

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique  
Filière : électrotechnique  
Option : Commande Electriques

Réf: .....

Mémoire de Fin d'Etudes  
En vue de l'obtention du diplôme :

**MASTER**

*Thème*

Commande d'un Filtre Actif  
Parallèle à Trois Fils

Présenté par :  
Dahane Mohamed El-Amine  
Soutenu le : 04 Juin 2014

Devant le jury composé de :

Mr. Golea Ammar

Mr. Ben chouia Med toufik

Mr. Ghamri ahmed

Professeur

M.C.A

M .C.B

Président

Encadreur

Examineur

Année universitaire : 2013 / 2014

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique  
Filière : électrotechnique  
Option : Commande Electriques

Mémoire de Fin d'Etudes  
En vue de l'obtention du diplôme :

**MASTER**

*Thème*

Commande d'un Filtre Actif Parallèle à Trois Fils

**Présenté par :**

Dahane Mohamed El-Amine

**Avis favorable de l'encadreur :**

Ben Chouia Mohamed toufik

signature

**Avis favorable du Président du Jury**

*Golea Ammar*

Signature

**Cachet et signature**



Université Mohamed Khider Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique  
Filière : électrotechnique  
Option : Commande Electriques

## *Thème :*

### Commande d'un Filtre Actif Parallèle à Trois Fils

**Proposé par : Dahane Mohamed El-Amine**

**Dirigé par : Ben Chouia Mohamed Toufik**

### **RESUMES (Français et Arabe)**

لقد أصبحت رداءة التيار الكهربائي في شبكات الجهد المنخفض المتناوب مصدر قلق شديد بسبب زيادة استخدام الحملات غير الخطية والملوثة.

تمثل هذه الورقة مساهمة في تحسين نوعية التيار الكهربائي في مثل هذه الشبكات. ندرس المصفي الفعال المتوازي ذو ثلاثة خيوط ونكشف عن التيار الملوث باستعمال طريقة الاستطاعة اللحظية, وقد أعطى هذا الأخير نتائج ممتازة. أعطت المحاكاة التي أجريت خلال هذا العمل نتائج ممتازة تدل على أهمية هذا العمل في الترشيح التوافقي للتيار الكهربائي وكذلك في تحسين معامل الاستطاعة.

**كلمات البحث:** المصفي الفعال المتوازي ذو ثلاثة خيوط, التوافقات, الاستطاعة اللحظية, تيار محمل بالتوافقات.

### **Résumé**

La qualité du courant électrique au niveau des réseaux alternatifs basse tension actuelles est devenue très préoccupante à cause de l'accroissement de l'usage des charges non-linéaires et polluantes.

Ce document est une contribution à l'amélioration de la qualité du courant électrique dans ce type de réseaux. Le Filtre Actif Parallèle à Trois Fils est étudié. L'identification du courant perturbateur est faite à la base de la méthode de la puissance instantané, qui ont prouvé de très bonne performance de filtrage. Les simulations effectuées témoignent de l'importance de ce travail au filtrage des harmoniques et à la compensation de l'énergie réactive.

**Mots clés :** Filtre actif parallèle à trois fils, régulateur PI, Taux de distorsion harmonique, puissance instantané.

# *Dédicace*

*Parce qu'il y a des choses plus faciles à écrire qu'à dire, je dédie ce*

*Modeste travail de fin d'étude :*

*A mes symboles d'affection et de tendresse*

*Ma chère maman et mon cher père*

*A mes frères Bachir et Hicham*

*A mes chères sœurs Sarra et Nessrine pour leur soutien moral  
et leurs sacrifices au long de ma formation.*

*A ma grande famille*

*A tous qui m'ont encouragé et aidé dans la réalisation de ce projet*

*A tous mes amis chacun de son nom*

*A tous mes collègues de promotion 2014*

*A tous les enseignants de ma période d'étude*

*A tous ceux que j'aime et m'aiment.*

*Amine*

## Remerciement

Nous tenons à remercier tout d'abord et avant tout 'Dieu tout grand'.

Nous tennons à remercier chaleureusement tous se qui avait la mains,  
de prés ou de loin pour la mise en œuvre de ce fruit intellectuelle.

nous présentons mes vastes et profonds remerciements pour tous ceux qui ont  
participé à faire cette recherche et à accomplir ce travail, on citant l'encadreur  
**Mr. Ben Chouia Mohamed Toufik** qui ma fait l'honneur d'être rapporteur de notre travail, et nous  
nous adressons notre remerciements pour son aide et ses conseils.

Enfin nous remercions chaleureusement; ensemble des amis et collègues  
qui ont contribués à l'aboutissement de notre travail.



## List des tableaux

Tab. II.1 : Tensions générées par l'onduleur.....	28
Tableau III.1 : paramètres des éléments du réseau .....	41
Tableau III.1 : paramètres des éléments du réseau .....	41

## List des figures

Fig I.1 : Schémas équivalents pour caractériser la déformation de la tension au point de raccordement.	7
Fig I.2 : Différents types de filtres harmoniques passifs.	11
Fig I.3 : Combinaison de filtres passifs pour redresseur à thyristors.	12
Fig I.4 : Topologie du filtre actif parallèle de puissance.	15
Fig I.5 : Topologie du filtre actif série de puissance.	15
Fig I.6 : Topologie du filtre actif hybride.	16
Fig I.7 : Topologie d'une alimentation sans interruption avec ses trois modes d'opération.	17
Fig I.8 : Structure de dispositifs FACTS shunt : (a) SVC, (b) STATCOM.	18
Fig I.9 : Structure de dispositifs FACTS série et combiné : (a) UPFC, (b) TCSC.	19
Fig I.10 : Structure et principe de commande d'un convertisseur AC/DC avec PFC.	20
Fig I.11 : Schéma synoptique d'un redresseur triphasé à injection de courant.	21
Fig I.12 : Topologie d'un redresseur à MLI triphasé de courant.	22
Fig I.13 : Topologie d'un redresseur à MLI triphasé de tension.	22
Fig II.1 : Principe du filtrage actif parallèle	24
Fig II.2 : Exemple de formes d'ondes	25
Fig II.3 : structure générale d'un filtre actif parallèle	26
Fig. II.4 : Onduleur de tension triphasé	26
Fig. II.5. Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur	28
Fig II.6 : Schéma du filtre de puissance utilisé pour l'extraction des composantes fondamentales $(\bar{p}, \bar{q})$	33
Fig II.7 : Algorithme de la méthode des puissances instantanées pour l'extraction des courants harmoniques	34
Fig II.8 : Boucle de régulation de la tension continue.	36
Fig II.9 Principe de la commande par hystérésis.	37
Fig III.1 : Schéma synoptique de l'association filtre actif-réseau-charge polluante.	39
Fig III.2: Schéma synoptique d'un réseau triphasé.	40
Fig III.3 : charge polluante	40

Fig III.4 : Présentations hématisées d'un onduleur triphasé	41
Fig III.5 : Schéma global d'un filtre actif parallèle	42
Fig III.6 : Schéma bloc de la méthode d'identification du courant harmonique	43
Fig III.7 : onduleur de tension	43
Fig III.8 : Spectre de la courante source avant filtre.	44
Fig III.9 Courants des trois phases du réseau électrique avant l'injection du filtre	45
Fig III.10 Courants des trois phases du réseau électrique après l'injection du filtre	46
Fig III.11 : Spectre de la courante source après filtre.	47
Fig III.12 Le courant injecté par le filtre	47
Fig III.13 La tension de capacité	47

# Liste des Symboles et Acronymes

BT : Basse tension

$C_{dc}$  : Condensateur du bus continue

D : Puissance Déformante

S : puissance apparente

FAP : Filtre Actif Parallèle

F.P : Facteur de puissance

FPB : Filtre Passe Bas

FPH : Filtre Passe Haut

$I_c$  : Valeur efficace du courant de la charge

$I_f$  : Valeur efficace du courant injecté par le FAP

$I_h$  : Valeur efficace du Courant harmonique du rang h

IGBT : Insolated Gate Bipolar Transistor

MOSFET: Metal oxide Semiconductor Field Effect

$I_s$  : Valeur efficace du courant de la source

$i_\alpha$  : Courants instantanés suivant l'axe  $\alpha$

$i_\beta$  : Courants instantanés suivant l'axe  $\beta$

$L_c$  : Inductance du réseau couté charge

$L_f$  : Inductance de couplage

$L_s$  : Inductance du réseau couté source

$P_{dc}$  : Puissance absorbée par le condensateur

PI : Proportionnel-Intégral

p : Valeur instantanée de la puissance réelle

q : Valeur instantanée de la puissance Imaginaire

$R_c$  : Résistance du réseau coté charge

$R_s$  : Résistance du réseau coté source

THD : Taux de Distorsion Harmonique

$T_i$  : Etat de l'interrupteur  $i$  (ouvert ou fermé)

$V_{dc}$  : Tension aux bornes du condensateur

$V_s$  : Tension simple efficace de la source

$V_\alpha$  : Tensions instantanés suivant l'axe  $\alpha$

$V_\beta$  : Tensions instantanés suivant l'axe  $\beta$

$\alpha$ -  $\beta$  : Axes  $\alpha$  et  $\beta$  du repaire de Concordia

## INTRODUCTION GENERALE

Les perturbations de courant et de tension dans les réseaux de distribution électrique sont causées par la prolifération des charges non linéaires, telles que les convertisseurs statiques (les redresseurs, les gradateurs, etc.), le matériel informatique, les appareils de climatisation ou encore les éclairages à base de tubes fluorescents.

Ces appareils absorbent des courants non sinusoïdaux et introduisent de ce fait des pollutions harmoniques. Les harmoniques engendrées par ces charges circulent dans les réseaux électriques et perturbent sérieusement le fonctionnement normal de certains équipements électriques pouvant même engendrer leur destruction. Ces effets néfastes peuvent apparaître instantanément, mais peuvent également se produire en différé tant pour le distributeur que pour les exploitants.

C'est pour ces raisons que le filtrage des distorsions en courant et en tension est au centre des préoccupations actuelles à la fois des fournisseurs et des utilisateurs d'énergie électrique. Pour des installations électriques existantes, les filtres actifs parallèles (FAP) sont à ce jour les solutions avancées de dépollution les plus adéquates. Actuellement, les solutions actives sont celles qui répondent au mieux aux contraintes de la production et de la distribution. Leur réponse est instantanée et elles s'adaptent automatiquement aux évolutions des perturbations introduites par les charges du réseau électrique. Que ce soit dans le secteur industriel ou dans le secteur domestique, les FAP s'insèrent facilement dans un réseau de distribution électrique sans imposer un aménagement des installations du fournisseur d'énergie ou du consommateur.

Les FAP sont constitués de convertisseurs à base d'interrupteurs de puissance, de type onduleur, associés à un dispositif de contrôle et de commande adapté. Ils peuvent être assimilés à des sources de courant ou de tension qui compensent directement les perturbations harmoniques en injectant sur le réseau des courants ou des tensions en opposition de phase par rapport aux perturbations mesurées.

Dans ce mémoire le travail est réalisé sur l'ensemble réseau, charge non linéaire (pont triphasé non commandé), filtre actif.

Cette mémoire comporte trois chapitres, structurés comme suit :

Au premier chapitre nous analyserons les naissances des perturbations harmoniques et leurs effets sur le réseau d'alimentation, les origines, les conséquences et les normes inhérentes à ces perturbations seront analysées. Dans ce chapitre, nous présenterons également les solutions traditionnelles et modernes de dépollution.

Dans le deuxième nous avons traité le filtre actif parallèle à base d'onduleur de tension et nous avons étudié la méthode d'identification des courants harmoniques, et le régulateur de la tension continu, la commande onduleur.

Au dernier chapitre, nous présentons les schémas du système simulé et le résultat de simulation de compensation des harmoniques par un filtre actif parallèle.

Enfin, nous terminons notre projet par une conclusion générale relative aux résultats de Simulation avec quelques perspectives.

# Sommaire

<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Pollution Harmonique des Réseaux Electriques, Causes et Remèdes</b>	<b>3</b>
<b>I.1 Introduction .....</b>	<b>3</b>
I.2 Qualité de l'énergie électrique.....	3
I.3 Problématique des harmoniques.....	4
I.4 Sources des harmoniques et leurs effets.....	5
I.5 Caractérisation des harmoniques.....	6
I.6 Conséquences néfastes des harmoniques.....	8
I.7 Solutions possibles pour réduire les harmoniques et d'améliorer la qualité de l'énergie...	10
I.7.1 Solutions traditionnelles de dépollution.....	10
I.7.1.1 Filtrage passif.....	11
I.7.2 Solutions modernes à base d'électronique de puissance.....	13
I.7.2.1 Filtres actifs.....	13
I.7.2.1.1 Filtre actif parallèle-FAP.....	14
I.7.2.1.2 Filtre actif série-FAS.....	15
I.7.2.1.3 Filtres actifs hybrides.....	15
I.7.2.2 Les alimentations sans interruption (UPS).....	16
I.7.2.3 Les FACTS.....	17
I.7.2.4 Prélèvement sinusoïdal.....	19
I.7.2.4.1 Correction du facteur de puissance ( <i>PFC</i> ).....	20
I.7.2.4.2 Redresseurs à injection de courant.....	21
I.7.2.4.3 Redresseurs à MLI.....	21
I.7.2.4.3.1 Redresseur à MLI de courant.....	21
I.7.2.4.3.2 Redresseur à <i>MLI</i> de tension .....	22
<b>I.8 Conclusion.....</b>	<b>23</b>
<b>Chapitre II : Filtre actif parallèle et identification du courant de référence</b>	<b>24</b>
<b>II.1 Introduction .....</b>	<b>24</b>
II .2 Principe du filtre actif parallèle.....	24

II.3 Structure d'un filtre actif parallèle .....	25
II.3.1 Topologie générale.....	25
II.3.2 Etude de la partie puissance.....	26
II.3.2.1 Onduleur de tension.....	26
II.3.2.1.1 Structure générale.....	26
II.3.2.1.2 Tension fournie par l'onduleur.....	27
II.3.2.1.3 Représentation vectorielle.....	27
II.3.2.1.4 Système de stockage d'énergie .....	28
II.3.2.1.5 Filtre de couplage .....	29
II.3.3 Étude de la partie commande-contrôle.....	30
II.3.3.1 Introduction à la stratégie de commande .....	30
II.3.3.2 La méthode d'identification des courants perturbés .....	31
II.3.3.2.1 Généralités sur les méthodes d'identification.....	31
II.3.3.2.2 Principe du fonctionnement de la méthode des puissances instantanées .....	31
II.3.3.2.2.1 Généralités sur les puissances instantanées.....	31
II.3.3.3 Algorithme d'identification .....	34
II.3.4 Régulation de la tension continue .....	35
II.3.4.1 Commande de l'onduleur .....	36
<b>II.4 Conclusion .....</b>	<b>37</b>
<b>Chapitre III : Modélisation et Simulation</b> .....	<b>38</b>
<b>III.1 Introduction.....</b>	<b>38</b>
III.2 Schéma synoptique de l'association filtre actif-réseau-charge polluante.....	39
III.3 modélisation de l'association réseau- filtre actif- charge polluante :.....	40
III.3.1 Modélisation du réseau.....	40
III.3.2 Modélisation de la charge polluante (Redresseur triphasé) .....	40
III.3.3 Modelisation du filtre actif (ou de l'onduleur) .....	41
III.4 Parametres de la simulation .....	41
III.5 Résultat de Simulation.....	42
III.5.1 avant le filtrage.....	42
III.5.2 après le filtrage .....	44

**III.6 Conclusion..... 46**  
**Conclusion générale..... 47**

---

# Chapitre I

Pollution Harmonique des Réseaux Electriques, Causes et Remèdes

## I.1 Introduction

L'utilisation croissante dans les appareils industriels ou domestiques de systèmes commandés à base d'électronique de puissance entraîne de plus en plus de problèmes de perturbation au niveau des réseaux électriques. Ces convertisseurs statiques apportent une souplesse d'utilisation, des fonctionnalités supplémentaires, une augmentation de la fiabilité, le tout avec un rendement élevé. De plus, avec la généralisation de leur utilisation les coûts de ces modules d'électronique de puissance ne cessent de baisser. L'inconvénient de ces dispositifs c'est qu'ils se comportent comme des charges non linéaires et absorbent des courants avec des formes d'ondes différentes des tensions d'alimentation. Dans ce cas, l'évolution des courants n'est pas liée directement aux variations sinusoïdales des tensions. Ces courants périodiques mais non sinusoïdaux circulent au travers des impédances des réseaux et donnent naissance à des tensions non sinusoïdales et des déséquilibres qui viennent se superposer à la tension initiale au point de raccordement. Ils peuvent générer aussi une consommation de puissance réactive. Ces perturbations périodiques régulières sont désignées comme des perturbations harmoniques. Ces perturbations ont des conséquences préjudiciables sur le bon fonctionnement des appareils électriques et ont des effets à la fois instantanés et à long terme. Il est donc important pour une installation donnée de savoir définir, analyser et quantifier les harmoniques. Dans ce premier chapitre, des notions élémentaires d'analyse harmonique, les origines et les conséquences de la pollution harmonique sont exposés.

## I.2 Qualité de l'énergie électrique

La qualité de l'énergie est une notion assez large qui recouvre à la fois la qualité de la fourniture électrique, la qualité de l'onde de tension et la qualité des courants. Lorsque la tension est présente, les principaux phénomènes pouvant l'affecter sont d'une part les variations lentes : creux de tension, sursensions, coupures, déséquilibres et d'autre part des variations rapides : sursensions transitoires, flicker ainsi que les harmoniques. La qualité des courants reflète par contre la possibilité des charges à fonctionner sans perturber ni réduire l'efficacité du système de puissance. C'est pourquoi certains considèrent que la qualité de l'électricité se réduit à la qualité de la tension [1].

La qualité de l'alimentation électrique ou qualité de l'onde fait référence à la mesure du degré de conformité d'une source d'alimentation électrique par rapport à un certain nombre de critères ou de normes à caractère quantitatif et absolu. L'énergie électrique est délivrée

sous forme d'un système triphasé de tensions sinusoïdales. Les paramètres caractéristiques de ce système 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.

Tout phénomène physique affectant une ou plusieurs de ces caractéristiques peut être considéré comme perturbation. En pratique, ces perturbations sont classées selon la durée du phénomène. Ainsi, il est possible de distinguer :

- les altérations de l'onde de tension (harmoniques, déséquilibre, flicker). Ces phénomènes sont permanents ou durent au minimum plusieurs minutes,
- les creux de tension et coupures brèves d'une durée de l'ordre d'une à quelques secondes,
- les surtensions transitoires, de durée inférieure à une période [1].

Dans ce qui suit nous nous restreindrons à la présentation des perturbations provoquées par les harmoniques ainsi que leurs conséquences néfastes sur le réseau électrique [1].

### **I.3 Problématique des harmoniques**

La problématique des harmoniques dans le réseau électrique, également appelée pollution harmonique, n'est pas un phénomène nouveau. Néanmoins, du fait que de plus en plus de charges non linéaires se connectent au réseau, la problématique des harmoniques est devenue très répandue. Les charges non linéaires provoquent une distorsion des courants et donc des tensions, ce qui peut entraîner un mauvais fonctionnement des dispositifs raccordés au réseau. D'où, l'intérêt d'éliminer ou de minimiser ces harmoniques [1].

Un récepteur d'énergie est considéré par le réseau électrique comme une charge perturbatrice s'il absorbe des courants non sinusoïdaux ou des courants déséquilibrés ou s'il consomme de la puissance réactive. Les deux premiers types de perturbations peuvent déformer ou déséquilibrer les tensions du réseau lorsque l'impédance de celui-ci n'est pas négligeable. Le troisième réduit la capacité de production ou de transmission de la puissance active des générateurs, des transformateurs et des lignes électriques [1].

Les harmoniques de courant, une fois injectés par des charges non linéaires, se propagent à travers le réseau électrique en affectant la forme d'onde des tensions aux différents points du réseau. Cette propagation n'est limitée que par les bifurcations (points de

division des courants) et les impédances du réseau qui dépendent généralement de la fréquence des courants harmoniques. La présence des harmoniques de courant se révèle essentiellement à travers leurs effets sur la tension du réseau [1].

#### **I.4 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 le réseau de distribution, comme par exemple [1] :

- L'échauffement des conducteurs, des câbles, des condensateurs et des machines dû aux 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.

Différents critères sont définis pour caractériser ces perturbations. Le THD et le facteur de puissance sont les plus employés pour quantifier respectivement les perturbations harmoniques et la consommation de puissance non-active. Le THD représente le rapport de la valeur efficace des harmoniques à la valeur efficace du fondamental. Il est défini par la relation :

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{X_h^2}{X_1^2}} \quad (I.1)$$

Avec  $X$  soit un courant, soit une tension [2].

### I.5 Caractérisation des harmoniques

La perturbation harmonique est généralement caractérisée par le taux de distorsion harmonique ( $THD$ ) défini pour la tension ou le courant. Ce critère est le plus souvent employé pour quantifier le contenu harmonique d'un signal distordu. Il mesure également le degré de déformation du signal apporté par les harmoniques par rapport à une onde sinusoïdale. Il va de soi que la répartition spectrale complète généralement l'information sur le  $THD$  en indiquant le rang des harmoniques dominants. Pour chiffrer la consommation de puissance réactive le facteur de puissance ( $FP$ ) est généralement utilisé [2].

Le courant absorbé par une charge non linéaire (convertisseur statique) n'est pas sinusoïdal, mais sa valeur moyenne sur chaque phase est souvent nulle. Dans ce cas, la décomposition en série de Fourier du courant donne :

$$i(t) = \sqrt{2}I_1 \sin(\omega t + \alpha_1) + \sum_{h=2}^{\infty} \sqrt{2}I_h \sin(h\omega t + \alpha_h) \quad (I.2)$$

Avec :  $I_1, I_h$  : valeur efficace du courant fondamental et du courant harmonique de rang  $h$ .

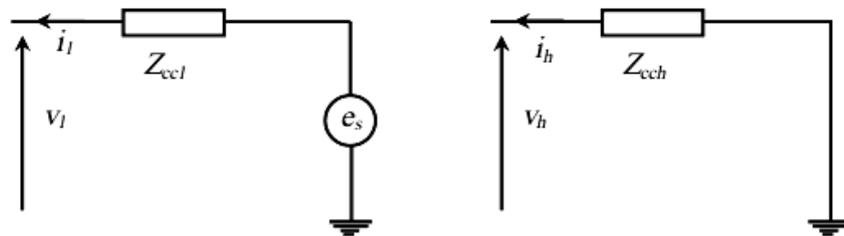
$\alpha_1, \alpha_h$  : déphasage du courant fondamental et du courant harmonique de rang  $h$ .

$\omega$  : pulsation fondamentale du réseau.

Le taux de distorsion harmonique de ce courant s'exprime sous la forme suivante :

$$THD_i = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{X_h^2}{X_1^2}} \quad (I.3)$$

Pour étudier la déformation de la tension du réseau provoquée par le prélèvement de courants distordus, nous représentons la source d'énergie par une f.é.m. ( $e_s$ ) à la fréquence fondamentale mise en série avec une impédance variable avec la fréquence comme le montre la figure I.1.



(a) : pour la fréquence fondamentale (b) : pour l'harmonique de rang  $h$

**Fig I.1** : Schémas équivalents pour caractériser la déformation de la tension au point de raccordement.

Sur ces schémas, les impédances représentent :

$Z_{cc1}$  : Impédance de court-circuit de la source à la fréquence fondamentale,

$Z_{cch}$  : Impédance de court-circuit de la source à la fréquence du rang  $h$ .

La tension au point de raccordement,  $v(t)$ , est composée de la somme ci-dessous :

$$v(t) = v_1(t) + \sum_{h=2}^n v_h(t) \quad (\text{I.4})$$

Avec :

$$\begin{aligned} v_1(t) &= e(t) - |Z_{cc1}| \cdot I_1 \sqrt{2} \sin(\omega t + \alpha_1 + \phi_{cc1}) \\ v_h(t) &= -|Z_{cch}| \cdot I_1 \sqrt{2} \sin(h\omega t + \alpha_h + \phi_{cch}) \end{aligned} \quad (\text{I.5})$$

Où :

$|Z_{cc1}|, |Z_{cch}|$  représente le module de  $Z_{cc1}$  et  $Z_{cch}$  respectivement.

$\phi_{cc1}, \phi_{cch}$  représente l'argument de  $Z_{cc1}$  et  $Z_{cch}$  respectivement.

De l'équation (1.4), on constate que la tension du réseau n'est plus sinusoïdale et est déformée par les courants harmoniques par l'intermédiaire de l'impédance de court-circuit. Pour la rendre sinusoïdale deux solutions sont possibles : modification de l'impédance du réseau ou annuler les harmoniques de courant [2].

Le taux de distorsion harmonique en tension est un paramètre qui sert à évaluer la déformation de la tension et s'exprime sous la forme suivante :

$$THD_i = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{V_h^2}{V_1^2}} \quad (\text{I.6})$$

Il est possible aussi de caractériser les harmoniques par leur participation dans la puissance apparente. Nous utilisons alors la notion de puissance déformante "D". Dans le cas d'un réseau équilibré à  $m$  phases, la puissance apparente  $S$ , la puissance active  $P$  et la puissance réactive  $q$  sont données par les relations suivantes :

$$S = m \sqrt{\sum_{h=1}^n V_h^2} \cdot \sqrt{\sum_{h=1}^n I_h^2} = m V_{eff} \cdot I_{eff} \quad (I.7)$$

$$P = m \sum_{h=1}^n V_h I_h \cos(\varphi_h) \quad (I.8)$$

$$q = m \sum_{h=1}^n V_h I_h \sin(\varphi_h) \quad (I.9)$$

A son tour la puissance déformante caractérisant la contribution des harmoniques est définie par la formule suivante :

$$D = m V_1 \sqrt{\sum_{h=1}^n I_h^2} \quad (I.10)$$

Finalement, le facteur de puissance  $s$ 'exprime comme suit :

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{h=1}^n V_h I_h \cos(\varphi_h)}{\sqrt{\sum_{h=1}^n V_h^2} \cdot \sqrt{\sum_{h=1}^n I_h^2}} \quad (I.11)$$

On constate que le facteur de puissance est dégradé par la présence des harmoniques. Dans le cas d'un système triphasé alimentant une charge non linéaire équilibrée (cas du redresseur à diodes), les fondamentaux des courants absorbés composent un système direct (c'est-à-dire de même séquence que les tensions du réseau), les harmoniques multiples de 3 composent un système homopolaire (ils sont en phase), l'harmonique 5 est un système inverse (la séquence des phases est inverse par rapport à celle du réseau), l'harmonique 7 un système direct,....etc. [2].

## I.6 Conséquences néfastes des harmoniques

Les courants et les tensions harmoniques ont des effets néfastes sur le fonctionnement, la rentabilité et la durée de vie des équipements électriques. Bien que les susceptibilités des différents équipements et appareils électriques, raccordés à un réseau pollué, soient très diversifiés, on distingue deux sortes d'effets possibles [1] :

- **les effets quasi-instantanés** : concernent certains types d'appareillage, tels que l'électronique de puissance, calculateurs, relais, systèmes de contrôle et régulation,...etc. La présence des harmoniques sur le réseau provoque le déplacement du passage par zéro et des modifications de la valeur crête de l'onde ;

- **les effets à terme** : se rapportent essentiellement aux machines tournantes, aux transformateurs et aux condensateurs, ce qui se manifeste par des échauffements supplémentaires et l'augmentation du niveau sonore. Il en découle la destruction de matériel ou plus fréquemment une diminution de leur durée de vie par surcharge thermique.

La liste suivante donne une idée de l'impact des harmoniques sur certains équipements à usage fréquent qui font partie intégrante du réseau électrique, tels que les :

- **alternateurs** : pertes supplémentaires dans les enroulements statoriques et dans les amortisseurs liées à l'augmentation de la valeur efficace du courant absorbé. Ces pertes provoquent un échauffement supplémentaire et réduisent également le rendement de ces machines.

- **câbles électriques** : pertes Joule supplémentaires, surtout dans les câbles de retour du neutre où circulent les courants harmoniques homopolaires et corrosion des câbles en aluminium sous l'effet de la circulation de courants harmoniques pairs associés à une composante continue. La présence des harmoniques dans le réseau diminue aussi la capacité de transport en puissance active des lignes.

- **transformateurs** : ils sont les constituants les plus directement affectés par les courants harmoniques. Ces derniers produisent des pertes additionnelles dans les enroulements. Ces pertes ne sont pas seulement dues à l'effet Joule pelliculaire, mais aussi à des courants induits dans les bobinages, le noyau et les pièces métalliques par les composantes à hautes fréquences des champs de fuite.

- **Moteurs à courant alternatif** : la déformation de la forme d'onde de la tension du réseau, due à l'interaction entre les courants harmoniques et l'impédance équivalente du réseau, influe sur le fonctionnement des machines électriques à courant alternatif en général et sur celui des moteurs asynchrones en particulier (pertes supplémentaires dans le fer et les enroulements et pulsation du couple).

- **condensateurs** : ils sont aussi très affectés par les courants harmoniques. Les condensateurs branchés en parallèle sur les réseaux pour la compensation de la puissance réactive (correction du facteur de puissance) ont des impédances d'autant plus faibles que la fréquence est élevée. Les courants harmoniques se superposent au courant fondamental et causent des pertes supplémentaires qui peuvent excéder la capacité thermique des

condensateurs et réduire considérablement leur durée de vie. De plus, des phénomènes de résonance peuvent subvenir et soumettre les condensateurs à des surtensions, lesquelles sont susceptibles de les dégrader, voire de perforer leur isolation.

➤ **équipements à base d'électronique de puissance** : dysfonctionnement lié à la déformation de la tension qui peut créer des faux passages par zéro (perte de synchronisation).

➤ **ordinateurs** : troubles fonctionnels liés à la distorsion de la tension du réseau ;

➤ **réseaux de télécommunication** : génération de bruits importants liés au couplage électromagnétique entre les lignes de puissance et les circuits de communication. Dans des cas particuliers, surtout lors de résonances, une partie des réseaux de télécommunication peut être rendue inutilisable [1].

## **I.7 Solutions possibles pour réduire les harmoniques et d'améliorer la qualité de l'énergie**

Afin de diminuer les perturbations en tension ou en courant, il est possible d'agir à deux niveaux :

1. du côté de la source en filtrant la tension du réseau ou en améliorant le réseau de transport et celui de distribution.

2. du côté du client en rendant le courant de ligne le plus sinusoïdal possible.

Plusieurs solutions ont été envisagées pour limiter la propagation des harmoniques et améliorer la qualité et la gestion de l'énergie électrique. Elles peuvent être classées en deux catégories, traditionnelles et modernes (à base de l'électronique de puissance) [3].

### **I.7.1 Solutions traditionnelles de dépollution**

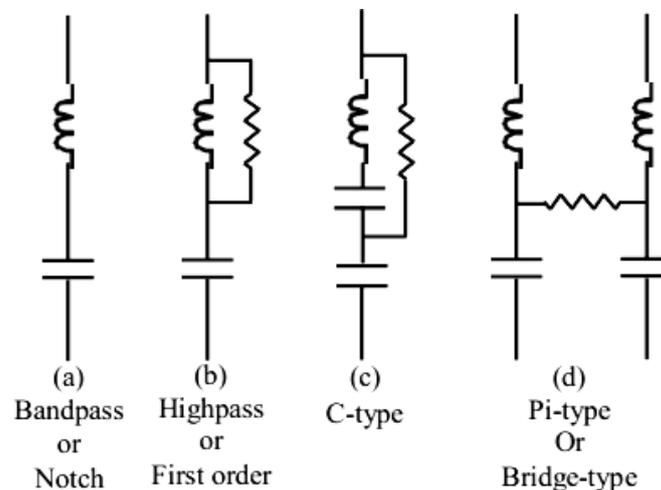
Les moyens de dépollution traditionnels sont nombreux et se résument dans les points suivants :

- inductance anti-harmonique de protection des condensateurs.
- inductance de lissage des courants.
- confinement des harmoniques.
- l'utilisation de transformateurs à couplage approprié permettant de limiter la circulation des courants harmoniques.
- augmentation de l'indice de modulation.
- filtres passifs utilisant des éléments réactifs en l'occurrence des inductances et des condensateurs.

Vue leur importance pratique, nous nous limiterons dans ce qui suit à détailler uniquement les filtres passifs [1].

### I.7.1.1 Filtrage passif

Il s'agit des premiers dispositifs utilisés pour l'élimination d'harmoniques. Ils sont composés par des éléments passifs comme des inductances, des capacités et des résistances. En général, les filtres d'harmoniques sont connectés en parallèle avec les charges injectant des courants harmoniques (les redresseurs à diodes ou à thyristors, fours à arcs électrique, etc.). L'association d'éléments capacitifs et inductifs en parallèle avec la charge polluante permet d'obtenir une résonance série accordée sur les rangs harmoniques à éliminer. Différents types possibles de filtres passifs destinés à compenser les courants harmoniques sont représentés sur la figure I.2 [2].



*Fig I.2 : Différents types de filtres harmoniques passifs.*

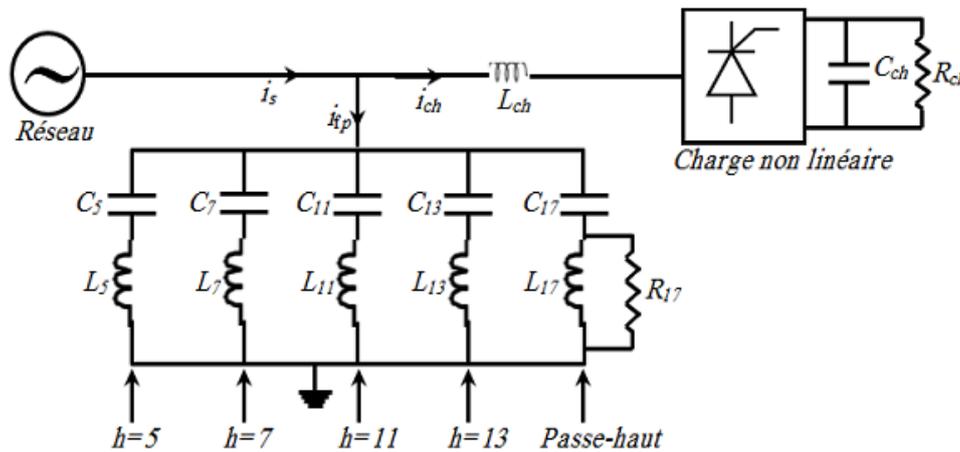
Le filtre harmonique passe-bande illustré sur la figure 1.2 (a) est le plus simple et est largement appliqué. Son avantage est l'impédance presque nulle à la fréquence d'accord, conduisant à un filtre presque parfait à cette fréquence. Un inconvénient est la possibilité d'occasionner une résonance avec l'impédance du réseau pour les fréquences en dessous de sa fréquence de coupure et en d'autres termes d'amplifier d'autres composantes harmoniques [2].

La figure I.2 (b) montre le filtre harmonique passe-haut qui peut être un compromis entre filtrer une fréquence bien ciblée et atténuer les harmoniques des fréquences supérieures. Ce filtre est généralement ajusté aux 7<sup>ème</sup> ou 11<sup>ème</sup> rangs harmoniques.

Le filtre harmonique de type C, illustré sur la figure I.2 (c), a des caractéristiques similaires au filtre harmonique passe-haut, avec l'avantage que la résistance ne consomme pas de puissance à la fréquence fondamentale du réseau. Il est souvent employé dans les applications de four à arc où il existe des inters harmoniques [2].

La figure I.2 (d) illustre le filtre harmonique de type Pi qui est essentiellement composé de deux filtres passe-bande avec une résistance connectée au point médian. L'intérêt principal de ce filtre est sa bonne caractéristique de filtrage aux deux fréquences de résonance.

Le choix le plus commun pour le redresseur à thyristors de haute puissance consiste à utiliser une combinaison de plusieurs filtres réglés sur une seule fréquence (sur les harmoniques 5, 7, 11 et 13) et un filtre passe-haut du deuxième ordre réglé autour de la fréquence de l'harmonique 17 comme illustré sur la figure I.3 [2].



**Fig I.3 :** Combinaison de filtres passifs pour redresseur à thyristors.

La fonction de transfert de cette combinaison de filtres est donnée ci-après :

$$G(s) = \frac{\frac{1}{L_5}s}{s^2 + \frac{1}{C_5L_5}} + \frac{\frac{1}{L_7}s}{s^2 + \frac{1}{C_7L_7}} + \frac{\frac{1}{L_{11}}s}{s^2 + \frac{1}{C_{11}L_{11}}} + \frac{\frac{1}{L_{13}}s}{s^2 + \frac{1}{C_{13}L_{13}}} + \frac{\frac{1}{R_{17}}s^2 + \frac{1}{L_{17}}s}{s^2 + \frac{1}{R_{17}C_{17}}s + \frac{1}{L_{17}}} \quad (\text{I.12})$$

Malgré l'efficacité, le pouvoir de corriger le facteur de puissance, la simplicité et le coût, cette configuration de filtres passifs pose tout de même certains problèmes :

- le dimensionnement dépend du spectre harmonique de la charge et de l'impédance de la source, cette dernière est d'ailleurs susceptible d'engendrer des résonances ;
- le filtre passif peut absorber les courants harmoniques d'autres charges non linéaires présentes sur le même réseau et entraîner dans cette hypothèse une surcharge ;
- toute modification du réseau (restructurations, nouveaux clients, ...), par changement de la fréquence d'accord, peut rendre le filtre passif inadapté et perturbateur (phénomène de résonance) ;
- les filtres passifs sont encombrants et présentent des risques de dérive de la fréquence au fur et à mesure que les composants vieillissent.

Cette solution est donc d'une efficacité moyenne, elle offre très peu de flexibilité et quasiment aucune évolutivité [2]. Pour toutes ces limitations une attention particulière a été portée aux solutions basées sur l'électronique de puissance.

### **I.7.2 Solutions modernes à base d'électronique de puissance**

Les progrès remarquables réalisés d'une part dans le domaine des composants semi-conducteurs, comme les *IGBT*, *IGCT*, *GTO* et *MOSFET*, ainsi que la maîtrise de leur mise en œuvre et d'autre part l'existence de nouvelles méthodes de traitement analogique et numérique du signal, ont permis l'émergence de moyens modernes et efficaces pour faire face aux différentes perturbations (harmoniques, puissance réactive, fluctuations, creux de tension) affectant les systèmes électriques [1]. Parmi ces moyens modernes, nous pouvons citer :

- les filtres actifs : parallèles, séries, hybrides et combinaisons des structures.
- les alimentations sans interruption.
- les dispositifs *FACTS*.
- les convertisseurs à prélèvement sinusoïdal.

#### **I.7.2.1 Filtres actifs**

Les principes de base des filtres actifs (compensation active) pour les harmoniques perturbateurs ont été proposés autour de la décennie de 1970. Depuis, beaucoup de recherches ont été développées sur ces systèmes et leurs applications pratiques [1].

Un filtre actif de puissance se compose d'un onduleur commandé par modulation de largeur d'impulsion (*MLI/PWM*), connecté au réseau par l'intermédiaire d'un filtre passif, et d'un bus continu. Ce convertisseur *PWM* constituant le filtre actif peut avoir deux structures différentes en fonction de l'élément de stockage du bus continu. Le convertisseur de type tension (onduleur de tension) ou *VSC* (Voltage Source Converter) utilise un condensateur pour stocker l'énergie au niveau du bus *DC* et imposer ainsi la nature source de tension à l'entrée de l'onduleur. Le condensateur peut être remplacé par une inductance, qui joue alors le rôle d'une source de courant continu. Dans ce cas, ce type de convertisseur prend la dénomination d'onduleur de courant [2].

La structure utilisant l'onduleur de tension est préférée pour les facilités qu'elle apporte en termes de circuits de commande et de fiabilité. En plus, cette structure reste relativement moins coûteuse, les pertes sont inférieures et elle peut être utilisée aisément dans des structures multi-niveaux ou multicellulaires. Cette topologie est assimilable à une source de courant au point de raccordement ; lorsqu'elle est connectée en parallèle elle élimine directement les perturbations en courants harmoniques en injectant sur le réseau des courants

en opposition de phase et de même amplitude par rapport aux perturbations existantes. En plus, ce type de filtre actif est en mesure de compenser non seulement la pollution harmonique en courant mais aussi la puissance réactive et les déséquilibres en tension et en courant.

Le filtre actif offre de nombreux avantages par rapport aux filtres passifs.

- il s'adapte automatiquement à l'évolution des charges et du réseau.
- il peut réaliser une compensation globale ou sélective des composantes harmoniques dans la limite de sa bande passante.
- il n'y a aucun risque de surcharge lorsque le niveau de pollution harmonique à compenser dépasse le dimensionnement du filtre actif. Le filtre fonctionne au maximum de ses capacités et tout risque de destruction est écarté.
- le risque de résonance entre filtre actif et impédance du réseau est atténué (contrairement au filtrage passif) ;
- la compensation simultanée de la pollution harmonique et de la puissance réactive ou des déséquilibres sont envisageables ;
- le volume physique du filtre est plus réduit.

Pourtant, ils possèdent aussi quelques inconvénients :

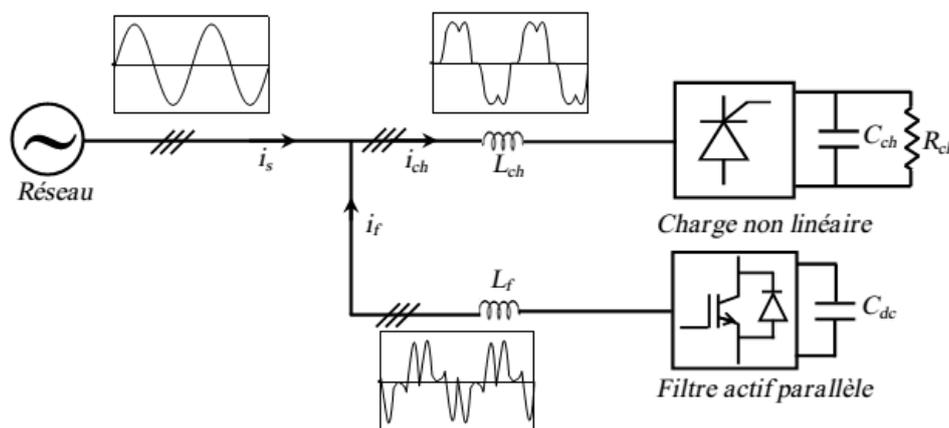
- leur coût élevé a limité leur implantation dans l'industrie.
- l'absence de réglementation spécifique n'incite pas leur intégration.
- les pertes sont légèrement plus élevées.

En fonction de leur mode de connexion au réseau, les filtres actifs sont dissociés en deux familles : les filtres actifs parallèle et série [1].

#### **I.7.2.1.1 Filtre actif parallèle-FAP**

Le filtre actif parallèle, appelé aussi compensateur shunt, présenté sur la figure I.4 permet, avec une commande appropriée, de neutraliser les courants harmoniques des charges polluantes et de compenser les déséquilibres et les courants réactifs.

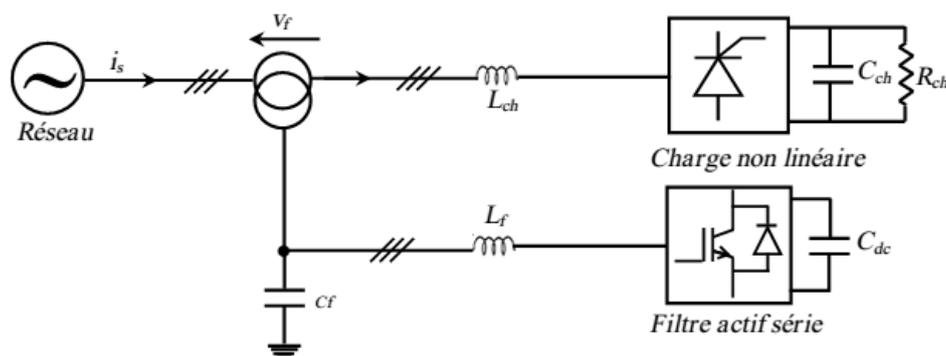
Généralement, une analyse préalable de la charge permet d'identifier les perturbations et de les compenser au niveau du réseau via le filtre actif parallèle. Le courant résultant côté réseau est de forme sinusoïdale, voire en phase avec la tension au point de raccordement dans le cas d'une compensation d'harmoniques et du fondamental réactif [3].



*Fig I.4 : Topologie du filtre actif parallèle de puissance.*

### I.7.2.1.2 Filtre actif série-FAS

Le filtre actif série se comporte comme une source de tension qui s'oppose aux tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmoniques) venant de la source et également à celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance de réseau. Il empêche les courants harmoniques consommés par la charge non linéaire de remonter vers la source. Dans ce cas, il se comporte comme une impédance élevée aux fréquences harmoniques et comme une impédance nulle à la fréquence fondamentale. Ainsi, la tension aux bornes de la charge à protéger est purement sinusoïdale. Les perturbations de tension dans le système sont atténuées en injectant la différence entre la tension désirée et la tension réelle comme le montre la figure I.5. L'élément de stockage de l'énergie d'un filtre actif série est conçu pour répondre aux exigences de compensation les plus sévères, notamment dans le cas de creux de tension de longue durée [1].



*Fig I.5 : Topologie du filtre actif série de puissance.*

### I.7.2.1.3 Filtres actifs hybrides

Les filtres actifs hybrides se scindent en deux grandes familles qui résultent de combinaisons soit de filtres actifs soit d'associations de filtres actifs et passifs. Dans le premier cas, c'est l'association des filtres actifs types, à savoir parallèle et série. Ainsi, l'objectif visé est le non pollution d'un réseau par une charge perturbatrice et simultanément

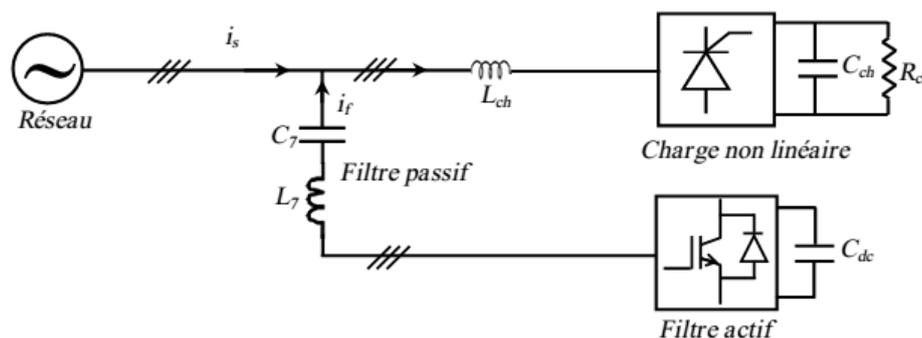
le bon fonctionnement d'une charge ou d'un réseau sensible dans un environnement pollué. Le traitement s'effectue donc à deux niveaux par rapport à un point considéré ; dépollution par un filtre actif parallèle en aval et par un filtre actif série en amont. La deuxième famille combine la mise en œuvre simultanée de filtres passifs accordés et actifs. Les filtres passifs éliminent généralement les harmoniques en basses fréquences et peuvent fournir aussi de l'énergie réactive, cette solution entraîne une réduction du dimensionnement du filtre actif qui n'est affecté qu'au traitement des autres perturbations. De plus, ces topologies améliorent l'efficacité des filtres passifs. Les combinaisons de ces structures hybrides sont nombreuses, nous pouvons citer les associations les plus usitées :

1-mise en parallèle d'un filtre actif shunt et d'un filtre passif connecté en dérivation avec la charge polluante.

2- filtre actif série avec un filtre passif en parallèle.

3- filtres passifs résonnants en série avec un filtre actif (Fig. I.5) qui constitue les configurations les plus récentes [1].

Pour le cas numéro 1, le plus souvent le filtre passif est formé par deux filtres réglés aux fréquences des harmoniques 5 et 7 et un filtre passe-haut accordé autour de la fréquence de l'harmonique 11. Le filtre actif permet dans ce cas d'éviter des résonances entre les éléments passifs et le réseau. Depuis 1990, de nombreux travaux de recherches ont été conduits sur les filtres actifs hybrides. La raison essentielle réside dans l'attractivité de ces associations par la réduction du coût du filtre actif mais aussi par la faisabilité pour des applications de fortes puissances [1].

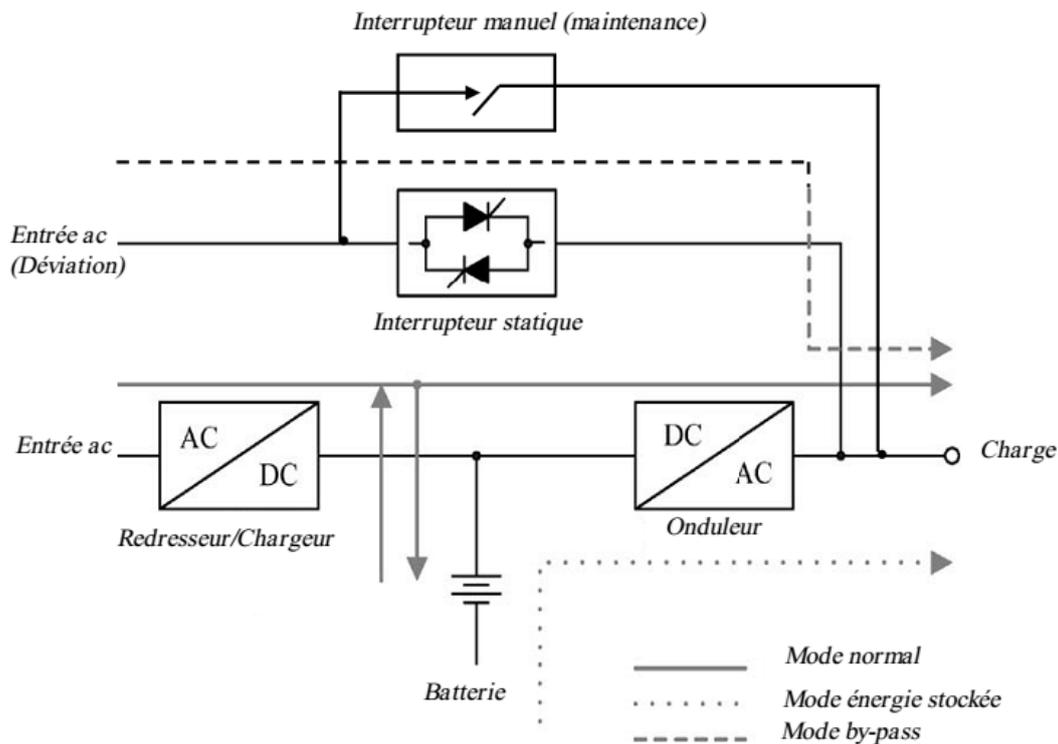


**Fig I.6 :** Topologie du filtre actif hybride.

### I.7.2.2 Les alimentations sans interruption (UPS)

Les alimentations sans interruption ont été développées au début des années 60 pour protéger les grands centres informatiques. Depuis, elles se sont généralisées et sont devenues des dispositifs à usage quasi systématiques. Une alimentation sans interruption ou de secours est destinée à faire face aux perturbations affectant la tension du réseau (creux, variations de fréquence, coupures). Son principe est de produire un système de tensions alternatives

purement sinusoïdales assurant la continuité de l'alimentation des charges critiques, dont la performance est en outre garantie par une batterie intégrée [1].



**Fig I.7 :** Topologie d'une alimentation sans interruption avec ses trois modes d'opération.

Une alimentation sans interruption est constituée principalement par deux convertisseurs :

1. un onduleur de tension destiné à produire un système de tensions alternatives de forme sinusoïdale pour suppléer le réseau si nécessaire.
2. un redresseur à diodes connecté au réseau alternatif pour alimenter le bus continu de l'onduleur et pour charger une batterie d'accumulateurs.

De nombreuses topologies et stratégies de commande ont été proposées dans la littérature concernant les alimentations sans interruption. La figure I.7 représente l'une de ces topologies ainsi que les différents modes d'opérations possibles.

### I.7.2.3 Les FACTS

Les systèmes de transmission en courant alternatif flexibles, terme traduit de l'anglais « Flexible Alternating Current Transmission Systems (*FACTS*) », peuvent contribuer à faire face aux problèmes rencontrés dans l'exploitation des réseaux électriques. Le concept *FACTS*, introduit en 1986 par l'Electric Power Research Institute (*EPRI*), regroupe l'ensemble des dispositifs basés sur l'électronique de puissance qui permettent d'améliorer l'exploitation d'un réseau électrique. Son développement est étroitement lié aux progrès réalisés dans le domaine des composants semi-conducteurs de puissance et plus particulièrement des éléments commandables tels que le thyristor et le thyristor *GTO*. Des

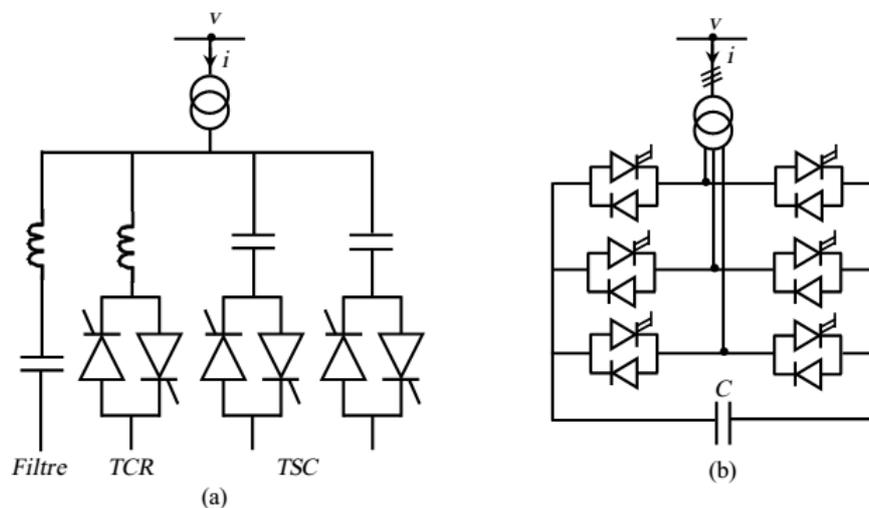
études et des réalisations pratiques ont mis en évidence l'énorme potentiel des dispositifs *FACTS*. Plusieurs types de *FACTS*, avec des architectures et des technologies différentes, ont été développés. Parmi eux, les plus connus sont le *SVC* (Static Var Compensator), le *STATCOM* (Static Synchronous Compensator), le *TCSC* (Thyristor Controlled Series Capacitor) et l'*UPFC* (Unified Power Flow Controller). Les figures I.7 et I.8 décrivent les schémas de principe de ces structures. Chacune d'elle possède ses propres caractéristiques et peut être utilisée pour répondre à des besoins bien précis [1].

Dans un réseau électrique, les *FACTS* permettent de remplir des fonctions tant en régimes stationnaires qu'en régimes transitoires. Ils agissent généralement en absorbant ou en fournissant de la puissance réactive, en contrôlant l'impédance des lignes ou en modifiant les angles des tensions. Les dispositifs *FACTS* sont utilisés principalement dans les contextes suivants [1] :

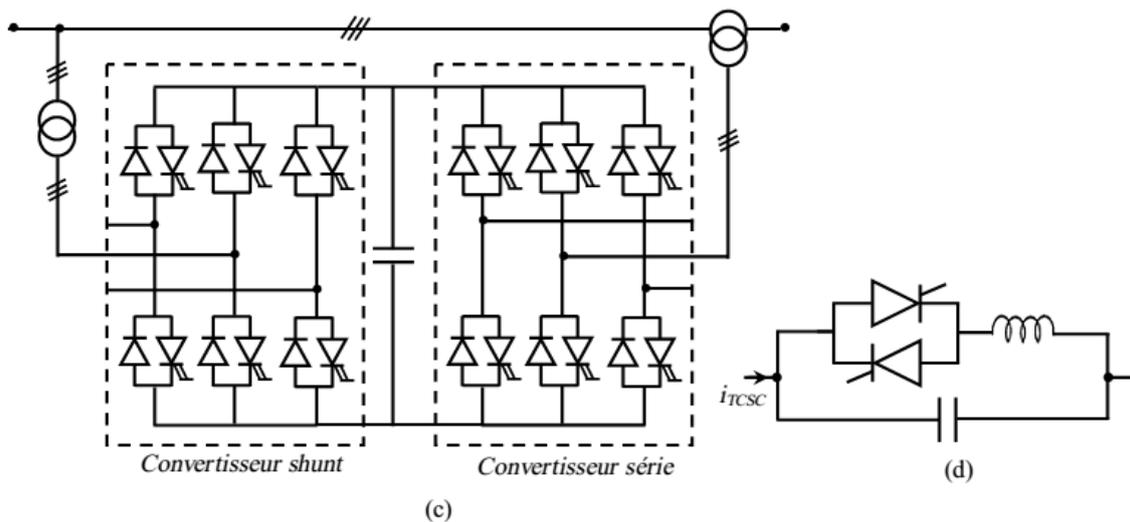
- limitation des variations de la tension à une valeur assignée en un point du réseau et ce quelles que soient les variations de la charge.
- augmentation de la réserve de stabilité transitoire.
- atténuation des oscillations de puissance.
- contrôle des transits de puissance sur les lignes et liaisons afin de réduire les surcharges.

Le mode de connexion au réseau est une caractéristique essentielle qui détermine en grande partie le mode d'action d'un dispositif *FACTS*. On distingue ainsi les classes suivantes :

1. les dispositifs *FACTS* shunt (parallèle).
2. les dispositifs *FACTS* série.
3. les dispositifs *FACTS* combinés série-parallèle.



**Fig I.8 :** Structure de dispositifs *FACTS* shunt : (a) *SVC*, (b) *STATCOM*.



**Fig 1.9 :** Structure de dispositifs FACTS série et combiné : (a) UPFC, (b) TCSC.

#### I.7.2.4 Prélèvement sinusoïdal

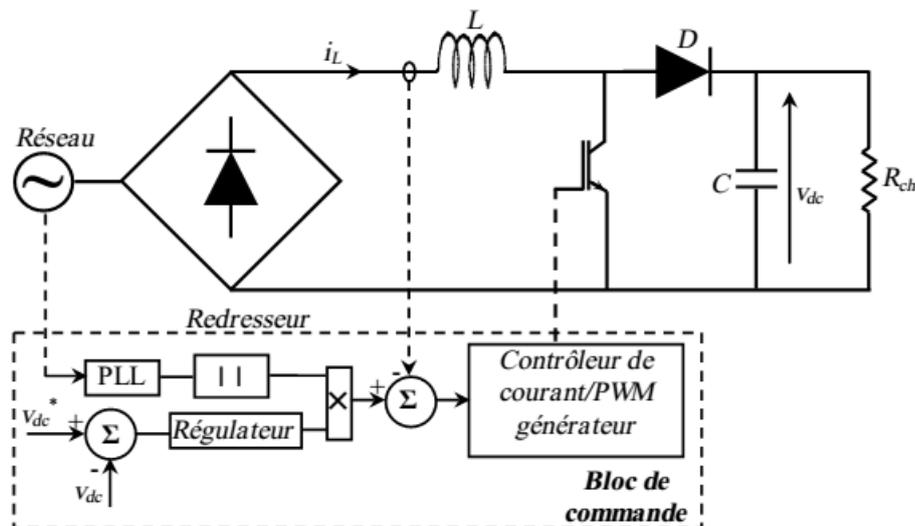
L'accroissement des équipements électriques utilisant des convertisseurs statiques de type redresseur a connu un essor important aussi bien sur le plan industriel que domestique. C'est ainsi que le réseau de distribution *BT* est le siège de perturbations importantes que le distributeur a du mal à enrayer. Sans précautions particulières ces convertisseurs sont polluants et absorbent des courants harmoniques qui ne sont pas sans effets sur l'onde de tension délivrée. Devant ce constat, il apparaît important de développer sur le plan industriel des dispositifs de filtrage actif au niveau curatif et une démarche préventive afin de concevoir des alimentations non polluantes, c'est-à-dire dotées d'une structure et d'un dispositif de commande rendant le courant prélevé le plus sinusoïdal possible [1].

Le prélèvement d'un courant sinusoïdal engendre une nouvelle structure de conversion *AC/DC*, différente de la version classique, où le courant peut être contrôlé. Dans ce contexte, trois structures ont été développées et présentées dans la littérature, dont deux structures incluent une inductance pour pouvoir contrôler le courant absorbé :

- la première utilise un hacheur élévateur de type *BOOST* en cascade avec un redresseur monophasé à diodes, reconnue par l'acronyme *PFC* (Power Factor Correction).
- la deuxième structure fait appel à un onduleur à MLI fonctionnant en redresseur, désigné sous le nom redresseur à modulation de largeur d'impulsion (*MLI*).
- la troisième structure est basée sur l'injection de courant dans le réseau. Elle est constituée d'un redresseur triphasé à diodes et de deux circuits auxiliaires, de modulation et de distribution.

### I.7.2.4.1 Correction du facteur de puissance (PFC)

La structure de base du convertisseur AC/DC avec correction du facteur de puissance ainsi que son principe de commande sont illustrés sur la figure I.10. Il s'agit d'un redresseur en pont à diodes connecté au réseau et doté d'un étage de correction placé entre la sortie du pont et la charge. Cet étage de correction du facteur de puissance basé sur une structure d'hacheur élévateur comprend une inductance, un interrupteur de puissance à double commande (*TB*, *IGBT*, *MOSFET*) et une diode de puissance. Cet ensemble est mis en parallèle avec le condensateur du bus continu. Le convertisseur AC/DC ainsi obtenu constitue une structure élévatrice et non réversible, mettant en jeu un seul interrupteur commandable.



**Fig I.10** : Structure et principe de commande d'un convertisseur AC/DC avec PFC.

Diverses stratégies de commande ayant toutes un objectif commun : la mise en forme des courants prélevés sur le réseau, ont été proposées pour cette structure. Le principe de prélèvement sinusoïdal consiste à forcer le courant circulant dans l'inductance à suivre une référence sinusoïdale redressée, en contrôlant la fermeture et l'ouverture de l'interrupteur commandé de puissance. L'amplitude de cette référence est fournie par la boucle d'asservissement de la tension du bus continu, tandis que la forme sinusoïdale est obtenue par l'intermédiaire d'une *PLL* synchronisée avec le réseau d'alimentation.

Cette solution garantit l'obtention d'un facteur de puissance unitaire pour le terme fondamental au niveau du réseau.

Il convient aussi de noter que cette structure est réalisée à partir d'un pont redresseur monophasé.

Dans le cas d'un réseau triphasé, un seul interrupteur doit contrôler les trois courants absorbés. Ceci rend la commande très complexe et beaucoup moins performante. Pour cette

configuration, on privilégie plutôt l'utilisation du redresseur à injection de courant ou redresseur à *MLI* [1].

#### I.7.2.4.2 Redresseurs à injection de courant

Les redresseurs triphasés à injection de courant sont apparus au début des années 1990, suite à des tentatives d'améliorer les performances des convertisseurs *AC/DC* déjà présents. Le schéma synoptique de cette structure est représenté sur la figure I.11. Un circuit de modulation crée, par le procédé de mise en forme des courants à la sortie du pont à diodes, un courant qui est injecté au réseau d'alimentation à l'aide d'un circuit de distribution. L'injection d'un tel courant permet de compenser les paliers à zéro des courants de ligne, inhérents au fonctionnement normal du pont à diodes. Plusieurs variantes de ce type de convertisseur existent actuellement ; elles se distinguent par la nature des circuits de modulation et de distribution qui peuvent être soit passifs, soit actifs [1].

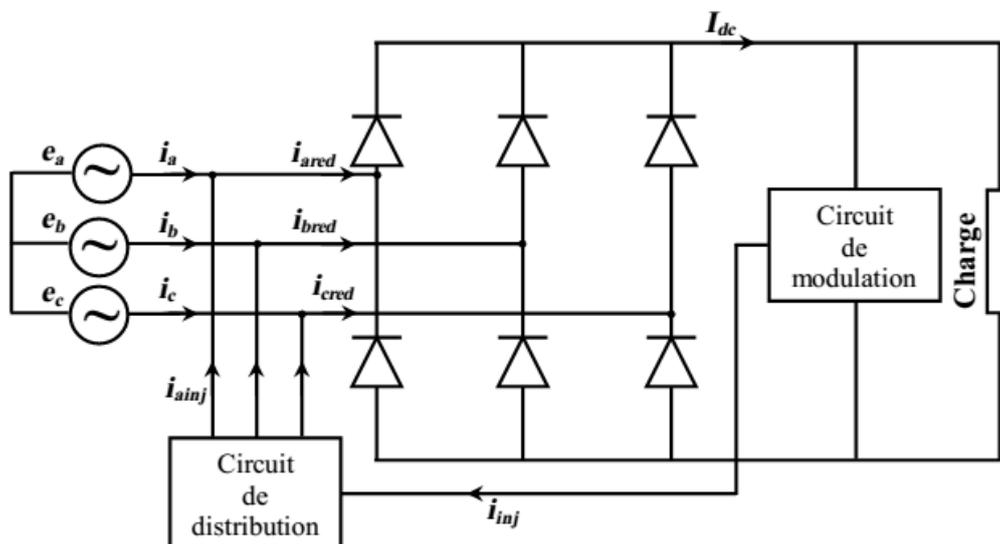


Fig I.11 : Schéma synoptique d'un redresseur triphasé à injection de courant.

#### I.7.2.4.3 Redresseurs à MLI

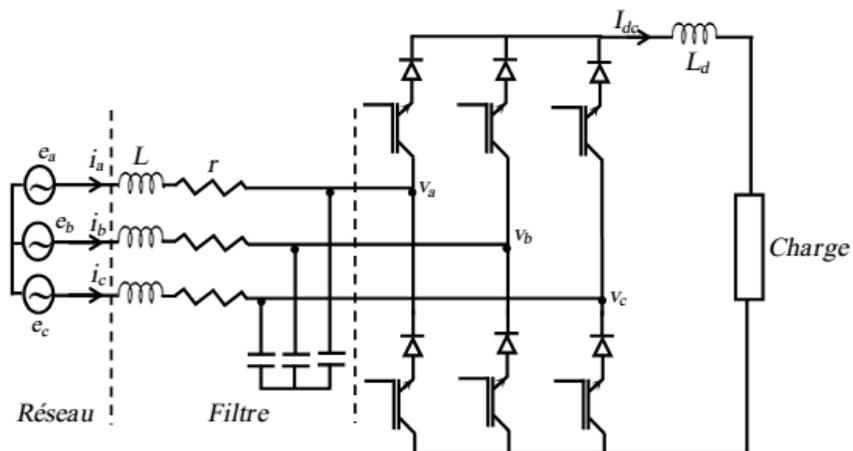
Les redresseurs à *MLI* sont des onduleurs exploitant leurs réversibilités en courant dans le deuxième mode de fonctionnement. Grâce à la commande *MLI*, ces convertisseurs peuvent prélever des courants sinusoïdaux sur le réseau alternatif et assurer aussi un facteur de puissance unitaire. Selon le type d'onduleur utilisé, nous distinguons deux structures de redresseurs à *MLI* :

- redresseur à *MLI* de courant ;
- redresseur à *MLI* de tension.

##### I.7.2.4.3.1 Redresseur à MLI de courant

La topologie du redresseur à *MLI* de courant est illustrée sur la figure I.12. Il assure la conversion d'énergie entre une source de tension alternative et un récepteur de courant

continu. Les interrupteurs sont unidirectionnels en courant mais bidirectionnels en tension. L'utilisation des techniques *MLI* conduit à un courant coté alternatif ayant une pollution harmonique contrôlée. Cette structure est souvent dotée d'un filtre de second ordre *LC* du côté alternatif [1].



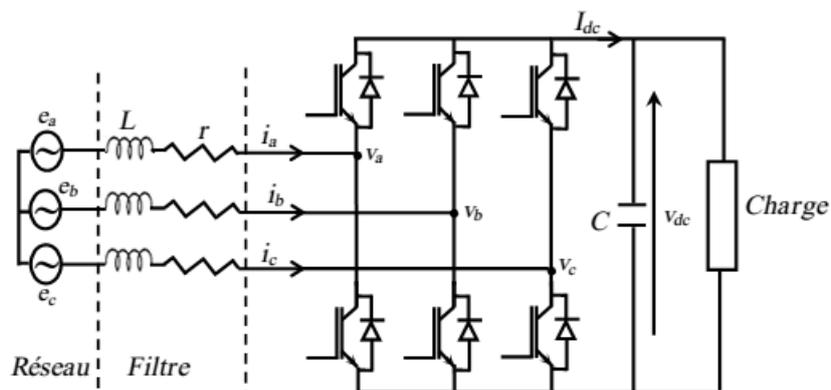
**Fig I.12 :** Topologie d'un redresseur à *MLI* triphasé de courant.

#### I.7.2.4.3.2 Redresseur à *MLI* de tension

Le redresseur à *MLI* de tension est basé sur une structure d'onduleur de tension représenté sur la figure

I.13. Chaque interrupteur est constitué d'un *IGBT* (composant commandé à l'amorçage et au blocage) et d'une diode en antiparallèle. Cet interrupteur est unidirectionnel en tension et bidirectionnel en courant.

Ainsi, ce convertisseur, de part sa structure, est réversible en courant. Il peut donc contrôler de façon instantanée la forme d'onde des courants prélevés sur le réseau. Il alimente alors une charge (active ou passive) en continu à partir d'un réseau alternatif, le courant absorbé étant sinusoïdal et, éventuellement, en phase avec la tension réseau correspondante. Ce redresseur à *MLI* permet d'atteindre un facteur de puissance très proche de l'unité et régler, via la commande, la direction du flux de l'énergie réactive : absorbée ou fournie [1].



**Fig I.13 :** Topologie d'un redresseur à *MLI* triphasé de tension.

Parmi les moyens de dépollution harmonique présentés précédemment, plus particulièrement les convertisseurs à prélèvement de courant sinusoïdal, on s'intéressera dans la suite de ce travail uniquement à la structure du redresseur à *MLI* de tension. Elle constitue donc notre topologie support pour développer et implanter des stratégies de commande permettant le prélèvement de courants sinusoïdaux sur le réseau alternatif et le fonctionnement avec un facteur de puissance unitaire [1].

## **I.8 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons exposé le problème des harmoniques et des perturbations affectant la tension du réseau et dégradant ainsi la qualité de l'énergie électrique. Après avoir recensé les origines et les conséquences néfastes des harmoniques sur les différents éléments constitutifs du réseau et sur les récepteurs raccordés à un réseau pollué, nous avons mis l'accent sur les harmoniques produits par les convertisseurs statiques. Ensuite, nous avons présenté les différents moyens, traditionnels et modernes, de réduction des harmoniques. Dans ce contexte, nous avons pu mettre en évidence la contribution de l'électronique de puissance dans la lutte contre les harmoniques et l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique.

---

# Chapitre II

Filtre actif parallèle et identification du courant de référence

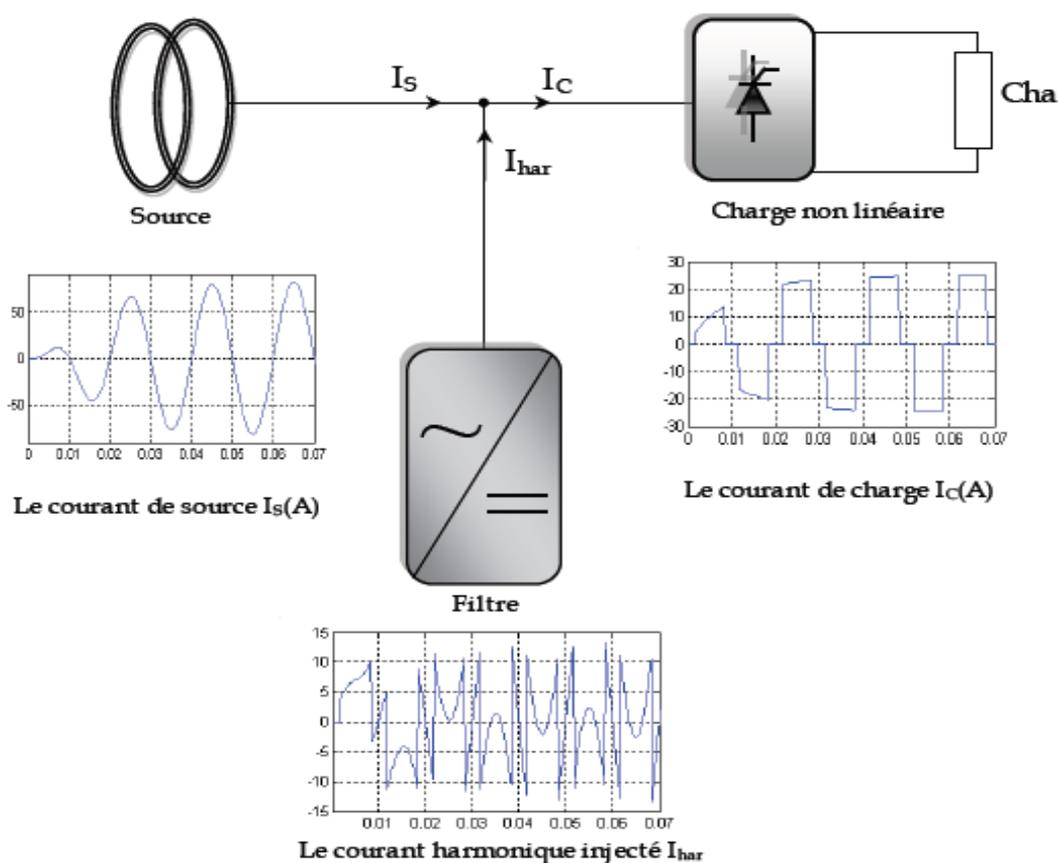
## II.1 Introduction :

Pour réduire les harmoniques au niveau de la source nous proposons dans ce travail le filtrage actif parallèle, vu ses avantages, tel que l'adaptation aux variations de la charge.

Le filtre actif est un onduleur de tension qui traite l'élimination des harmoniques. Il doit donc, absorber des courants éliminant les harmoniques créés par le pont redresseur. Cette structure à pour vocation d'éliminer de façon active tout ou une partie des harmoniques de courant l'utilisation des onduleurs pour filtrage actif, suppose l'emploi des fréquences de découpages très supérieures aux fréquences harmoniques que l'on veut éliminer.

## II.2 Principe du filtre actif parallèle:

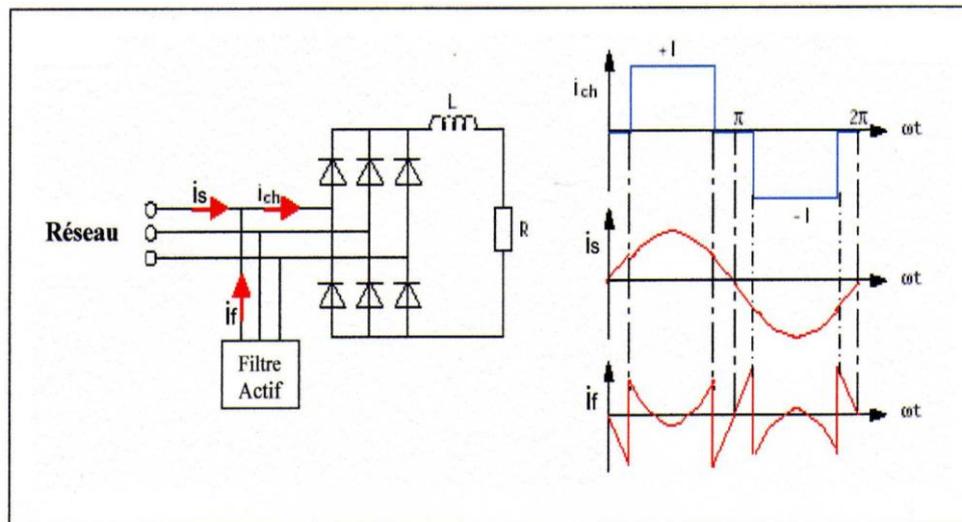
Le compensateur actif est connecté en parallèle avec le réseau, et injecte en permanence de courants qui correspondent à tout moment aux composantes harmoniques des courants absorbés par la charge. De cette manière, le courant fourni par la source d'énergie reste sinusoïdal [2].



*Fig II.1 : Principe du filtrage actif parallèle*

### • Exemple Formes d'ondes avec

Charge constituée d'un pont de diodes débitant sur un circuit RL.



*Fig II.2 : Exemple de formes d'ondes*

Alors que le courant absorbé par la charge polluante est non sinusoïdal, le courant fourni par le filtre actif est tel que le courant absorbé du réseau soit sinusoïdal [5].

## II.3 Structure d'un filtre actif parallèle

### II.3.1 Topologie générale

En général, le FAP est utilisé pour la dépollution des réseaux basse tension (BT) et moyenne tension (MT). Il est constitué de deux parties principales, la partie puissance et la partie contrôle-commande.

La partie puissance est constituée :

- d'un onduleur de tension à base d'interrupteurs de puissance, commandables 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.

La partie contrôle-commande quant à elle est constituée :

- de la méthode d'identification des courants perturbés,
- 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 [3].

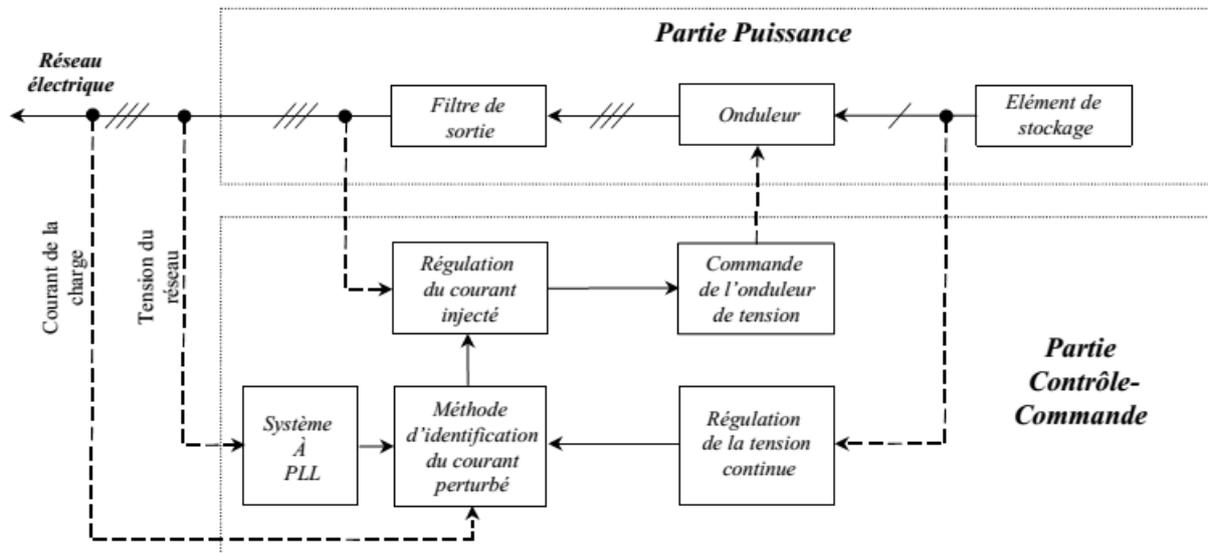


Fig II.3 : structure générale d'un filtre actif parallèle

## II.3.2 Etude de la partie puissance

### II.3.2.1 Onduleur de tension

#### II.3.2.1.1 Structure générale

La Fig. 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 ( $L_f$ ) employé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique.

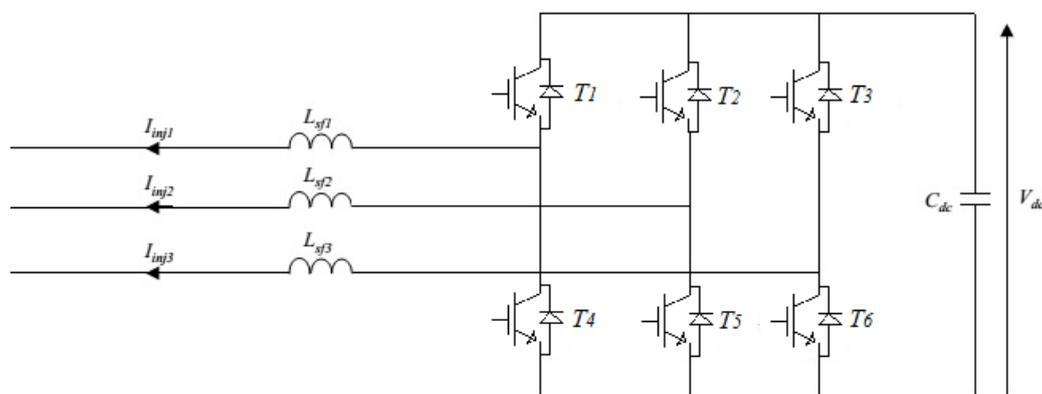


Fig II.4 : Onduleur de tension triphasé

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. 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 [3].

### II.3.2.1.2 Tension fournie par l'onduleur

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur de la Fig. II.4 dépendent de l'état des signaux de commande ( $S_1, S_2, S_3$ ), comme défini ci-dessous :

$$S_1 = \begin{cases} 1T_1 \text{ fermé et } T_4 \text{ ouvert} \\ 0T_1 \text{ ouvert et } T_4 \text{ fermé} \end{cases}$$

$$S_2 = \begin{cases} 1T_2 \text{ fermé et } T_5 \text{ ouvert} \\ 0T_2 \text{ ouvert et } T_5 \text{ fermé} \end{cases}$$

$$S_3 = \begin{cases} 1T_2 \text{ fermé et } T_5 \text{ ouvert} \\ 0T_2 \text{ ouvert et } T_5 \text{ fermé} \end{cases}$$

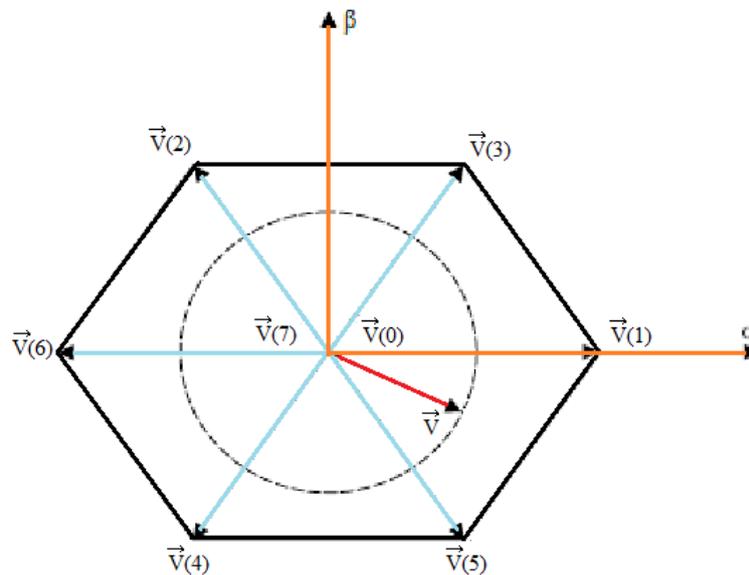
Ainsi, on pourra exprimer huit cas possibles de tension de sortie du filtre actif  $V_f$  (référéées au neutre  $n$  de la source), comme le montre le Tab. II.1.

### II.3.2.1.3 Représentation vectorielle

Dans le plan biphasé ( $\alpha, \beta$ ), en considérant  $\overrightarrow{V_f}$  le vecteur correspondant aux tensions de l'onduleur, les huit cas possibles du vecteur  $\overrightarrow{V_f}$  sont donnés par la Fig. II.4.

$N^{\circ}$ du cas	$S_3$	$S_2$	$S_1$	$V_{\beta}$	$V_{\alpha}$	$V_{\Omega}$
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$
2	0	1	0	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$
3	0	1	1	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$
4	1	0	0	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$
5	1	0	1	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$
6	1	1	0	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$
7	1	1	1	0	0	0

**Tab. II.1** : Tensions générées par l'onduleur



**Fig II.5** Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur

Où  $\vec{V}$  représente la tension de référence que doit produire l'onduleur pour pouvoir créer les courants perturbateurs identifiés. Ceci signifie que l'onduleur n'est capable de fournir des tensions égales aux tensions de référence que si le vecteur formé par ces derniers reste à l'intérieur de l'hexagone montré dans la Fig. II.4 [3].

#### II.3.2.1.4 Système de stockage d'énergie

L'utilisation des batteries de condensateurs est effective dans les petites et moyennes puissances. Dans le cas des grandes puissances on utilise des bobines supraconductrices [4].

Le choix de la tension  $V_{dc}$  et de la capacité de condensateur  $C_{dc}$  affecte la dynamique et la qualité de compensation du filtre actif parallèle. En effet, une tension  $V_{dc}$  élevée améliore la dynamique du filtre actif. De plus, les ondulations de la tension continue  $V_{dc}$  causées par les courants engendrés par le filtre actif et limitées par le choix de  $C_{dc}$ , peuvent dégrader la qualité de compensation du filtre actif parallèle. Ces fluctuations sont d'autant plus

importantes que l'amplitude du courant du filtre est grande et que sa fréquence est faible. Pour cette raison, nous pouvons estimer que seuls les premiers harmoniques sont pris en compte dans le choix des paramètres du système de stockage. Pour démontrer ceci, deux méthodes peuvent être utilisées [4] :

Le calcul de l'énergie fournie par le filtre actif pendant une demi-période de la pulsation de puissance liée aux deux premiers harmoniques (5 et 7 pour un pont redresseur de Graëtz), est la base de la première méthode. On choisit un taux d'ondulation  $\Delta V_{dc}$  acceptable, généralement de l'ordre de 2%  $V_{dc}$ . On peut calculer  $C_{dc}$  à partir de la relation suivante :

$$C_{dv} = \frac{V_s \cdot \sqrt{I_5^2 + I_7^2 - 2I_5 I_7 \cos(5\alpha - 7\alpha)}}{2\omega \cdot \Delta V_{dc} \omega_{dc}^2} \quad (\text{II.1})$$

Avec  $V_s$  : la tension simple du réseau.  $I_h$  : le courant harmonique du rang  $h$  et  $\alpha$  l'angle d'allumage des thyristors du pont de Graëtz, zéro dans le cas d'un redresseur à diodes. On choisit la tension  $V_{dc}$  comme la plus grande tension respectant les contraintes des interrupteurs la valeur minimale de la tension  $V_{dc}$  est deux fois plus grande que la max de tension simple du réseau pour assurer la contrôlabilité du courant du filtre de sortie en tous temps [4].

La deuxième méthode, plus simple, se base sur la mesure du courant harmonique  $I_h$  du rang le plus faible. La capacité  $V_{dc}$  se calcule de la façon suivante :

$$C_{dc} = \frac{I_h}{V_{dc} \Delta V_{dc} \omega_h} \quad (\text{II.2})$$

Avec :  $\omega_h$  , la pulsation la plus faible des harmoniques à compenser.

### II.3.2.1.5 Filtre de couplage

Le filtre de couplage est un filtre passif utilisé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique. Il est dimensionné pour satisfaire les deux critères suivant :

*Assurer la dynamique du courant :*

$$\frac{dI_f}{dt} = \frac{dI_h}{dt} \quad (\text{II.3})$$

Avec :  $I_h$  le courant harmonique de la charge

$I_f$  le courant du filtre actif

*Empêcher les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau électrique.*

Pour satisfaire ces deux conditions, on utilise un filtre de premier ordre, composé d'une inductance  $L_f$  avec une résistance interne  $R_f$ , une petite valeur de cette inductance assure la dynamique du courant. Contrairement, une valeur relativement grande de celle-là empêche les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau. En négligeant la résistance de ce filtre de couplage on obtient [3] :

$$\left( \frac{di_f}{dt} \right)_{max} = \frac{V_{f \max} - V_{s \max}}{L_f} \quad (\text{II.4})$$

Avec

$V_{f \max}$  : La valeur maximale de la tension à l'entrée de l'onduleur

$V_{s \max}$  : La valeur maximale de la tension simple au point de raccordement du filtre

Pour des petites variations du courant du filtre, on obtient :

$$\left( \frac{\Delta i_f}{\Delta T} \right)_{max} = \frac{V_{f \max} - V_{s \max}}{L_f} \quad (\text{II.5})$$

Avec  $\Delta T = \frac{1}{f_{ond}}$  : La période de variation du courant du filtre.

En supposant la variation maximale du courant du filtre égale à 25 % de la valeur maximale du courant du réseau, la valeur de l'inductance de couplage est donnée par [4] :

$$L_f = \frac{V_{f \max} - V_{s \max}}{0.25 I_{s \max} f_{ond}} \quad (\text{II.6})$$

### II.3.3 Étude de la partie commande-contrôle

#### II.3.3.1 Introduction à la stratégie de commande

La stratégie de commande se base sur la détection des courants perturbateurs dans le domaine temporel. Trois possibilités d'identification des courants perturbateurs ont déjà été proposées [3].

- 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 appropriée au filtre actif parallèle installé par le consommateur pour compenser les courants perturbateurs causés par ses charges polluantes. C'est pourquoi cette méthode de détection sera employée dans ce travail [3].

### **II.3.3.2 La méthode d'identification des courants perturbés**

#### **II.3.3.2.1 Généralités sur les méthodes d'identification**

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

La première utilise la transformée de Fourier rapide dans le domaine fréquentiel, pour extraire les harmoniques du courant. Cette méthode est bien adaptée aux charges où le contenu harmonique varie lentement. Elle donne aussi l'avantage de sélectionner les harmoniques individuellement. Il est à noter que cette méthode nécessite une grande puissance de calcul.

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

Récemment, des nouvelles méthodes d'identification ont été présentées pour donner le choix de compenser un, plusieurs ou voire même tous les types de courants perturbateurs. En effet, en se basant sur la régulation de la tension continue et sur celles du réseau électrique aux points de raccordement, nous pouvons compenser à la fois tous les courants perturbateurs, tout en offrant la possibilité de réguler la tension de la charge. Cette méthode, qui ne peut être implantée que numériquement, ne garantit pas une compensation parfaite de la puissance réactive, de même que la régulation de tension n'assure pas toujours une bonne qualité à la tension de la charge [5].

Enfin, la méthode d'identification la plus utilisée est celle appelée méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées. Cette méthode offre l'avantage de choisir la perturbation à compenser avec précision, rapidité et facilite d'implantation. Pour toutes ces raisons nous avons retenu cette méthode d'identification pour le reste de notre étude.

#### **II.3.3.2.2 Principe du fonctionnement de la méthode des puissances instantanées**

##### **II.3.3.2.2.1 Généralités sur les puissances instantanées**

Cette méthode est basée sur la mesure des variables instantanées triphasées présentes sur le réseau électrique avec ou sans composantes homopolaires. Cette méthode est valide aussi bien en régime permanent qu'en régime transitoire [6]

Les mesures des tensions et des courants exprimés sous forme triphasée ( $a-b-c$ ) sont converties en système biphasé ( $a-fi$ ) équivalent à l'aide de la transformée de Concordia qui

laisse la puissance invariante :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

Et la relation des courants ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s1} \\ I_{s2} \\ I_{s3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

En présence des harmoniques, la puissance apparente est composée de trois parties : active (P),réactive (Q) et déformante (D) comme le montre la relation suivante :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (\text{II.9})$$

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

$$p(t) = V_{s1}I_{s1} + V_{s2}I_{s2} + V_{s3}I_{s3} = p(t) + p_0(t) \quad (\text{II.10})$$

On peut écrire dans le repere stationnaire par :

$$p(t) = V_\alpha I_\alpha + V_\beta I_\beta \quad (\text{II.11})$$

De la même manière la puissance imaginaire instantanée peut s'écrire sous la forme suivante :

$$q(t) = -\frac{1}{\sqrt{3}} [(V_{s1} - V_{s2})I_{s3} + (V_{s2} - V_{s3})I_{s1} + (V_{s3} - V_{s1})I_{s2}] = V_\alpha I_\beta - V_\beta I_\alpha \quad (\text{II.12})$$

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.10)et (II.12), nous pouvons établir la relation matricielle suivante [3] :

$$\begin{bmatrix} P \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & V_{s\beta} \\ -V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

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 :

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

avec :

$\bar{p}$  une puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant et de la tension,

$\bar{q}$  une puissance continue liée à la composantefondamentale réactive du courant et de la tension,

$\tilde{p}$  et  $\tilde{q}$  des puissances alternatives liées à la somme des composantes perturbatrices du courant et de la tension.

En inversant la relation (II.13), nous pouvons recalculer les courants dans le repère  $\alpha\beta$  comme le montre l'équation :

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

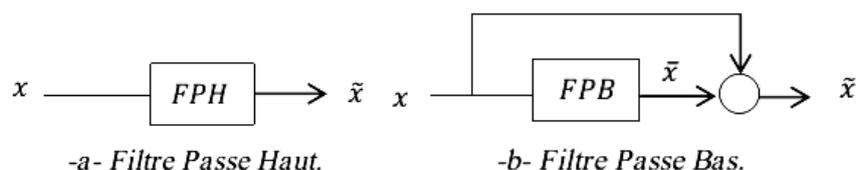
En considérant les équations (II.14) et (II.15), nous pouvons séparer le courant dans le repère en trois composantes, active et réactive à la fréquence fondamentale et les harmoniques. Ceci conduit à :

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ 0 \end{bmatrix}}_{\text{Courant actif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix}}_{\text{courant réactif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix}}_{\text{courant harmonique}} \quad (\text{II.16})$$

Avec  $\Delta = V_{s\alpha}^2 + V_{s\beta}^2$

Il est évident que pour pouvoir calculer les trois composantes du courant indépendamment les unes des autres, il faut tout d'abord pouvoir isoler les puissances active et réactive ( $\bar{p}, \bar{q}$ ) liées respectivement à la composante fondamentale du courant active et réactive[3].

Avec un filtre de puissance, pour isoler ces puissances, il faut connaître avec précision les fréquences de leurs pulsations, pour pouvoir dimensionner ce filtre qui peut remplir cette fonction. On peut utiliser un circuit constitué soit d'un filtre passe bas fig.II.6 (a) ou un filtre passe haut fig.II.6 (b) avec soustracteur comme le représente la figure II.6 :



**Fig II.6 :** Schéma du filtre de puissance utilisé pour l'extraction des composantes fondamentales ( $\bar{p}, \bar{q}$ )

Dans notre étude, nous avons choisi un filtre passe-bas du deuxième ordre en vue de simplifier l'approche d'implantation numérique de ce dernier. En effet, un ordre plus élevé entraînerait des temps de calcul plus longs ce qui peut être préjudiciable dans notre étude. La relation suivante donne l'expression générale d'un filtre passe-bas du deuxième ordre [3]:

$$\frac{\omega_c^2}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (\text{II.17})$$

La fréquence de coupure,  $f_c = \omega_c/2\pi$ , est choisie pour que le filtre de puissance puisse bloquer toute composante perturbatrice des puissances instantanées ( $\tilde{p}$ ,  $\tilde{q}$ ). Elle doit aussi permettre aussi le passage des composantes continues représentant les puissances active et réactive à la fréquence fondamentale ( $\bar{p}, \bar{q}$ ) [3].

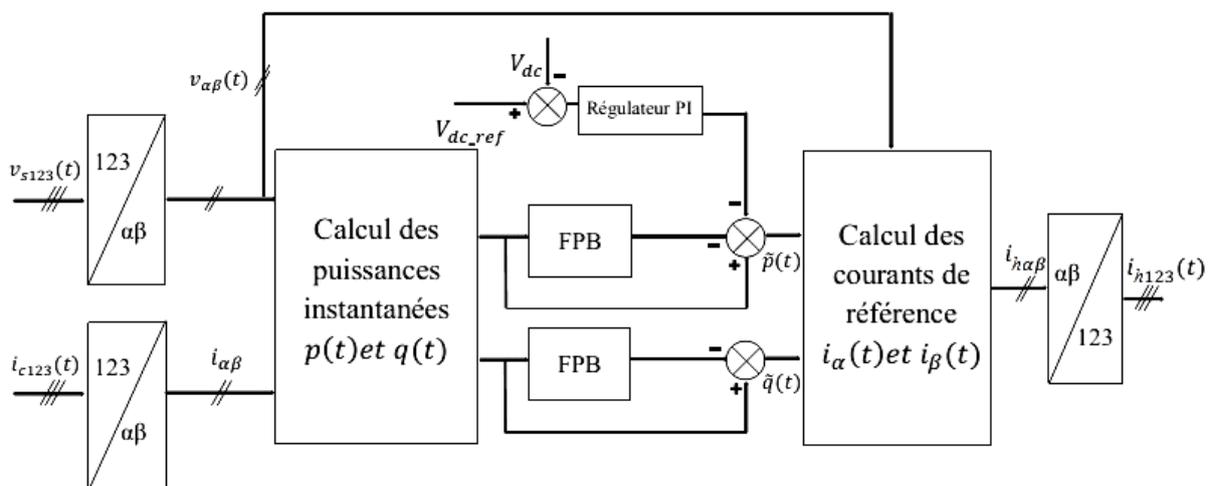
Une fois les valeurs  $\bar{p}$ ,  $\bar{q}$ ,  $\tilde{p}$  et  $\tilde{q}$  isolées, il devient aisé de calculer les courants réactifs et les courants harmoniques à partir de l'équation (III.12) ;

Donc le courant de référence harmonique est donné par [3] :

$$\begin{bmatrix} I_{h1} \\ I_{h2} \\ I_{h3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

### II.3.3.3 Algorithme d'identification

La méthode que nous avons explicitée si dessus, peut être résumée par le schéma suivant qui illustre les différentes étapes qui nous permettent d'obtenir valeurs des courants de références.



**Fig II.7 :** Algorithme de la méthode des puissances instantanées pour l'extraction des courants harmoniques

### II.3.4 Régulation de la tension continue

La source d'alimentation du filtre n'est pas une source de tension autonome mais une capacité qui se charge et se décharge. La tension aux bornes de cette dernière n'est pas constante, à cause de sa sensibilité aux échanges de puissance active entre la charge polluante et le réseau. Les pertes dans les composantes de puissance font aussi varier la tension aux bornes de la capacité, d'où la nécessité de réguler cette tension de la maintenir à un niveau constant.

Les principales causes susceptibles de modifier cette tension sont [7]:

- Les pertes dans le filtre actif.
- L'injection des courants fondamentaux pendant les régimes transitoires de la charge polluante.
- Les pertes de commutation et par conduction des interrupteurs de puissance.
- Les pertes par effet Joule dans les composantes passifs L et C.

Afin d'assurer le rôle de source de tension continue, une régulation de cette tension est nécessaire. Pour cela, nous pouvons utiliser un régulateur PI. Si nous négligeons les pertes au niveau de l'onduleur et dans le filtre de sortie, la relation entre la puissance absorbée par le condensateur et la tension à ses bornes peut s'écrire sous la forme suivante [7] :

$$p_{dc} = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} C_{dc} V_{dc}^2 \right) \quad (\text{II.19})$$

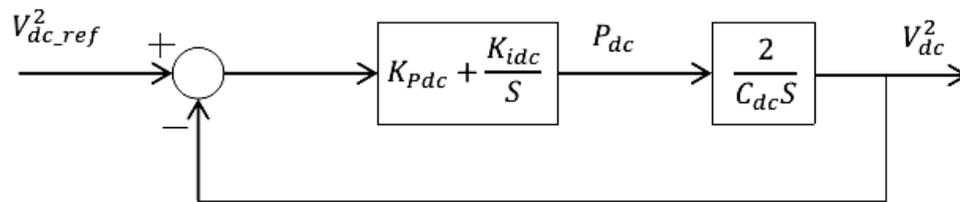
Appliquons la transformation de Laplace sur cette relation, nous obtenons :

$$p_{dc}(s) = \frac{1}{2} s C_{dc} V_{dc}^2(s) \quad (\text{II.20})$$

La tension aux bornes du condensateur est donnée par :

$$V_{dc}^2(s) = \frac{2p_{dc}(s)}{C_{dc}s} \quad (\text{II.21})$$

A partir de la relation (II.21), et en tenant compte du régulateur PI, la boucle de régulation de tension continue peut être représentée par la figure II.8. Le choix des paramètres  $K_{pdc}$  et  $K_{Idc}$  aura pour objectif d'obtenir un temps de réponse minimal afin de ne pas nuire la dynamique du filtre actif.



**Fig II.8 :** Boucle de régulation de la tension continue.

A partir de la figure II.8, la fonction de transfert représentant la régulation en boucle fermée de la tension continue est donnée par :

$$G_{bf} = \frac{\left(1 + \frac{K_{pdc}}{K_{idc}}s\right)}{s^2 + 2\frac{K_{pdc}}{C_{dc}}s + 2\frac{K_{idc}}{C_{dc}}} \quad (II.22)$$

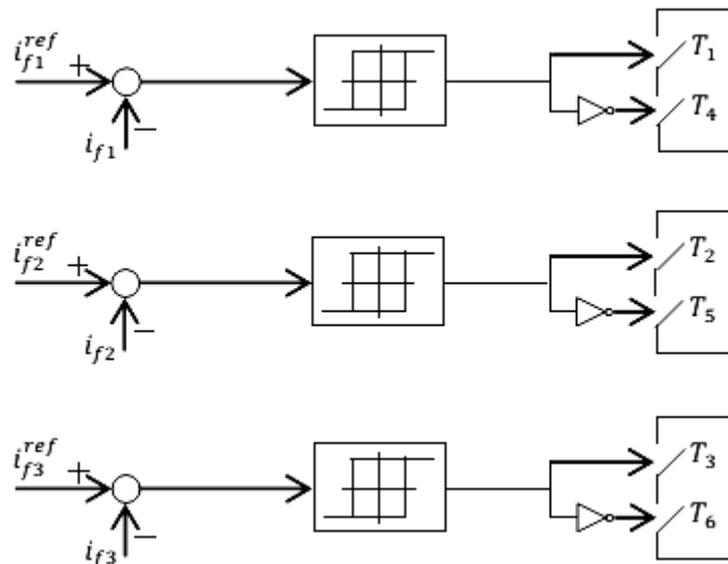
Comparant cette équation avec la forme générale d'une fonction de transfert de deuxième ordre, on trouve [7] :

$$K_{idc} = \frac{1}{2}C_{dc}\omega_c^2 \text{ tel que } \omega_c = 2\pi f_c$$

et  $K_{pdc} = \xi\sqrt{2C_{dc}K_{idc}}$  (II.23)

### II.3.4.1 Commande de l'onduleur

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.8 expose son principe qui consiste à établir dans un premier temps le signal d'erreur, différence entre le courant de référence et le courant produit par l'onduleur. Cette erreur est ensuite comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis afin de fixer les ordres de commande des interrupteurs. Cette commande présente cependant un inconvénient majeur : elle ne permet pas de contrôler la fréquence de commutation des semi-conducteurs, d'où la présence d'un nombre important d'harmoniques dans les courants générés [7].



**Fig II.9** Principe de la commande par hystérésis.

#### II.4 Conclusion :

Finalement, nous avons pu présenter et définir, dans la première partie de ce chapitre, la plupart des éléments constituant la structure générale du filtre actif parallèle. Cette structure a d'abord été partagée en deux parties, l'une dite partie puissance, et l'autre dite partie contrôle-commande. Nous avons exprimé les critères qui nous ont guidé dans le choix de chacun des éléments des parties concernées. Ainsi, nous avons pu fixer le choix des éléments de la partie contrôle-commande, tels que la méthode d'identification des courants perturbés, la commande de l'onduleur et la régulation de la tension continue, de même que ceux de la partie puissance, comme l'onduleur, l'élément de stockage et le filtre de sortie.

---

# Chapitre III

Simulation et résultats de simulation

### III.1 Introduction

Un système d'électronique de puissance est un ensemble de conversion d'énergie qui contient les organes suivants :

- Source d'énergie.
- Convertisseur statique.
- Charge réceptrice.
- Dispositif de commande du convertisseur.

Dans ce chapitre nous avons utilisé le simulink comme outil de simulation, le schéma de simulation qui représente, la charge non linéaire, l'onduleur, et bloc d'identification de courant harmonique.

### III.2 Schéma synoptique de l'association filtre actif-réseau-charge polluante

La figure (III.1) donne le schéma synoptique de l'association filtre actif-réseau-charge polluante.

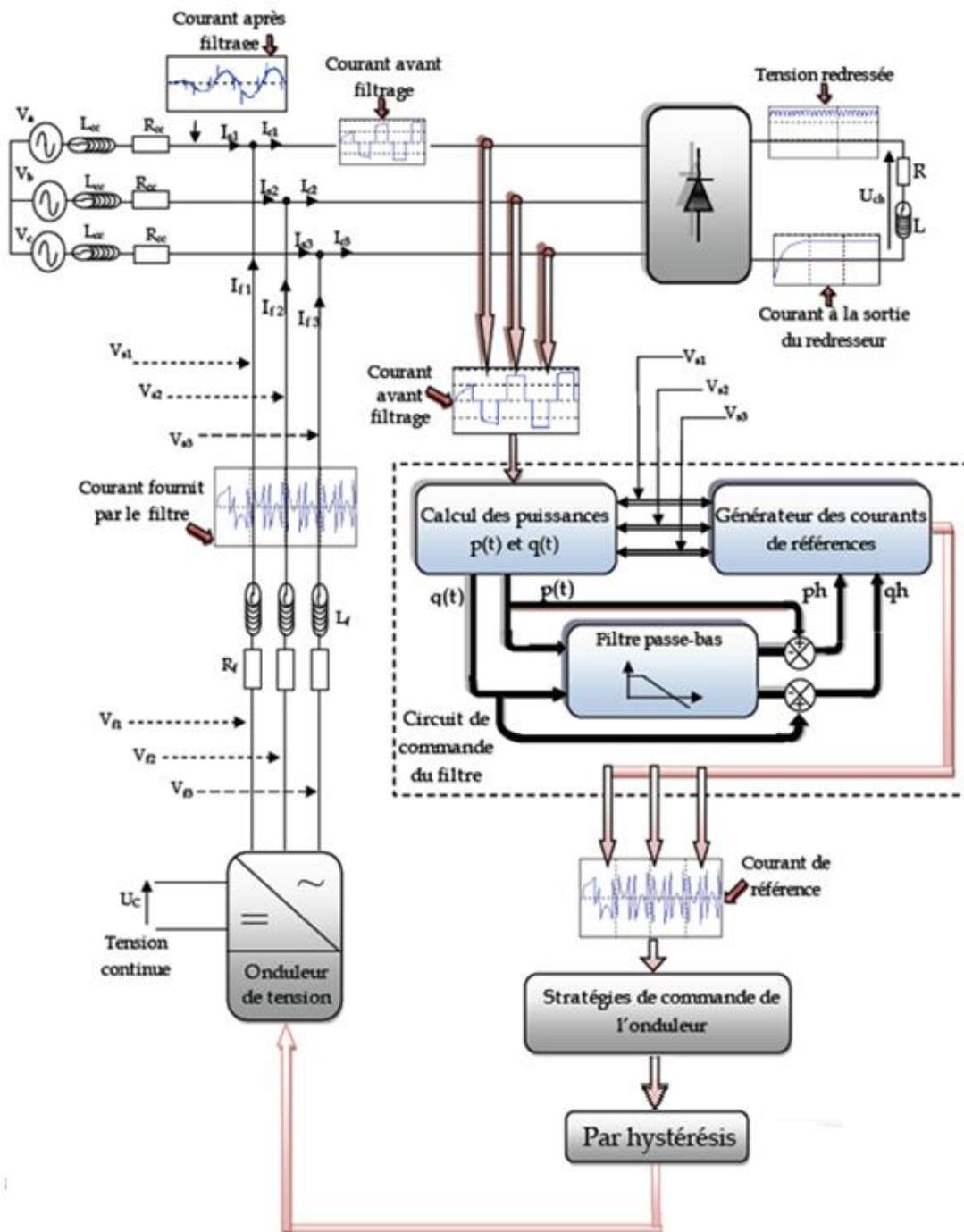
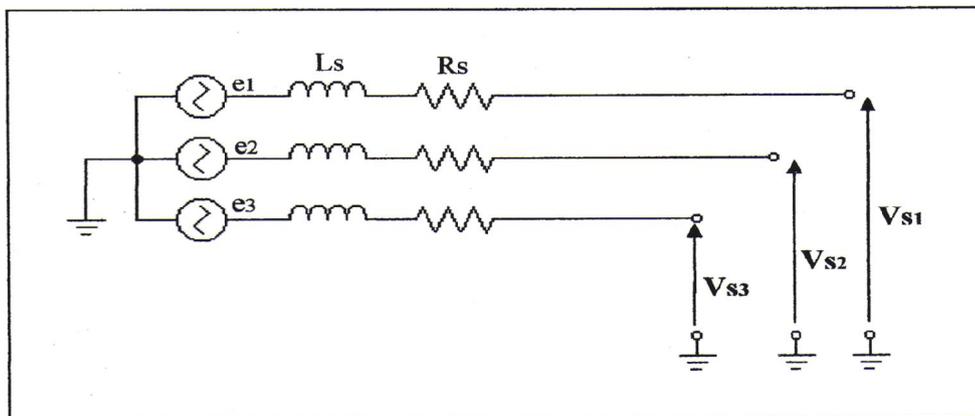


Fig III.1 : Schéma synoptique de l'association filtre actif-réseau-charge polluante.

### III.3 modélisation de l'association réseau- filtre actif- charge polluante :

La modélisation d'un système revient à trouver les équations mathématiques qui décrivent son fonctionnement [5].

#### III.3.1 Modélisation du réseau:



*Fig III.2: Schéma synoptique d'un réseau triphasé.*

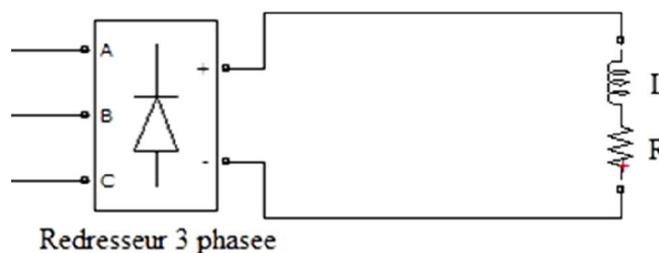
Le réseau est assimilable à une source de tension sinusoïdale en série avec une impédance, dite de court circuit, d'où la représentation du réseau par un système de F.E.M triphasées équilibrées en série avec une impédance (figure III.2) [4].

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \sqrt{2} \cdot E \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ \sin(\omega t - 4\pi/3) \end{bmatrix} \quad (\text{III.1})$$

$$Z_s = R_s + jL_s\omega \quad (\text{III.2})$$

#### III.3.2 Modélisation de la charge polluante (Redresseur triphasé)

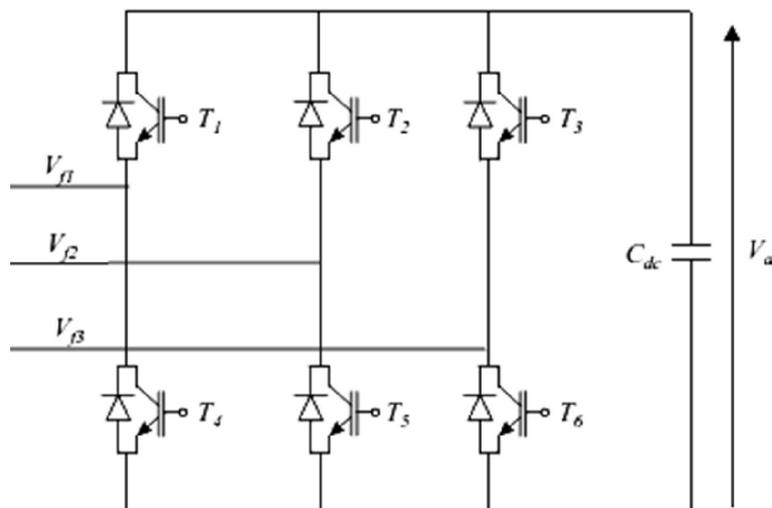
Pour tester le filtre actif on a opté pour une charge polluante qui est un pont redresseur triphasé, représenté sur la figure(III.3).



*Fig III.3 : charge polluante*

### III.3.3 Modelisation du filtre actif (ou de l'onduleur)

On peut réaliser un onduleur de tension triphasé en groupant trois demi ponts monophasés la fig(III.4) représente un onduleur triphasé de tension. Il se compose de trois bras à interrupteurs réversible en courant, commandé à la fermeture et à l'ouverture, réalisé à partir d'un (GTO ou IGBT) et une diode en anti-parallèle.



**Fig III.4 :** Présentations d'un onduleur triphasé

### III.4 Paramètres de la simulation

Les paramètres du système simulé sont indiqués sur les tableaux(tab III) et (tab III.2).

*Côté réseau et la charge*

Vs(V)	F(Hz)	Rs( $\Omega$ )	Ls(mH)	Rl( $\Omega$ )	Ll(mH)	Rc( $\Omega$ )	Lc(mH)
220	50	0.42	2.3	0.001	1	30	90

**Tab III.1 :** paramètres des éléments du réseau

*Côté filtre*

Lf(mH)	C( $\mu$ F)	V <sub>dc</sub> (V)
3	5500	800

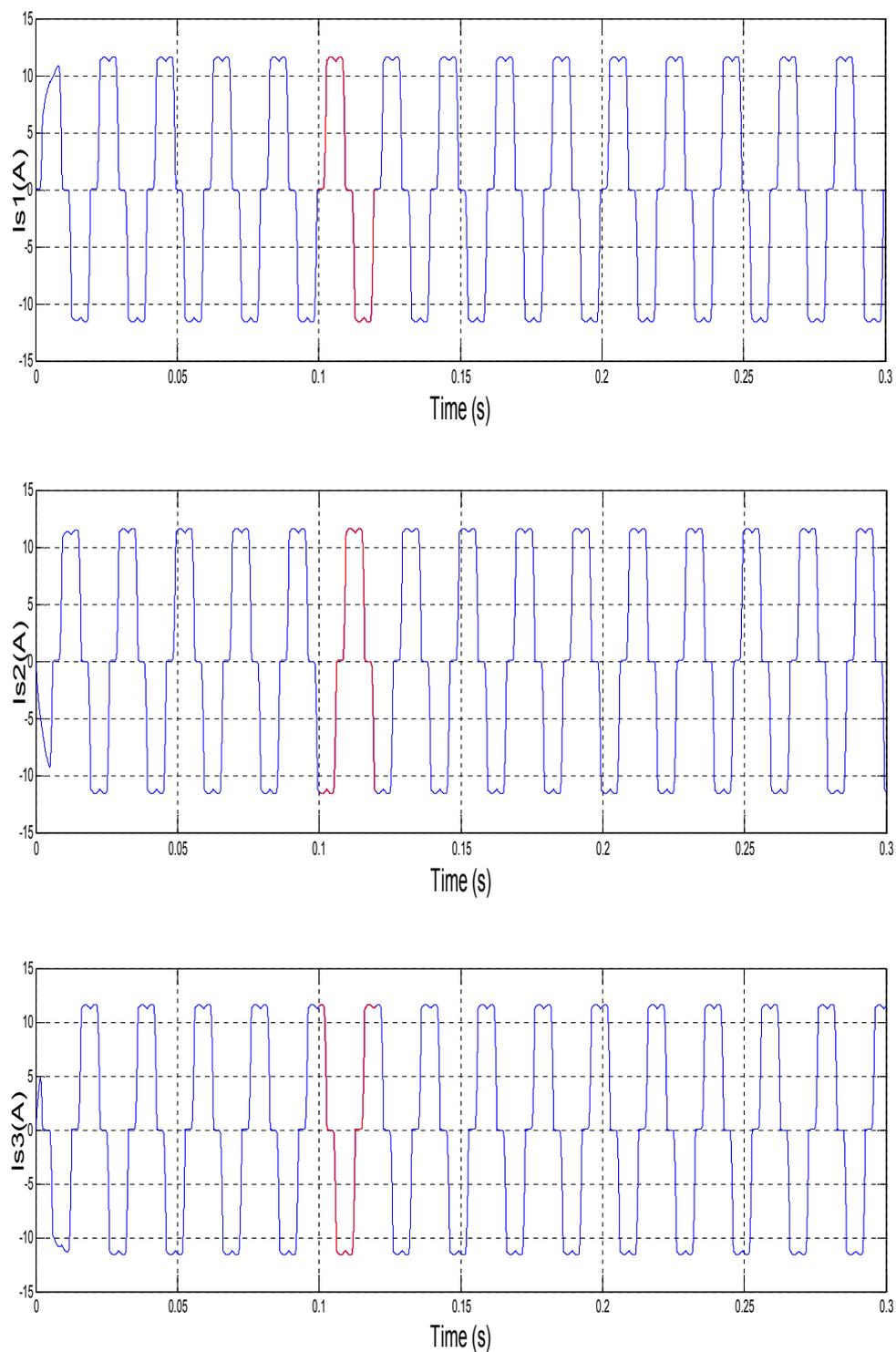
**Tab III.2 :** paramètres des éléments du filtre

Pour le régulateur PI de tension :  $k_{pac} = 0.09$ ,  $k_{idc} = 0.6$

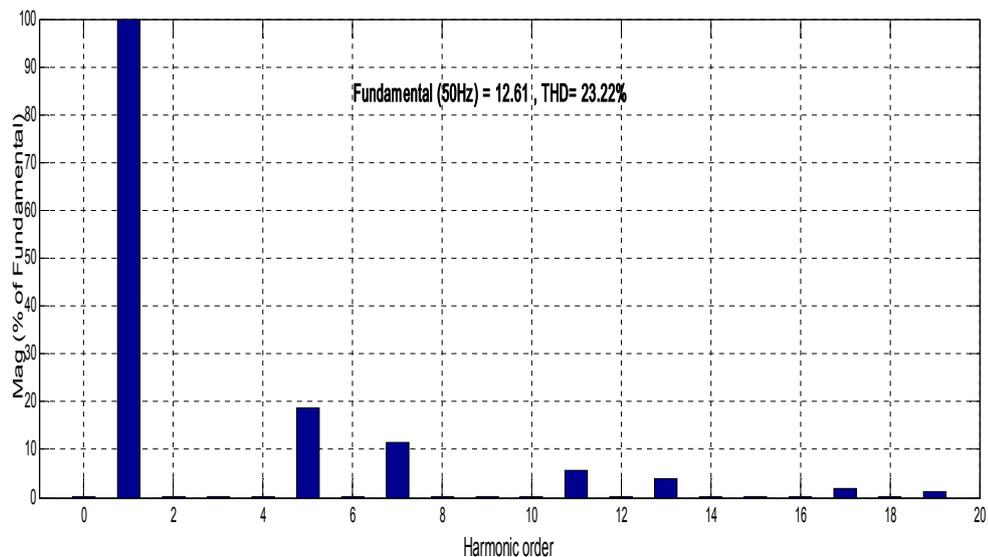
Et pour la largeur de la bande d'hystérésis :  $\Delta I = \pm 20 \text{ mA}$

### III.5 Résultat de Simulation

#### III.5.1 avant le filtrage



*Fig III.5 Courants des trois phases du réseau électrique avant l'injection du filtre*

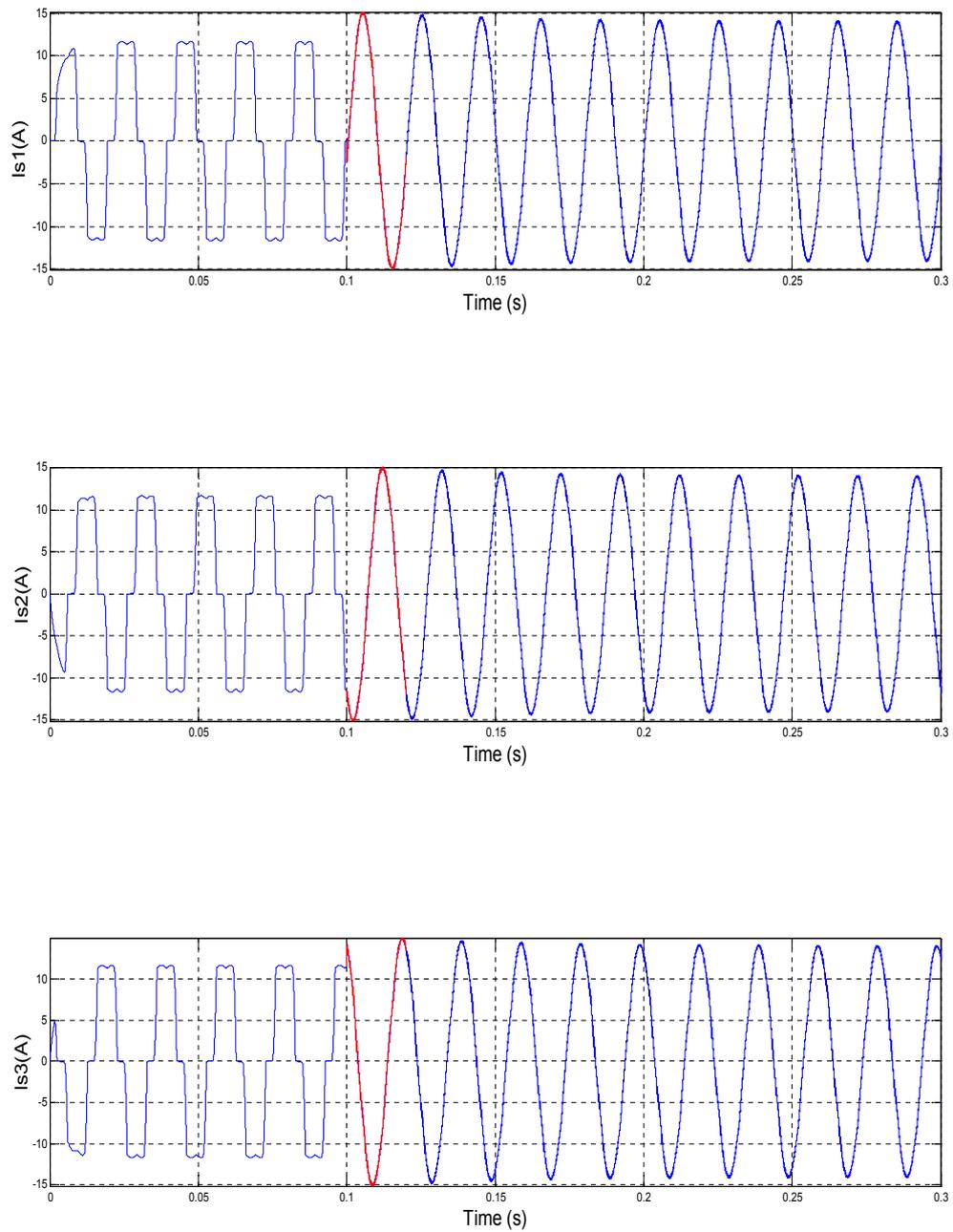


*Fig III.6 : Spectre de la courante source avant filtre.*

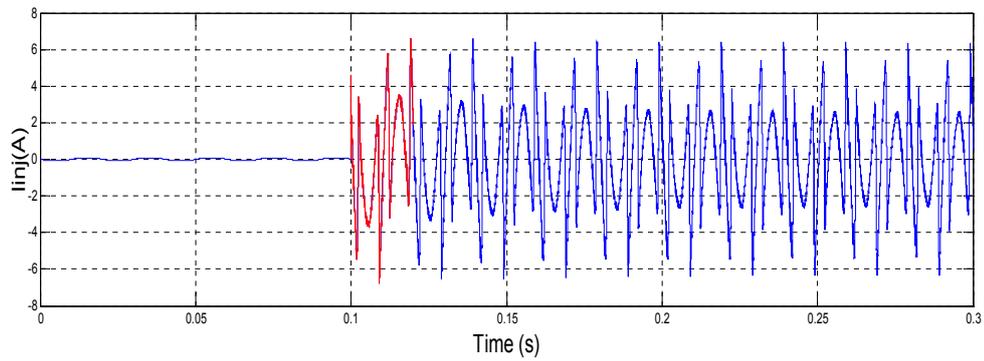
La figure (III.8) représente les courants de source ( $I_{s1}$ ,  $I_{s2}$ ,  $I_{s3}$ ) avant le filtrage

La figure (III.9) représente le taux de distorsion avant le filtrage

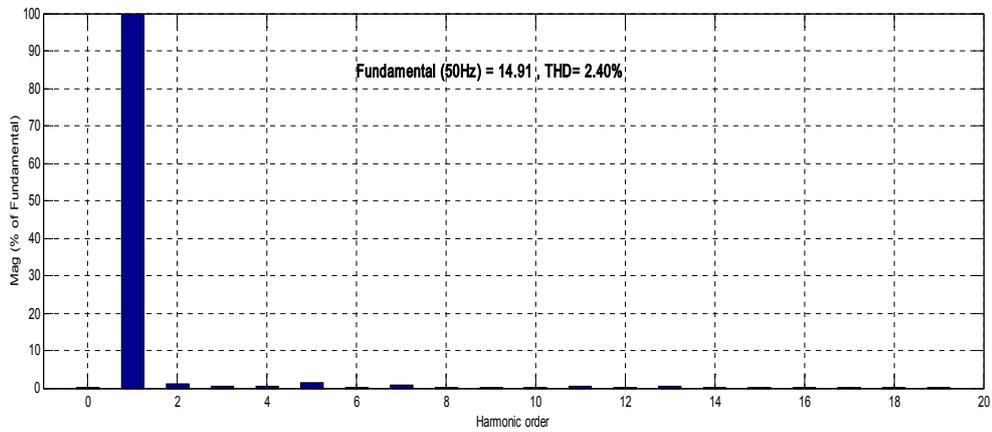
Le taux de distorsion d'harmonique a été mesurée sur 1 période (colorés en rouge dans les courbes de courant) , nous remarquons le THD=23.22 %.

**III.5.2 après le filtrage**

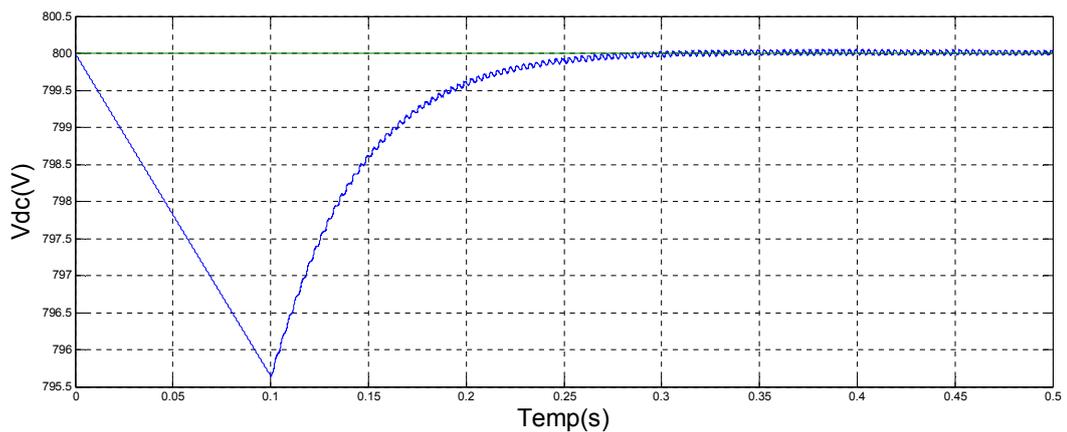
**Fig III.7** Courants des trois phases du réseau électrique après l'injection du filtre



*Fig III.8 Le courant injecté par le filtre*



*Fig III.9 : Spectre de la courante source après filtre.*



*Fig III.10 La tension de la capacité*

Les figures (III.7) montrent : avant d'injecter les courants d'harmoniques dans le réseau la forme des courants de source est la même de la charge au  $t=0.1s$ , après l'injection de filtre  $t=0.1s$  les courants de la source sont sinusoïdales.

Les figures (III.8) sont présentées les courants de filtre et l'injection des courants harmoniques à  $t=0.1s$ .

La figure (III.10) montre la tension de la capacité

La figure (III.09) représente le taux de distorsion après le filtrage

Le taux de distorsion d'harmonique a été mesurée sur 1 période (colorés en rouge dans les courbes de courant) , nous remarquons le THD=2.40 %.

### **III.6 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons commencé par la présentation de la simulation de l'ensemble constitué d'un réseau, d'une charge polluante (redresseur triphasé) et FAP. Finalement nous concluons d'après les résultats obtenus que le filtre actif parallèle réduise d'une manière efficace les harmoniques dans le réseau électrique triphasé.

## Conclusion générale

Ce travail présenté dans ce mémoire consiste à l'étude de simulation d'une solution de la dépollution des réseaux électriques. Ces pollutions sont principalement causées par des charges non linéaires, ces charges non linéaires à base de convertisseurs de puissances offrent de l'énergie sous plusieurs formes et sont de plus en plus utilisées dans l'industrie.

Le premier chapitre a été consacré à la problématique des perturbations ou distorsions harmoniques générées par les charges non linéaires connectées aux réseaux électriques. L'augmentation régulière du nombre de dispositifs d'électronique de puissance utilisés dans les systèmes électriques ne fait qu'accentuer ces perturbations. En outre, les origines et les effets néfastes de ces perturbations ont été abordés et les normes en vigueur ont été présentées. Ces normes, notamment imposées aux distributeurs d'énergie, autorisent cependant la génération d'harmoniques dans certaines limites. En outre, le respect de ces normes motive l'étude et le développement de méthodes efficaces pour dépolluer les réseaux électriques, comme par exemple les dispositifs de filtrage actif, objets de ce manuscrit. Nous avons alors présenté, de manière générale, les solutions traditionnelles et modernes utilisées en filtrage

D'après l'analyse des perturbations harmoniques et leurs effets sur le réseau électrique, dans le deuxième chapitre on a présenté topologie de filtre actif parallèle est étudié dans ce projet et étude théorique de la structure de FAP a trois fils et les deux parties principales (partie de puissance et la partie de commande-contrôle).

Avec ce filtre, le THD des courants de source est réduit, pour un point de fonctionnement considéré comme étant typique, de 23.22% à 2.40 % avec la commande hystérésis. Comme perspectives, et pour minimiser les oscillations, a la place de régulateur PI, il y a autres types de régulateurs, tel que les régulateurs adaptatifs et les régulateurs intelligents (neurones - floue - algorithmes génétiques - ANFIS), ces derniers vont permettre d'améliorer la régulation de la tension continue que ce soit en régime transitoire ou en régime permanent.

## **Bibliographie**

[1] : Mohamad Alaa Eddin Alali, Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension, Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur –Strasbourg I, soutenance le 12/12/2002.

[2] : Mohamed Muftah ABDUSALAM, Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales, Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, soutenance le 29/05/2008.

[3] : KESSAL ABDELHALIM, Correction du Facteur de Puissance a L'entrée d'un Convertisseur AC/DC, Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas Sétif, soutenance le 26/04/2012.

[4] : M. Fatiha, Etude et Commande d'un Filtre Actif Parallèle à Structure de Tension, Mémoire de Magister, Université Oran, soutenance Octobre 2001.

[5] : Zellouma Laid, Filtrage actif parallèle des harmonique du courant généré par un redresseur triphasé non commandé, mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de Magister, Université Badji Mokhtar Annaba 2006 2007.

[6] : Steeve Beaulieu, Etude et Mise au Point d'un Filtre Actif d'Harmoniques en Vue d'Améliorer la Qualité de l'Alimentation Electrique, Mémoire de Fin d'Etudes, Univ. Québec à Chicoutimi, Mai 2007.

[7] : MAHNI Tidjani, Stratégies de Commande d'un Filtre Actif Parallèle à Quatre Fils, Présenté en vue de l'obtention du titre de Magistère en Électrotechnique, Centre Universitaire D'EL-OUED, soutenance 2012.