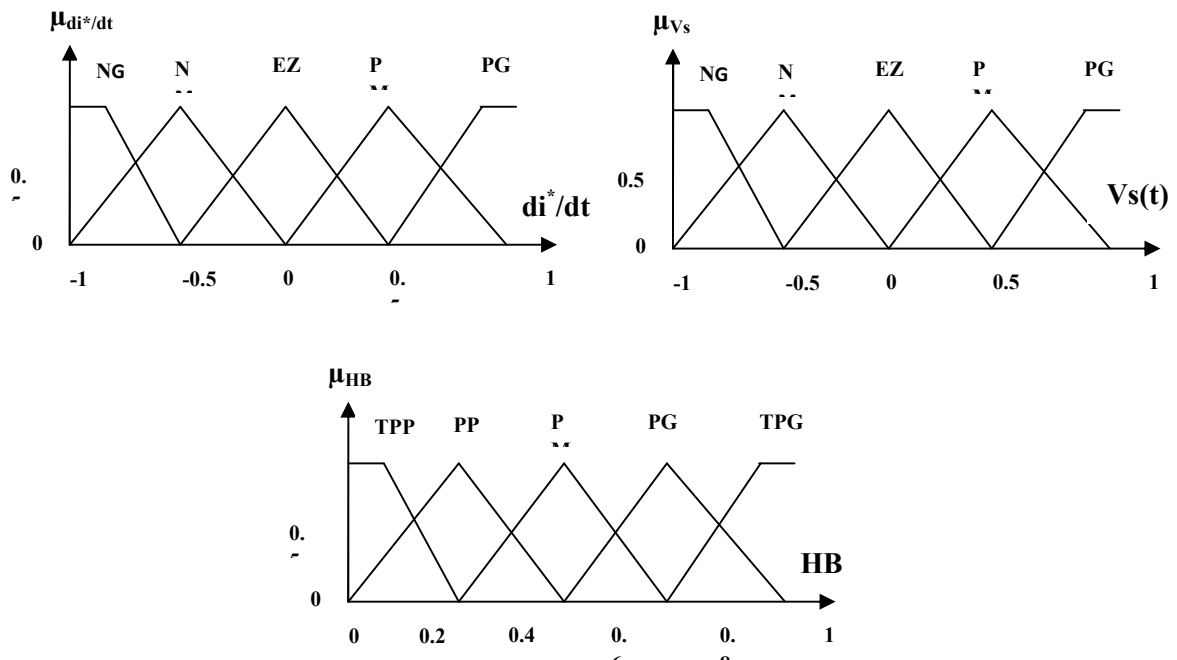


**Figure (II.14):** Défuzzification par centre de gravité.

### *II.9.2 Commande par hystérésis à bande floue*

Cette technique de modulation consiste également à réduire les écarts entre les courants de références et les courants générés par le filtre actif et cela à fréquence constante. Les variables de l'équation peuvent être facilement implantées avec la logique floue tout en améliorant les performances du filtre actif. Dans cette étude, on prend comme variable de sortie la bande hystérésis et comme variable d'entrée, la dérivée du courant du filtre injecté  $di_r^*/dt$  et de la tension du réseau  $V_s(t)$ . On notera que pour la variable de sortie les fonctions d'appartenance correspondant aux sous-ensembles flous sont : TPP : Très Petit Positif, PP : Petit Positif, PM : Moyen Positif, PG : Grand Positif, TPG : Très Grand Positif. Chaque variable d'entrée est transformée en grandeur linguistique à cinq sous-ensemble floue PG : Grand Positif, PM : Moyen Positif, EZ : Environ Zéro, NM Négatif Moyen, NG : Négatif Grand, comme le montre la figure (II.15). Les règles de commande sont résumées dans la matrice d'inférence en tableau II.2 [18]

Le principe de la commande hystérésis à bande floue est expliqué dans la figure (II.15) :



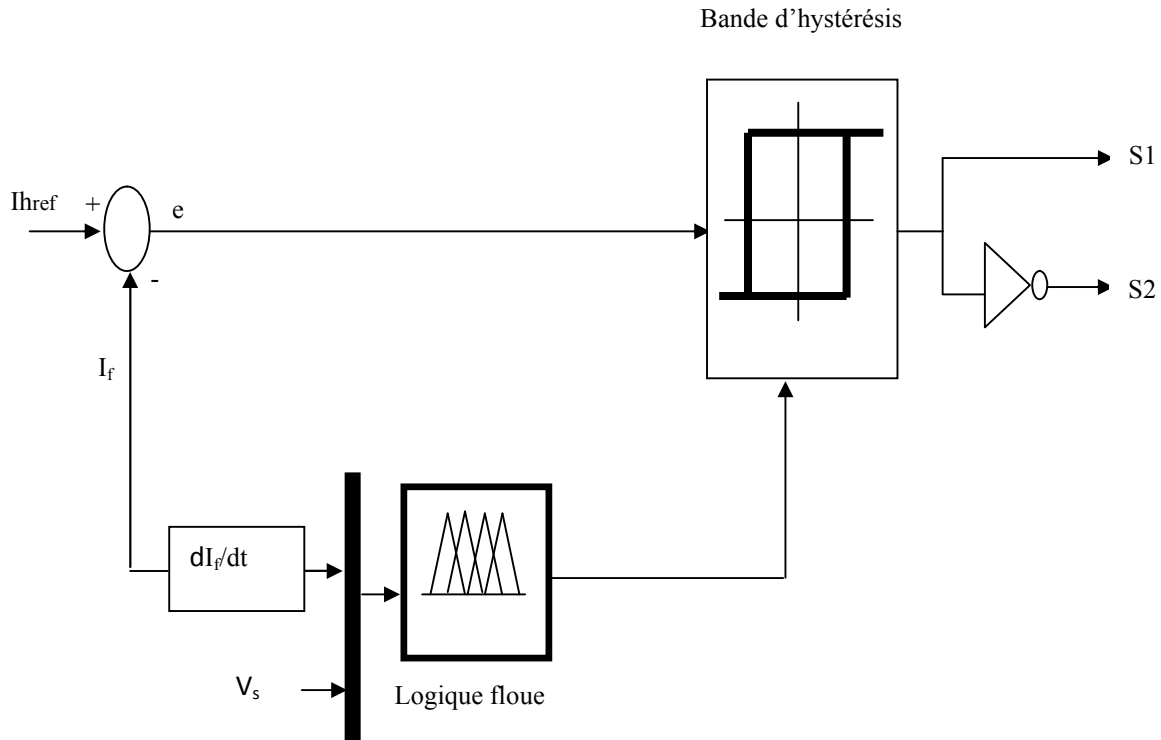
Figure(II.15): les fonction d'appartenance des variable.

$di^*/dt$	NG	NM	EZ	PM	PG
$V_s(t)$	NG	NM	EZ	PM	PG
NG	PP	PP	PM	PP	PP
NM	PP	PM	PG	PM	PP
EZ	TPP	PM	TPG	PM	TPP
PM	PP	PM	PG	PM	PP
PG	PP	PP	PM	PP	PP

Tableau (II.3): Règles de la commande floue.

### II.9.3 Principe de la commande hystérésis à bande floue

Le principe de la commande hystérésis à bande floue est expliqué dans la figure (II.15) :



**Figure (II.16):** Principe de la Commande hystérésis à bande floue.

## II .10 Conclusion

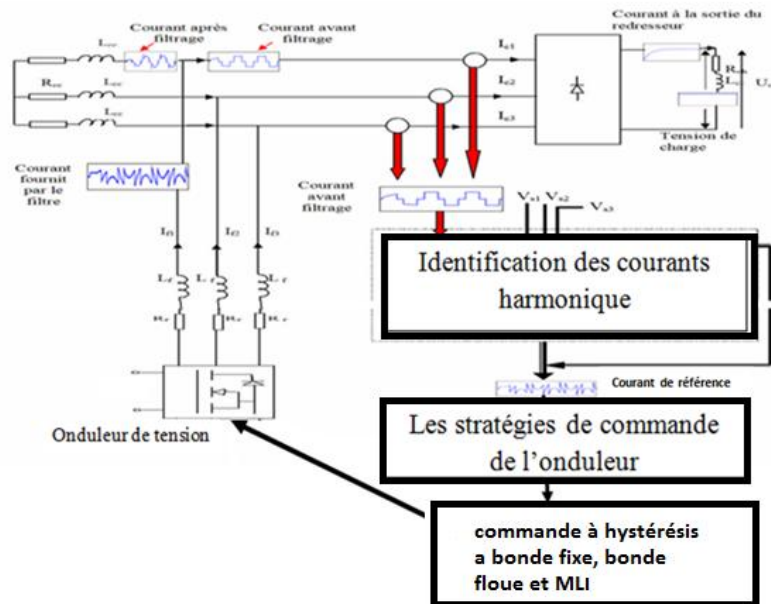
Dans ce chapitre, on a évoqué essentiellement la structure générale d'un FAP triphasé permettant de compenser les harmoniques de courant d'un réseau électrique triphasé à trois fils on a étudié les performances des algorithmes de commande du filtre actif parallèle appliqué sur la charge non linéaire. Et montré d'une manière très claire l'intérêt d'utiliser des convertisseurs (onduleurs) pour la dépollution des réseaux électriques suivant est d'étudier généralement les technique de la commande de l'onduleur triphasée et expliquer Les différentes stratégies de commende des. Onduleurs deux niveaux

# **Chapitre III**

RESULTAT DE SIMULATION

**INTRODUCTION**

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté les résultats de simulation des différentes stratégies de commande. On va l'appliquer pour compenser les courants harmoniques.



**Figure III.1** Schéma global de l'association réseau-charge-onduleur avant et après compensation

**III .1 Résultats de simulation de l'ensemble réseau charge non- linéaire avant le filtrage**

Dans un premier temps, nous avons modélisé puis simulé le réseau électrique triphasé à trois fils, et sa charge non linéaire, sans connecter le filtre actif.

Le tableau (III.1) regroupe l'ensemble des paramètres du réseau ,Filtre actif parallèle et de la charge polluante utilisés dans la simulation

Paramètre		Valeur numérique
Réseau électrique	$E_s$	220v
	Fréquence f	50hz
	Résistance $R_s$	3.63mΩ
	Inductance $L_s$	14.12uh
Charge perturbatrice	Résistance $R_c$	12.87mΩ
	Inductance $L_c$	0.155h
Filtre actif parallèle	Résistance $R_f$	14.6 Ω
	Inductance $L_f$	$L_f = 0.004h$
	Tension $V_{dc}$	700v

**Tableau (III.1) :** Paramètres de simulation d'un filtre actif à deux niveaux

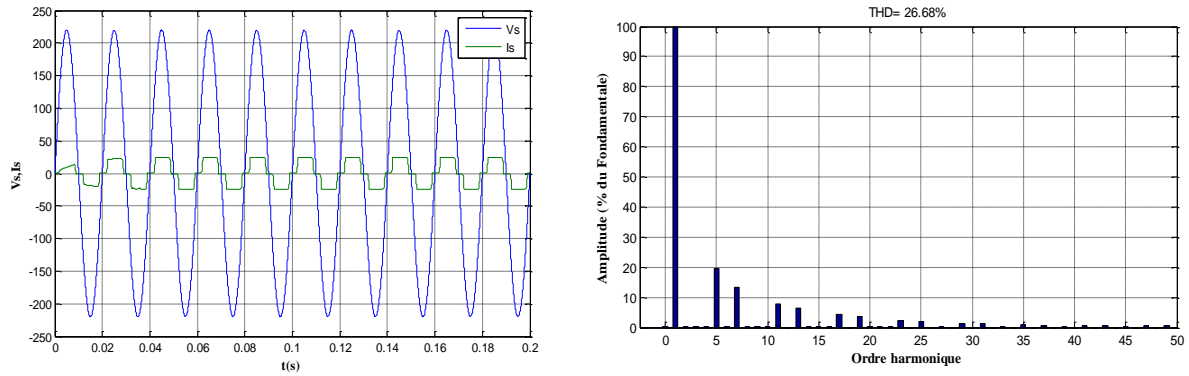
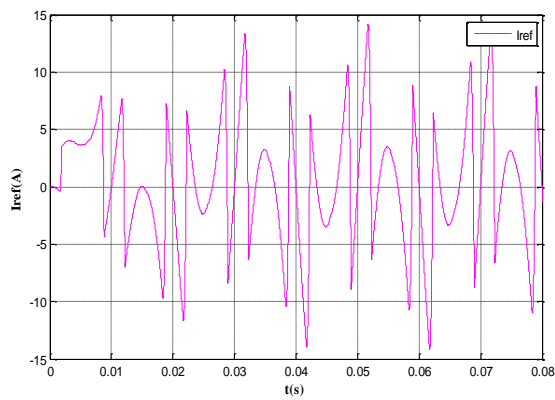


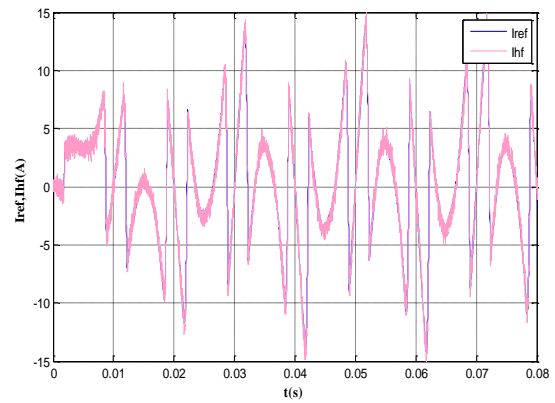
Figure (III.2) : La tension de source et le courant de source avec son spectre avant filtrage.

### III . 2 Résultats de simulation de l'ensemble réseau charge non- linéaire après le filtrage

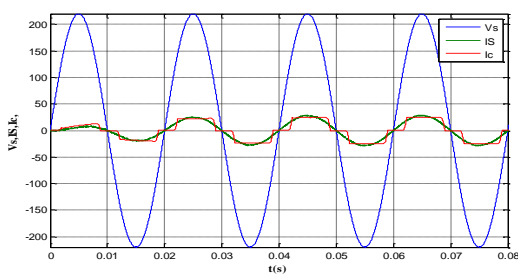
#### II. 2.1 Commande par hystérésis ( $\Delta h=0.1$ )



courant de référence  $I_{ref}$ (A)



courant de référence  $I_{ref}$ (A) ,le courant  $I_{hf}$ (A)



La tension de source, courant de charge et le courant de source avec son spectre après filtrage

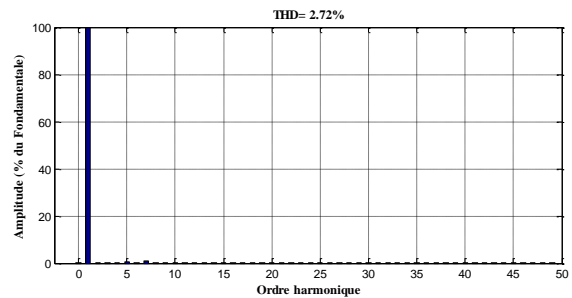
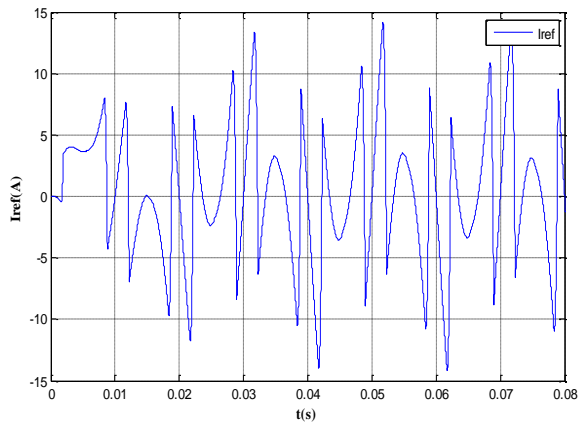
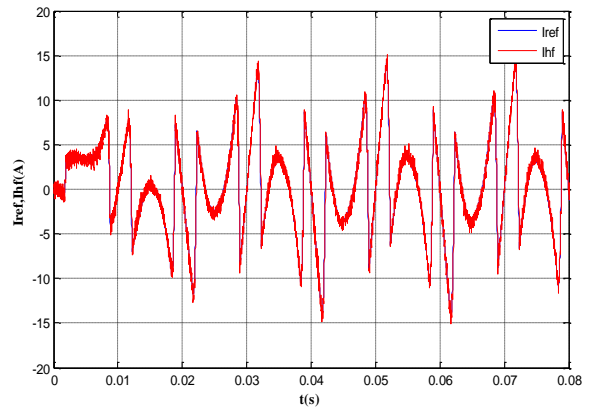


Figure (III.3) : Les grandeurs simulées pour la commande par hystérésis à bande fixe

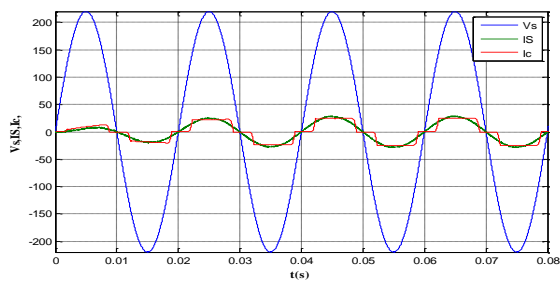
II.1.2 Commande par MLI



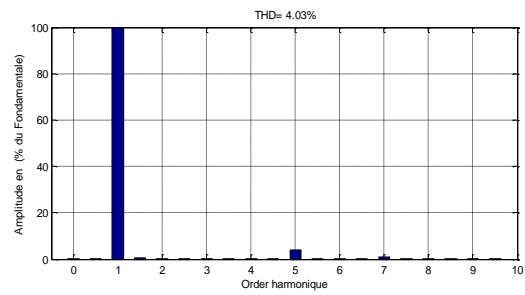
courant de référence Iref(A)



courant de référence Iref(A) ,le courant Ihf(A)

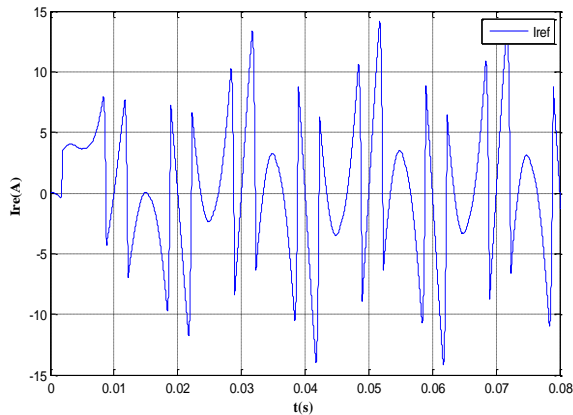
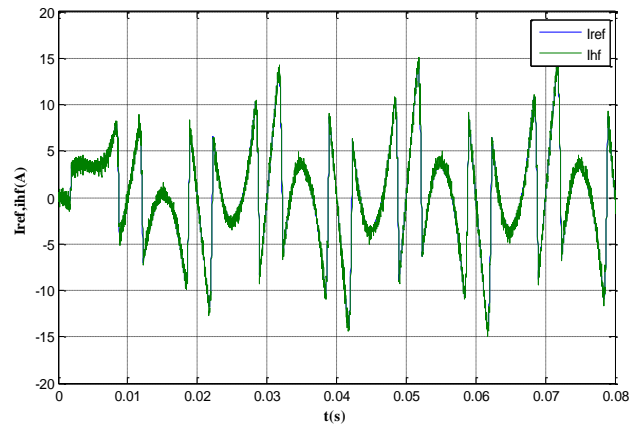
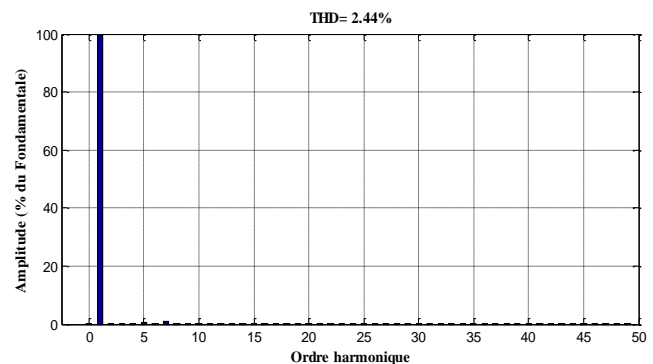
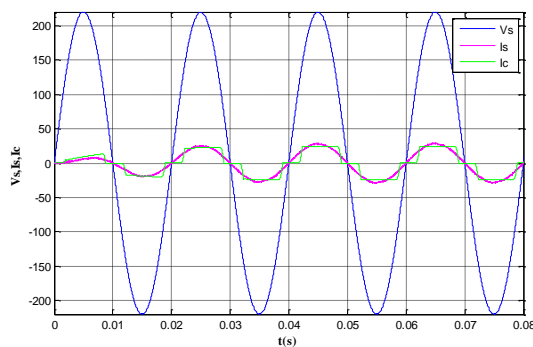


La tension de source, courant de charge et le courant de source avec son spectre après filtrage.



**Figure (III.4) :** Les grandeurs simulées pour la commande par MLI

### II.2.3 La commande hystérésis à bande floue

courant de référence  $I_{ref}(A)$ courant de référence  $I_{ref}(A)$ , le courant  $I_{hf}(A)$ 

La tension de source, courant de charge et le courant de source avec son spectre après filtrage

**Figure (III.5) :** Les grandeurs simulées pour la commande par hystérésis à bande floue

## IV.7 Interprétation

Les figures (III.2, III.3. et III.4) ont montrés que :

- Le filtre actif parallèle est une technique moderne pour éliminer les harmoniques de courant.
- On remarque le déphasage est nul.
- La commande hystérésis à bande floue donné des résultats satisfaisant et légèrement mieux que celle de la méthode MLI et hystérésis à fixe

### III.3 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les résultats de simulation et les interprétations obtenues avec les différentes stratégies de commande de l'onduleur à savoir la commande hystérésis et hystérésis à bande floue et la commande à MLI. On constate que dans les trois cas de commande les courants de lignes délivrés par la source sont sinusoïdaux avec quelques petites composantes à hautes fréquences.

On note que la hystérésis à bande floue permet meilleur résultat par rapport à la commande hystérésis et MLI, cela est montré à travers le THD obtenu.

# **CONCLUSION GENERALE**

### Conclusion générale

Dans le présent travail, nous avons étudié le rôle du filtre actif parallèle commandé par la logique floue pour la dépollution des réseaux électriques. La pollution en harmonique est l'un des problèmes majeurs qui dégrade la qualité d'énergie électrique dans les réseaux de distribution. La circulation des courants harmoniques dans les lignes et entre les charges est difficile à prédire et à contrôler.

Dans cette situation, il existe des méthodes classiques qui peuvent diminuer les effets néfastes des harmoniques et des méthodes modernes qui les éliminent complètement tel que le filtrage actif.

Notre travail s'articule autour de trois chapitres dont le premier a été consacré à la présentation des différents types de perturbations qui peuvent polluer le réseau électrique et à la définition des harmoniques et des équilibres de courants et de tensions.

Dans le deuxième chapitre, nous nous sommes focalisés sur la structure générale des filtres actifs parallèles. Cette structure est divisée en deux parties : la partie puissance constituée de l'onduleur de tension à deux niveaux, la source de tension continue et le filtre de sortie (filtre R L). La deuxième partie est la partie commande incluant l'identification du courant harmonique par la méthode de puissances instantanées et la régulation du courant injecté sur le réseau.

En outre, nous avons travaillé sur trois stratégies de commande à savoir : la commande hystérésis, commande MLI et La commande hystérésis à bande floue a fourni de courant de réseau moins riche en harmonique.

Le troisième chapitre et dernier chapitre, obtenir de meilleurs résultats, et cela a été montré à travers le THD obtenu.

La logique floue est une technique de l'intelligence artificielle qui ne nécessite pas la connaissance exacte du modèle mais elle se repose sur l'expertise humaine.

Enfin les résultats de simulation obtenus sont satisfaisants. Le filtrage actif parallèle s'adapte au changement de la charge et permet de rendre le réseau plus stable avec un facteur de puissance unitaire.

Afin d'améliorer les performances de la commande du filtre actif parallèle par logique floue, nous proposons comme perspectives :

- La réalisation pratique de ce travail.
- L'utilisation d'autres structures d'onduleurs tels que les onduleurs deux niveaux afin d'améliorer les performances du filtre actif parallèle.

## CONCLUSION GENERALE

---

- L'utilisation d'autres techniques de commande de l'intelligence comme les réseaux de neurones dans la commande du filtre actif parallèle.

# **BIBLIOGRAPHIE**

### Bibliographie

- [1] OMEIRI Amar, « Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant », thèse de doctorat, université d'Annaba, 2007.
- [2] BOUGUERRA Samir et BOURENNANE Ibrahim, « Filtrage actif parallèle des réseaux électriques avec compensation de l'énergie réactive », mémoire d'ingénieur, université de M'sila, 2007.
- [03] T. DEFLANDRE et P. MAURS, « Les Harmoniques sur les Réseaux Électriques », Direction des Etude et Recherche en France -Edition EYROLLES, 1998.
- [04] M Tidjani, «Stratégies de Commande d'un Filtre Actif Parallèle à Quatre Fils», Thèse de magistère, CENTRE UNIVERSITAIRE D'EL-OUED, 2012.
- [5] M. AlaaEddin Alali, « Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension », Thèse Doctorat de l'Université Louis Pasteur, Strasbourg I, 2002.
- [6] IETXE BERRIA, « Actionneurs réseaux dédiés à la qualité d'énergie ». Thèse de doctorat de l'INPG, Grenoble, France, (2003).
- [07] Ab. Hamad , S. Rahmani and K. AI-Haddad, Fellow, « A New Hybrid Series Active Filter Configuration to Compensate Voltage Sag, Swell, Voltage and Current Harmonics and Reactive Power » IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2009) Seoul Olympic Parktel, Seoul, Korea July 5-8, 2009
- [08] Ab. Hamadi,, S. Rahmani and K. AI-Haddad, Fellow, « A Hybrid Passive Filter Configuration for VAR Control and Harmonic Compensation » International Symposium on Industrial Electronics , TIE-0235-2009.R3
- [9] T. Mesbahi, T. Ghennam, E.M. Berkouk, and N. Mesbahi, “DPC for wind energy conversion system and active filter”, International Symposium on Environment Friendly Energies in Electrical Applications (EFEEA'10), Ghardaïa, Algérie, 2-4 Novembre 2010.
- [10] N. Mesbah and A. Ouari, “Five-level cascaded shunt active power filter for power quality improvement”, The International Conference on Electronics & Oil From

## Bibliographie

---

Theory to Applications (ICEO'11), Université de Ouargla, Ouargla, Algérie, 1- 2

Mars 2011.

[11] N. Mesbahian and A. Ouari, "Five-level shunt active power filter for power quality improvement in a distribution network", International Conference on Electrical Engineering, Electronics and Automatics'10 (ICEEA'10), Université de Bejaia, Bejaia, Algérie, 2-3 Novembre 2010.

[12] Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE Std. 519-1992

[13] Zebiri Malek & Rahali Antar, « Compensation des Harmonique par Filtre Hybride », mémoire d'ingénieur, Université de Msila, 2006.

[14] Kamil Mohammed & Nouri Salih, « Commandes non linéaires d'un filtre actif parallèle » Thèse d'ingénieur d'état. Université de M'sila, 2009-2010.

[15] BENKECHIDA Noureddine, « Identification de courant harmonique généré par une charge non linéaire », mémoire d'ingénieur, université de M'sila, 2005.

[16] BAKHI Hamza, « Commande d'un Filtre Actif Triphasé Shunt par Logique Floue », mémoire de master, universitaire de M'sila, 2015

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

[18] M Tidjani, « Stratégies de Commande d'un Filtre Actif Parallèle à Quatre Fils », Thèse de magistère, CENTRE UNIVERSITAIRE D'EL-OUED, 2012 M Tidjani, « Stratégies de Commande d'un Filtre Actif Parallèle à Quatre Fils », Thèse de magistère, CENTRE UNIVERSITAIRE D'EL-OUED, 2012.

[19] A. HAMADI, « Contribution à l'Etude des Filtres Hybrides de Puissance Utilisés pour Améliorer la Qualité de l'Energie dans le Réseau Electrique de Distribution », Thèse de doctorat, Ecole de Technologie Supérieure-Québec, Canada, 2010.

[20] H. AKAGI, « Active Harmonic Filters », IEEE, vol. 93, n°12, p. 2128-2141, 2005.

## Bibliographie

---

[21] Mr. Tadjer Sid-Ahmed, «Etude d'un système de compensation d'harmonique en utilisant un générateur photovoltaïque "GPV" », mémoire de Magister, Université M'Hamed Bougara de Boumerdes, 2008.

[22] Steeve Beaulieu, «Etude et mise au point d'un filtre actif d'harmoniques En vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique », mémoire d'ingénieur, Université du Québec à Chicoutimi, 2007.

[23] Miao-Xin Wang, « Filtrage actif de puissance : Etudes et réalisation d'un filtre actif à commande numérique temps réel » Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 18 Décembre 1992.

[24] Mr. Tadjer Sid-Ahmed, «Etude d'un système de compensation d'harmonique en utilisant un générateur photovoltaïque "GPV" », mémoire de Magister, Université M'Hamed Bougara de Boumerdes, 2008.

[25] Melle Hind Djeghloud, « FILTRAGE ACTIF DE PUISSANCE », Thèse de Doctorat, Université de Constantine ,2007.

[26] Melle Hind Djeghloud, « FILTRAGE ACTIF DE PUISSANCE », Thèse de Doctorat, Université de Constantine ,2007.

[27] DJAFFAR OULD ABDESLAM.

"Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension", Thèse de doctorat de l'université de Haute Alsace 08 décembre 2005

[28] TOUAL Belkacem, «Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable», mémoire de magister, université Batna, 2010.

[29] GAOUAR Fateh et Ouled Dje Sidi, «Commande d'un filtre actif série», mémoire d'ingénieur, université de M'sila, 2010.

[30] BOUAFIA Abdelouahab, «techniques de commande prédictive et floue pour les systèmes d'électronique de puissance: application aux redresseurs a MLI», thèse de doctorat, université Sétif, 2010

## Bibliographie

---

- [31] M. MEKKI Idriss, « Commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation MADA à base d'un régulateur flou », mémoire de master, université de M'sila, 2014.
- [32] K.Nabti, «Contribution à la Commande de la Machine Asynchrone par DTC et Logique Floue», Mémoire de Magister, université de Constantine, 2006.
- [33] MIHOUB Youcef, «Commande floue adaptative de la machine asynchrone», thèse de Doctorat, université d'Oran, 2012.
- [34] Hammamid Chaouki, «Amélioration de la compensation active du courant harmonique par la commande MLI vectorielle», Thèse de master. Université de M'sila, 2011/2012
- [35] Badache Zohir & Saci Abdeslam, «Etude et simulation d'un filtre actif parallèle en utilisant un onduleur a trois niveaux a structure npc pour la compensation des courants harmoniques», Thèse d'ingénieur d'état. Université de M'sila, 2005-2006

# **ANNEXE**

### PARAMETRES UTILISES

#### Paramètres de la source :

La tension simple :  $V=220$  V et la fréquence :  $f=50$  hz

$$V_a=220 \sqrt{2} \sin (\omega t).$$

$$V_b=220 \sqrt{2} \sin (\omega t -120).$$

$$V_c=220 \sqrt{2} \sin (\omega t +120).$$

#### Paramètres du filtre actif :

$$R_f= 0.2 \Omega$$

$$L_f= 0.004 \text{ H}$$

#### Paramètres de la charge :

$$R_c = 14.6 \Omega$$

$$L_C= 0.155 \text{ H}.$$

#### Paramètres de l'onduleur :

$$V_{dc}= 700 \text{ V}.$$

$$C= 10 \text{e-}3 \text{ F}$$

#### Paramètres du régulateur PI :

$$K_i=2.53.$$

$$K_p= 0.07$$

## Résumé

Dans ce mémoire nous exposons le problème de la dégradation du courant dans les installations électrique, qui découle directement de la prolifération des charges non linéaires, pour le résoudre, nous avons utilisé un onduleur à deux niveaux comme filtre actif parallèle, qui injecte des courants harmoniques au point de connexion avec méthode de compensation la méthode des puissances active et réactive instantanées . Nous mettrons en évidence trois stratégies de commande par hystérésis , MLI et hystérésis à bonde floue Les résultats de simulation utilisant Power System Blokset (PBS)/Simulink de Matlab montrent une réduction du THD conformément à la norme IEEE-519 standard

**Mots clés :** qualité de l'énergie, harmoniques, onduleur deux niveaux, filtre actif parallèle, charge non linéaire, compensateur de l'énergie, Commande à hystérésis, Commande à MLI, hystérésis à bonde floue

## ملخص

إن مشكلة التلوث بالتوافقيات في الشبكات الكهربائية هي في تفاقم مقلق خاصة مع تزايد استعمال الحمولات غير الخطية هذا العمل يمثل دراسة مصفي فعال متوازي ثلاثي الطور و مختلف الطرق المستعملة في التحكم به ، لكي نتحكم في المصفي الفعال هناك نقطتين هامتين يجب الاهتمام بهما : كيفية استخراج التيار المحمل بالتوافقيات و التحكم في التيارات المبعوثة من طرف المصفي الفعال في الشبكة الكهربائية ، هناك العديد من الطرق لاستخراج التيارات المحملة بالتوافقيات منها طريقة الاستطاعة اللحظية و الطريقة المغيرة للاستطاعة اللحظية و الطريقة المعتمدة على المصفي متعدد المتغيرات . ثلاث أنواع من الطرق للتحكم في التيار ، التحكم في عرض الذبذبة وبواسطة التحكم الشعاعي و الطريقة التخلفية الكلاسيكية ومن أجل تحسين نوعية الطاقة الكهربائية قمنا بدراسة مختلف الطرق الخطية و اللاخطية ، التحكم بواسطة معدل التكامل ، و النمط الانزلاقي و التحكم بالنمط الغامض ولقد لمسنا أهميتها من خلال تخفيض نسبة التوافقيات

## مفاتيح الكلمات :

مصفي فعال متوازي - التحكم الشعاعي - التحكم بالنمط الغامض - التوافقيات - الإستطاعة اللحظية - تيار محمل بالتوافقيات