

## **Remerciements**

*Nous tenons à remercier au premier lieu notre dieu.*

*Un remerciement spécial a notre encadreuse madame GUERGAIH Manel qui nous a aidés, orienté et mise à notre disposition toute sa documentation.*

*Nous remercions également tous les enseignants du département d'électronique.*

*Nous remercions toute personne avons participé de près ou de loin à la réussite de ce travail.*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mes chers parents.*

*Mes chers frères, et sœurs.*

*Toute ma famille de près ou de loin.*

*Mes chers amis sans exception.*

*Toute la promo 2016 (Master Electrotechnique) sans exception  
surtout mes chers amis.*

*Toute la promo 2017 (Master Electrotechnique) sans exception  
et surtout mes meilleurs amis.*

*Mes amis de la cité universitaire somaa 03.*

*Mon binôme.*

*DECHIR Aïssa*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce travail modeste à :*

*Mes chers parents*

*Tous mes frères et sœurs, et à toute ma famille.*

*Tous mes amis et collègues.*

*Tous les étudiants de la promotion 2016 Option :  
machines électriques.*

*Tous les étudiants de la promotion 2017 Option :  
machines électriques.*

*Tous ceux qui, par un mot, m'ont donné la force de  
continuer.*

*HAMMOUDI Abdelmalek*

## Liste des Abréviations

**$Y_0$**  : valeur de la composante continue

**$Y_1$**  : valeur efficace du fondamental.

**$Y_n$**  : valeur efficace de l'harmonique de rang n.

**$\omega$**  : pulsation de la fréquence fondamentale.

**$\phi_n$**  : déphasage de la composante harmonique.

**THD** : Le taux de distorsion harmonique.

**THDI** : Taux de distorsion harmonique en courant.

**THDV** : Le taux de distorsion harmonique de la tension.

**FP** : Le facteur de puissance.

**Q** : La puissance réactive.

**P** : La puissance active.

**S** : La puissance apparente.

**D** : la puissance déformante.

**$I_N$**  : Le courant nominal.

**$U_N$**  : la tension nominale.

**$L_{ch}$**  : L'inductance de lissage.

**$R_{ch}$**  : La résistance de la charge.

**$Z_s$**  : L'impédance du réseau.

**$L_c$**  : Les inductances d'entrée.

**$I_d$**  : Le courant redressé.

# LISTE DES ABREVIATIONS

---

**$Z_s$**  : L'impédance de source.

**$H_N$**  : harmonique des courant de range N.

**FAS** : Les filtres actifs séries.

**FAP** : Les filtres actifs parallèles.

**$\omega_h$**  : Fréquences propre du filtre.

**$\xi$**  : Le coefficient d'amortissement.

**MLI** : Commande par modulation de largeur d'impulsion.

**$V_s$**  : Tension efficace.

**$R_s$**  : Résistance de ligne.

**$L_s$**  : Inductance de ligne.

**$V_f$**  : La tension filtre actif.

**$I_h$**  : Le courant du filtre actif.

**$L_{fa}, C_{fa}$**  : Inductance et capacité constituant le filtre de sortie du filtre actif.

**$R_{fp}, L_{fp}, C_{fp}$**  : Résistance , inductance et capacité du filtre passif des harmoniques de rang  $\geq 11$

**$I_G, L_f, I_{dc}$**  : Courant, instance de correction et courant aval au pont de Graëtz.

<b>Table des matières :</b>		
Introduction Générale		P : 1
<b>Chapitre 1 : LA POLLUTION DES HARMONIQUES</b>		
<b>1.1</b>	Introduction	P : 4
<b>1.2</b>	Qualités de l'énergie électrique	P : 5
<b>1.2.1</b>	Définition	P : 5
<b>1.2.2</b>	Problèmes de la qualité de l'énergie électrique	P : 5
<b>1.3</b>	Perturbations dans les réseaux électriques	P : 6
<b>1.3.1</b>	Variation de tension a courte durée	P : 7
<b>1.3.2</b>	Coupure de tension	P : 7
<b>1.3.3</b>	Phénomène transitoire	P : 7
<b>1.3.4</b>	Variation de la fréquence	P : 7
<b>1.3.5</b>	Déséquilibre du système triphasé	P : 8
<b>1.3.6</b>	Creux de tension	P : 8
<b>1.4</b>	Définition des harmoniques	P : 8
<b>1.4.1</b>	Origine des harmoniques	P : 10
<b>1.4.2</b>	Perturbations induites par les charges non-linéaires : courant et tension harmoniques	P : 10
<b>1.4.3</b>	Les caractères d'harmoniques	P : 10
<b>1.4.3. a</b>	Décomposition d'un signal périodique	P : 10
<b>1.4.3. b</b>	Représentation spectrale	P : 11
<b>1.4.3. c</b>	Harmoniques et inter-harmoniques	P : 11
<b>1.5</b>	Quantification des perturbations	P : 12
<b>1.5.1</b>	Le taux de distorsion harmonique THD	P : 13
<b>1.5.1. a</b>	Taux de distorsion harmonique en courant THDI	P : 13
<b>1.5.1. b</b>	Le taux de distorsion harmonique de la tension THDV	P : 14
<b>1.5.2</b>	Normes imposées sur le THD	P : 14
<b>1.5.3</b>	Le Facteur de puissance	P : 15
<b>1.6</b>	Conséquences des harmoniques et leurs effets	P : 16
<b>1.6.1</b>	Les effets instantanés	P : 16
<b>1.6.1. a</b>	Vibrations, bruits	P : 17
<b>1.6.1. b</b>	Perturbations induites sur les lignes à courants faibles (téléphone, contrôle-commande)	P : 17
<b>1.6.2</b>	Les effets à terme	P : 18
<b>1.7</b>	Conclusion	P : 19
<b>Chapitre 2 : Dépollution des réseaux électriques d'harmoniques</b>		
<b>2.1</b>	Introduction	P : 21
<b>2.2</b>	Solutions de dépollution des réseaux électriques	P : 21
<b>2.2.1</b>	Solutions de dépollution traditionnelles	P : 21
<b>2.2.1.a</b>	Dépollution des courants perturbateurs	P : 21
<b>2.2.1.b</b>	Rééquilibrage des courants du réseau électrique	P : 21
<b>2.2.2.</b>	Compensation des courants harmoniques	P : 22
<b>2.2.2.a</b>	Compensation de la puissance réactive	P : 22
<b>2.2.2.b</b>	Le filtrage d'harmoniques	P : 23
<b>2.2.3</b>	Solution de dépollutions modernes	P : 27

# Sommaire

<b>2.2.2. a</b>	Utilisation des redresseurs triphasés	P : 27
<b>2.2.1. a. 1</b>	Redresseur hexa phasé	P : 28
<b>2.3.2. a. 2</b>	Redresseur dodécaphasé	P : 33
<b>2.3.3. a. 3</b>	Redresseur 24 pulses	P : 36
<b>2.2.2. b</b>	Le filtrage actif	P : 38
<b>2.5</b>	Conclusion	P : 38
<b>Chapitre 3 : Généralités sur les filtres actifs d'harmoniques</b>		
<b>3.1</b>	Introduction	P : 39
<b>3.2</b>	Principe du filtre actif	P : 39
<b>3.3</b>	Structure générale d'un filtre actif	P : 40
<b>3.4</b>	Les différents types de filtres actifs	P : 41
<b>3.4.1</b>	Filtre Actif Série (FAS)	P : 41
<b>3.4.2</b>	Filtre Actif Parallèle (FAP)	P : 41
<b>3.5</b>	Les avantages et les inconvénients des filtres actifs parallèles	P : 44
<b>3.6</b>	Les principaux défauts des filtres actifs parallèles	P : 45
<b>3.7</b>	Structure du filtre actif parallèle	P : 46
<b>3.7.1</b>	La partie puissance	P : 47
<b>3.7.2</b>	La partie contrôle-commande	P : 47
<b>3.8</b>	La partie puissance	P : 50
<b>3.8.1</b>	L'onduleur	P : 50
<b>3.8.1.a</b>	Onduleur de tension	P : 51
<b>3.8.1.b</b>	Onduleur de courant	P : 51
<b>3.8.2</b>	Circuit de stockage d'énergie, souvent capacitif	P : 51
<b>3.8.3</b>	Filtre de sortie	P : 51
<b>3.9</b>	La partie contrôle-commande	P : 52
<b>3.9.1</b>	Introduction	P : 52
<b>3.9.2</b>	Méthode d'identification des courants perturbés	P : 52
<b>3.10</b>	La commande de l'onduleur	P : 53
<b>3.10.1</b>	Commande par modulation de largeur d'impulsion	P : 53
<b>3.11</b>	Conclusion	P : 54
<b>Chapitre 4 : Simulation</b>		
<b>4.1</b>	Introduction	P : 55
<b>4.2</b>	Caractéristiques du courant de source avant filtrage actif	P : 55
<b>4.2.1</b>	Etude théorique de la charge polluante	P : 56
<b>4.3</b>	Modélisation de l'ensemble réseaux-charge polluante	P : 56
<b>4.4</b>	Application du filtrage actif parallèle	P : 59
<b>4.4.1</b>	Circuit de commande	P : 61
<b>4.4.1. a</b>	Détection du courant de référence	P : 62
<b>4.4.1. b</b>	Génération des impulsions	P : 65
<b>4.5</b>	Résultats de simulation sous Matlab-Simulink	P : 67
<b>4.6</b>	Conclusion	P : 74
Conclusion Générale		P : 75
Reference Bibliographie		P : 77

Liste des Figures

**Figure 1.1** : Evénements les plus répandus dans les réseaux électriques ..... 3

**Figure 1.2** : Décomposition d’un signal périodique à 50 Hz en série de Fourier..... 6

**Figure 1.3** : *décomposition d’un signal périodique*..... 8

**Figure 1.4** : représentation spectral d’un signal périodique ..... 8

**Figure 2.1** : Montage de Steinmetz pour le rééquilibrage ..... 18

**Figure 2.2** : Principe du filtrage ..... 19

**Figure 2.3** : Filtres résonants agissant sur plusieurs rangs harmoniques ..... 20

**Figure 2.4** : Structure du filtre amorti ..... 21

**Figure 2.5** : Redresseur hexaphasé ..... 23

**Figure 2.6** : Spectre théorique du courant ..... 23

**Figure 2.7** : Spectre harmonique théorique ..... 24

**Figure 2.8** : Redresseur hexaphasé ou pont de Graëtz ..... 25

**Figure 2.9** : Forme réelle de courant et tension d’entrée du redresseur 6 pulses ..... 26

**Figure 2.10** : Forme réelle de courant et tension de sortie du redresseur 6 pulses ..... 26

**Figure 2.11** : Spectre harmonique de la tension d’alimentation ..... 26

**Figure 2.12** : Spectre harmonique des courants du redresseur 6 pulses..... 27

**Figure 2.13** : Redresseur dodécaphasé ..... 28

**Figure 2.14** : Tension du réseau et son spectre harmonique correspondant..... 29

**Figure 2.15** : Courant du pont dodécaphasé est son spectre Harmonique correspondant .. 30

**Figure 2.16** : Redresseur 24 pulses ..... 31

**Figure 2.17** : montre le spectre harmonique du courant avec différents redresseurs ..... 32

**Figure 3.1** : Les différents types de filtres actifs ..... 34

**Figure 3.2** : Le principe des filtres actifs séries ..... 35

**Figure 3.3** : Le principe des filtres actifs parallèles ..... 35



---

<b>Figure 3.4</b> : Visualisation des courants mis en jeu .....	36
<b>Figure 3.5</b> : Les filtres actifs parallèles avec onduleur.....	37
<b>Figure 3.6</b> : Les filtres actifs parallèles avec structure lattice .....	38
<b>Figure 3.7</b> : Structure générale du filtre actif parallèle .....	40
<b>Figure 3.8</b> : Schéma électrotechnique d'un onduleur tension.....	41
<b>Figure 3.9</b> : Schéma électrotechnique d'un onduleur courant .....	42
<b>Figure 3.10</b> : Bloc fonctionnel de calcul des courants de référence .....	43
<b>Figure 3.11</b> : Principe de commande des courants par MLI .....	45
<b>Figure 4.1</b> : Redresseur monophasé alimentant une charge RL.....	48
<b>Figure 4.2</b> : Allures des courants et des tensions dans un montage redresseur double alternance .....	48
<b>Figure 4.3</b> : Modèle de la charge polluante établi sous Matlab-Simulink .....	49
<b>Figure 4.4</b> : Allure de $i_s$ avant filtrage actif suivi de son spectre harmonique.....	50
<b>Figure 4.5</b> : Courant $i_s$ déphasé de la tension $v_s$ .....	50
<b>Figure 4.6</b> : Circuit de puissance du filtre actif parallèle .....	51
<b>Figure 4.7</b> : Modèle du filtrage actif monophasé parallèle établi sous Matlab-Simulink..	53
<b>Figure 4.8</b> : Extraction graphique de courant harmonique .....	55
<b>Figure 4.9</b> : Allures des courants de charge, fondamental et harmonique de référence .....	57
<b>Figure 4.11</b> : Commande MLI intersective.....	66
<b>Figure 4.12</b> : Modèle Simulink de la MLI intersective d'un FA monophasé.....	66
<b>Figure 4.13 (a) Porteuse et modulatrice (b): Impulsion S1 (c): S4 (d): Impulsion S2 (e): Impulsion S3</b> .....	67
<b>Figure 4.14</b> : Allure du courant de source $i_s$ après filtrage actif suivi de son spectre harmonique de $i_s$ .....	69
<b>Figure 4.15</b> : Courant généré par le filtre actif $i_h$ et sa référence $i_h$ .....	70
<b>Figure 4.16</b> : Allures de $i_s$ et $v_s$ après filtrage actif .....	70
<b>Figure 4.17</b> : Allure de $i_s$ après filtrage actif suivi de son spectre harmonique.....	71

## Liste des Tableaux

<b>Tableau 1.1</b> : THDI Pour diverses charges non linéaires .....	10
<b>Tableau 1.2</b> : Les effets à terme de harmonique .....	14
<b>Tableau 2.1</b> : Les avantages et les inconvénients de filtre passif .....	20
<b>Tableau 2.2</b> : Spectre théorique des courants harmoniques.....	27
<b>Tableau 4.1</b> : Paramètres de simulation de la charge polluant.....	57
<b>TABLEAU 4.2</b> : PARAMETRES DE SIMULATION.....	67
<b>TABLEAU 4.3</b> : CONCORDANCE DES TAUX DE DISTORSION DE CHAQUE HARMONIQUE AVEC CEUX IMPOSES PAR LA CEI 61000-3-2.....	73

## Introduction générale :

Comme tout générateur d'énergie électrique, un réseau de puissance fournit de l'énergie aux appareils utilisateurs par l'intermédiaire des tensions qu'il maintient à leurs bornes, Il apparaît évident que la qualité de cette énergie dépend de celle de la tension au point de livraison [2].

Dans le cas idéal, cette énergie doit être fournie sous forme d'une parfaite tension sinusoïdale qui a par définition les caractéristiques suivantes [1] :

- ✚ Amplitude constante au niveau exigé.
- ✚ Fréquence constante et équilibrée en cas du triphasé.

À cause de l'existence des charges non linéaires, (notamment convertisseurs statiques) les conditions de délivrance de l'énergie électrique ne sont pas vérifiées. En effet, ces charges non linéaires provoquent des perturbations dont la principale est la pollution harmonique. Ceci se produit par l'intermédiaire de l'impédance de court circuit.

De nombreuses recherches ont été lancées, ayant pour objectif de trouver une solution définitive aux problèmes engendrés par les harmoniques. La grande masse de ces recherches a adopté le filtrage (passif et actif) comme solution, d'autres se sont axées vers la reconfiguration des charges polluantes elles-mêmes (convertisseurs AC-DC à MLI). Tout d'abord, les filtres passifs à base d'inductance L et de capacité C ont été choisis comme meilleurs absorbeurs des harmoniques. En effet, ces derniers offrent une manière simple et effective pour éliminer les harmoniques dans différents cas, alors l'impédance de la source d'harmoniques est élevée et le réseau ne présente pas de résonance près des fréquences harmoniques.

Néanmoins, l'efficacité de ces filtres se retrouve dégradée par la présence de certains facteurs [1] :

- ✚ Insuffisante habilité à couvrir une large bande de fréquences qui nécessite l'installation de plusieurs filtres.

- ✚ Naissance de résonances séries et parallèles avec le réseau qui conduit à l'amplification de tout harmonique à fréquence voisine de celle de la résonance.
- ✚ La mauvaise adaptation avec les changements de l'environnement auquel ils sont connectés.

Suite à ces effets néfastes, les recherches se sont orientées vers d'autres solutions présentant de moindres inconvénients. Alors, grâce au développement qu'a connu la technologie des semi-conducteurs de puissance entièrement commandables (GTO, IGBT, et MOSFET), ont paru les convertisseurs AC-DC (redresseur M.L.I.) d'une part, permettant un meilleur contrôle du facteur de puissance et l'atténuation de certains harmoniques basses fréquences, et les filtres actifs série et parallèle, constitués le plus souvent d'onduleurs de tension, d'autre part. Ces derniers se caractérisent par des qualités supérieures à celles des convertisseurs AC-DC. En effet, en plus de leur flexibilité à s'adapter aux différentes commandes (M.L.I. et hystérésis, ...), l'atténuation des harmoniques est très importante dans l'ensemble de la bande de fréquence. Aussi, ils permettent une bonne réponse dynamique compatible avec les besoins du système de puissance, et au lieu d'introduire des résonances dans le réseau, les filtres actifs peuvent être utilisés pour annuler les résonances existantes. En outre, si on les associe aux filtres passifs, ils peuvent compenser la variation de la fréquence.

Pour toutes les qualités mentionnées précédemment, les filtres actifs ont été choisis comme la solution idéale pour réduire les harmoniques, éliminer les résonances, compenser l'énergie réactive et améliorer le facteur de puissance, c'est pour cela que ce travail a été consacré à l'étude d'un filtre actif constitué d'un onduleur de tension à deux niveaux commandés en M.L.I [2].

De manière à atteindre ces objectifs, ce mémoire sera structuré en une introduction, quatre chapitres, et une conclusion, est répartie comme suit :

**Le premier chapitre** sera consacré à la description des perturbations harmoniques en pouvant intervenir dans un réseau électrique, et l'énumération des nombreux effets néfastes qu'ils engendrent. Les origines, les conséquences et les normes inhérentes à ces perturbations seront analysées.

# Introduction générale

---

**Le second chapitre**, consacré à l'exposition des différentes solutions proposées pour réduire les conséquences nuisibles des harmoniques. Nous présenterons également les solutions traditionnelles et modernes de dépollution.

**Le troisième chapitre** contenant la présentation globale de la solution particulière du filtrage actif et la modélisation de l'onduleur de tension à deux niveaux.

**Un quatrième chapitre** concernant l'étude du cas spécial du filtrage actif parallèle à deux niveaux : Structure, Commande et simulation.

On termine par **une conclusion** englobant la synthèse et les perspectives liées à l'étude de la réduction des harmoniques utilisant le filtrage actif parallèle puis série à structure constituée d'un onduleur de tension à deux niveaux.

# Chapitre 1 : Pollution harmonique des réseaux électriques

---

## 1.1. Introduction :

Ces dernières années, l'utilisation croissante des dispositifs d'électronique de puissance dans les systèmes électriques a entraîné de plus en plus de problèmes liés aux perturbations ou distorsions harmoniques des réseaux électriques. [1]

La distorsion harmonique est générée par les charges non linéaires connectées au réseau et qui absorbent des courants non sinusoïdaux. Ces harmoniques de courant vont à leur tour générer des tensions harmoniques aux différents points de connexion au réseau.

Pour les autres équipements électriques connectés en ces points, cette pollution harmonique a des effets maléfiques comme la déformation de la tension réseau au point de raccordement alors que le distributeur d'énergie est tenu de fournir une tension propre. Cette pollution peut également conduire à l'échauffement des câbles et des équipements électriques ou bien encore à l'arrêt soudain de machines tournantes.

Ce chapitre est consacré à la présentation des différents problèmes liés aux harmoniques entre autres, dans un premier temps nous présenterons qualités de l'énergie électrique et les perturbations principales, en particulier les harmoniques de tension et de courant.

# Chapitre 1 : Pollution harmonique des réseaux électriques

---

## 1.2. Qualités de l'énergie électrique

### 1.2.1. Définition

La compatibilité électromagnétique est le pouvoir d'un équipement ou d'un système de fonctionner d'une manière satisfaisante dans son environnement sans introduire les perturbations électromagnétiques inévitables dans cet environnement.

### 1.2.2. Problèmes de la qualité de l'énergie électrique :

De manière générale, les perturbations en électrotechnique appartiennent à la basse fréquence dont la transmission est conduite. Les phénomènes observés sont nombreux :

- ✚ Creux de tension et coupures
- ✚ Surtensions temporaires ou transitoires
- ✚ Fluctuations lentes de la tension (flicker)
- ✚ Variations de la fréquence
- ✚ Déséquilibres du système triphasé
- ✚ Harmoniques et inter harmoniques
- ✚ Tensions continues dans les réseaux alternatifs,...

Ils peuvent être regroupés en quatre catégories selon qu'ils affectent :

- ✓ l'amplitude.
- ✓ la forme d'onde.
- ✓ la fréquence.
- ✓ la symétrie du système triphasé.

La qualité de la tension peut être affectée, soit du fait de certains incidents joints à la nature physique et aux sujétions liées à l'exploitation du réseau, soit du fait de certains récepteurs.

# Chapitre 1 : Pollution harmonique des réseaux électriques

## 1.3 Perturbations dans les réseaux électriques

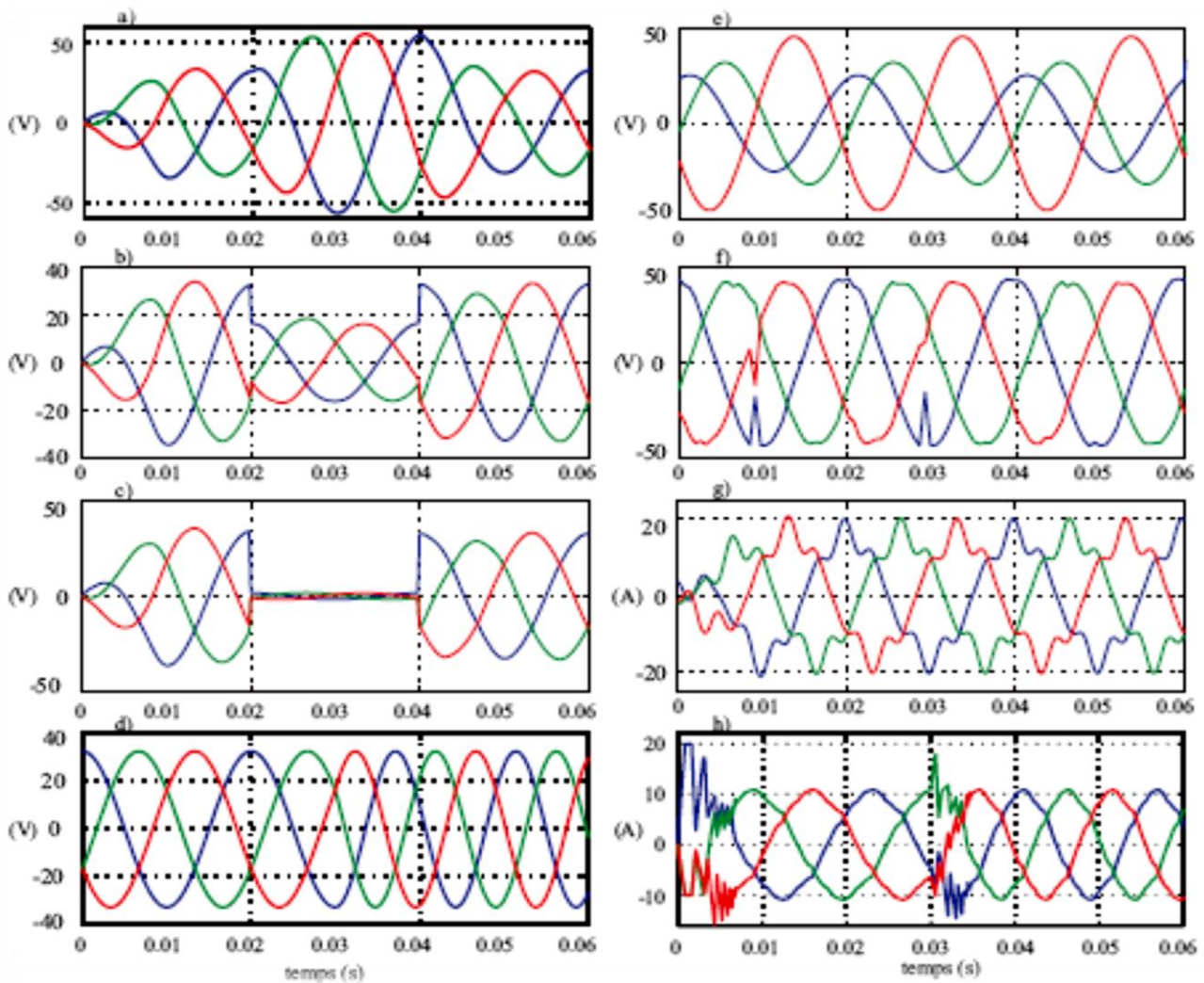


Figure 1.1 : Evénements les plus répandus dans les réseaux électriques [2]

a) augmentation de tension ;

b) atténuation de tension ;

c) coupure de tension ;

d) variation de la fréquence ;

e) système déséquilibré

f) creux de tension

g) harmoniques

h) phénomène transitoire



# Chapitre 1 : Pollution harmonique des réseaux électriques

---

## 1.3.1 Variations de tension à durée courte

Les variations de tension à durée courte sont causées par des défauts de fonctionnement ou par le démarrage simultané d'un grand nombre de charges électriques. Les défauts peuvent augmenter ou atténuer l'amplitude de la tension ou bien complètement la réduire à zéro pendant une certaine durée.

La durée de ces variations est inférieure à 3 minutes.

## 1.3.2 Coupure de tension

Une coupure de tension apparaît quand la tension de charge baisse à moins de 10% de la tension nominale sur une période sans dépasser 1 minute. L'interruption de la tension peut être causée par des défauts du système électrique (court circuit sur les lignes de distribution ou dans les bobinages statoriques d'un générateur,....etc.), des défauts des équipements connectés au réseau et des commandes mal conçues.

La coupure est caractérisée par la durée sur laquelle l'amplitude de tension est inférieure à 10% de la tension nominale.

## 1.3.3 Phénomène transitoire

Le phénomène transitoire est un des phénomènes parmi les plus importants dans l'analyse de la qualité d'un système électrique. Ce phénomène peut dégrader de manière transitoire le fonctionnement des équipements par des variations rapides.

Ce phénomène est caractérisé par le temps de montée et le temps de réponse. Dans le réseau de distribution, la plupart des phénomènes transitoires sont causés par l'utilisation d'éclairage, de condensateurs stimulés et par des commutations de charges (le démarrage des moteurs par exemple), etc.

## 1.3.4 Variation de la fréquence

Une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source autonome (thermique, solaire,.... etc.).

Dans le réseau de distribution (plutôt en hydroélectricité), cette variation de fréquence est très rare et n'est présentée que lors de conditions exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau (problème de turbine, etc.).

# Chapitre 1 : Pollution harmonique des réseaux électriques

---

Dans les conditions normales d'exploitation, la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle de 50 Hz  $\pm$ 1%.

## 1.3.5 Déséquilibre du système triphasé

Un système triphasé déséquilibré est un système dont les courants ou les tensions ne sont pas identiques au niveau de l'amplitude ou lorsqu'ils ne sont pas décalés de 120° entre chaque phase.

Dans la situation idéale, le système triphasé est équilibré avec des charges identiques. En réalité, les charges ne sont pas identiques et de plus, des événements peuvent survenir sur les lignes de distribution (la coupure d'une phase, le court-circuit. . .).

## 1.3.6 Creux de tension

Les creux de tension sont des perturbations périodiques. Elles sont causées par les commutations normales des transistors (à l'instant de la commutation du courant d'une phase vers l'autre). Les creux de tension sont aussi dus aux démarrages des grosses charges électriques comme les moteurs, les ascenseurs, l'éclairage, le chauffage, etc. Ce phénomène provoque un mauvais fonctionnement des dispositifs de protection et des pannes intempestives.

## 1.4 Définition des harmoniques :

Un signal périodique se compose d'un signal de fréquence (f) et de forme quelconque peut se décomposer en une somme de signaux sinusoïdaux comprenant :

- ✚ Un signal sinusoïdal à la fréquence fondamentale. Courbe fondamentale,
- ✚ Des signaux sinusoïdaux dont les fréquences sont des multiples entiers du fondamental : les harmoniques.
- ✚ Une éventuelle composante continue.

Chacun des harmoniques est caractérisé par une amplitude généralement exprimée en pourcentage de l'amplitude du fondamental et par une phase.

Le « rang » de l'harmonique est la valeur de l'entier qui détermine sa fréquence (sur un réseau 50Hz, l'h 7= 350 Hz).

La figure suivante représente la décomposition d'un signal périodique.

# Chapitre 1 : Pollution harmonique des réseaux électriques

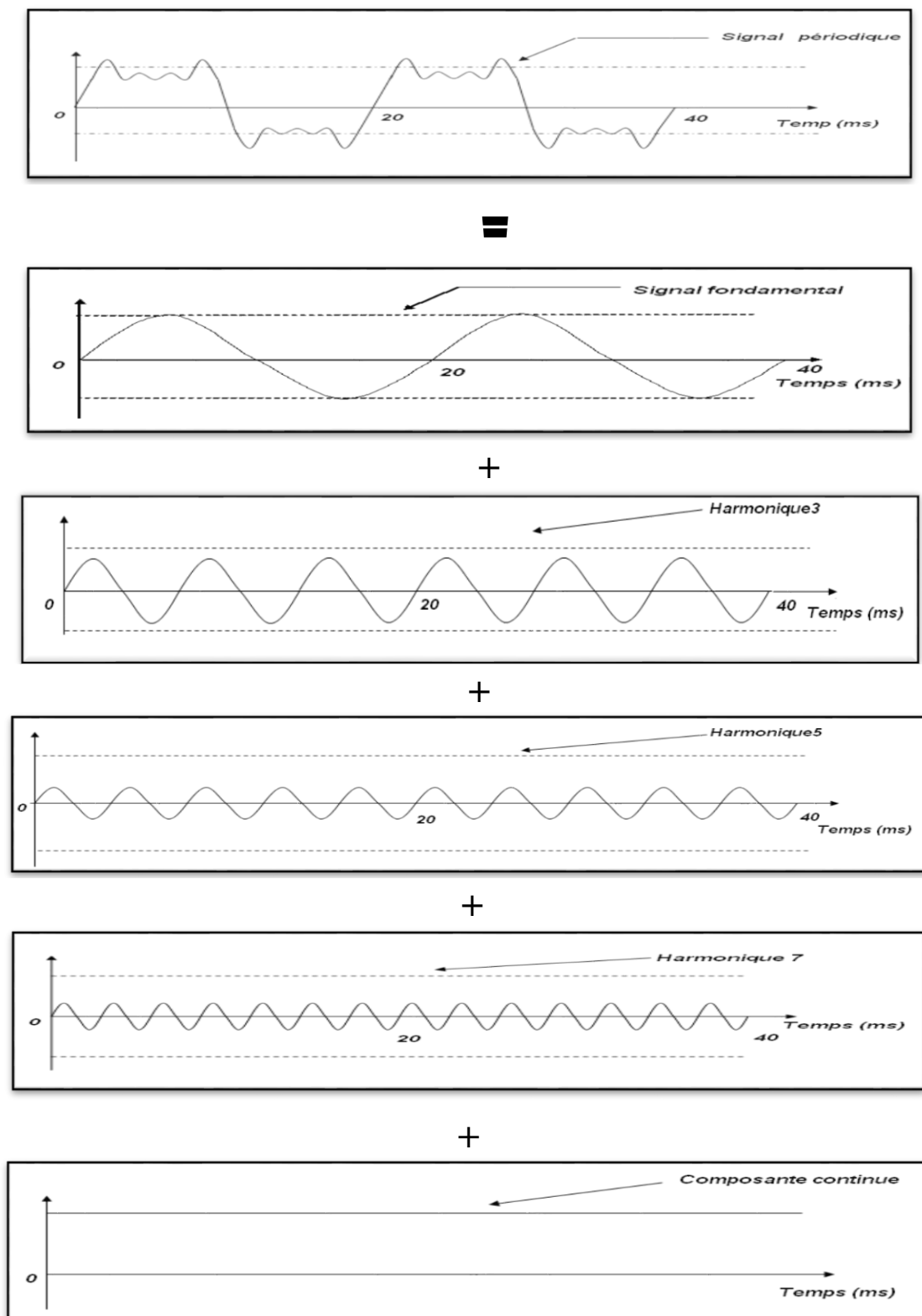


Figure 1.2 : Décomposition d'un signal périodique à 50 Hz en série de Fourier

# Chapitre 1 : Pollution harmonique des réseaux électriques

---

## 1.4.1. Origine des harmoniques :

Les dispositifs générateurs d'harmoniques sont présents dans tous les secteurs industriels, tertiaires et domestiques. Les harmoniques sont le fait d'une charge non-linéaire (le courant qu'elle absorbe n'a pas la même forme que la tension qui l'alimente).

Exemples de charges non-linéaires :

- ✚ Les équipements industriels (machines à souder, fours à arc, fours à induction, redresseurs).
- ✚ Les variateurs de vitesse pour moteurs asynchrones ou moteurs à courant continu
- ✚ Les onduleurs.
- ✚ Les appareils de bureautique (ordinateurs, photocopieurs, fax, etc.).
- ✚ Les appareils domestiques (TV, fours micro-ondes, éclairage néon...).
- ✚ Certains équipements avec saturation magnétique (transformateurs).

## 1.4.2. Perturbations induites par les charges non-linéaires : courant et tension harmoniques

L'alimentation de charges non-linéaires génère des courants harmoniques, circulant dans le réseau.

La tension harmonique est due à la circulation du courant harmonique dans les impédances des circuits d'alimentation (ensemble transformateur et réseau).

## 1.4.3. Les caractères d'harmoniques

### a. Décomposition d'un signal périodique

FOURIER a démontré, que toute fonction périodique de fréquence  $f$  peut être représentée sous la forme d'une somme composée :

- ✚ d'un terme sinusoïdal à la fréquence  $f$  de valeur efficace  $Y_1$  (fondamental)
- ✚ de termes sinusoïdaux dont les fréquences sont égales à :
  - $n$  fois la fréquence du fondamental et de valeurs efficaces  $Y$  (harmonique)
  - $n$  multiple entier étant le rang de chaque harmonique
- ✚ d'une éventuelle composante continue de valeur  $Y_0$
- ✚ Inter harmoniques: Ce sont des composantes sinusoïdales d'une grandeur qui ne est pas une fréquence multiple entière de celle du fondamental.

Infra harmoniques : Ces sont des composantes des fréquences inférieures à celle du fondamental.

# Chapitre 1 : Pollution harmonique des réseaux électriques

L'expression de ces grandeurs est donnée par le développement de la série de Fourier suivant:

$$y(t) = y_0 + \sum_{n=1}^{n=\infty} y_n \sqrt{2} \sin(\omega t - \Phi_n) \dots\dots\dots (1.1).$$

- OU  $y_0$  = valeur de la composante continue
- $y_1$  = valeur efficace du fondamental
- $y_n$  = valeur efficace de l'harmonique de rang n
- $\omega$  = pulsation de la fréquence fondamentale
- $\Phi_n$  = déphasage de la composante harmonique

## b. Représentation spectrale :

Un signal déformé se compose généralement de plusieurs harmoniques.

On représente souvent ce signal sous forme d'un spectre figure (1.4.), c'est à dire à l'aide d'un schéma ou l'on porte abscisse la fréquence et en ordonnée le module (en valeur efficace ou en pour cent).

Ces courbes dans la figure (1.3) nous montrent la décomposition d'un signal période en série de Fourier.

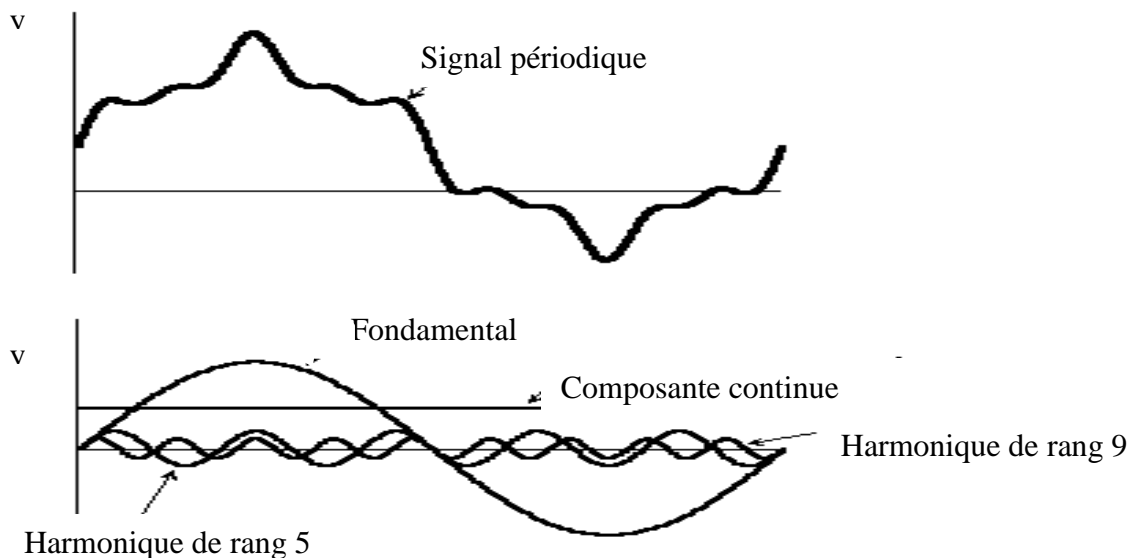


Figure 1.3 : décomposition d'un signal périodique

## c. Harmoniques et inter-harmoniques

Les harmoniques sont des tensions ou des courants sinusoïdaux ayant des fréquences multiples de nombres entiers de la fréquence fondamentale ; à laquelle le circuit d'alimentation est conçu pour fonctionner.

Les formes d'onde périodique quelconques peuvent être décomposées en la somme de la fréquence fondamentale et des harmoniques.

# Chapitre 1 : Pollution harmonique des réseaux électriques

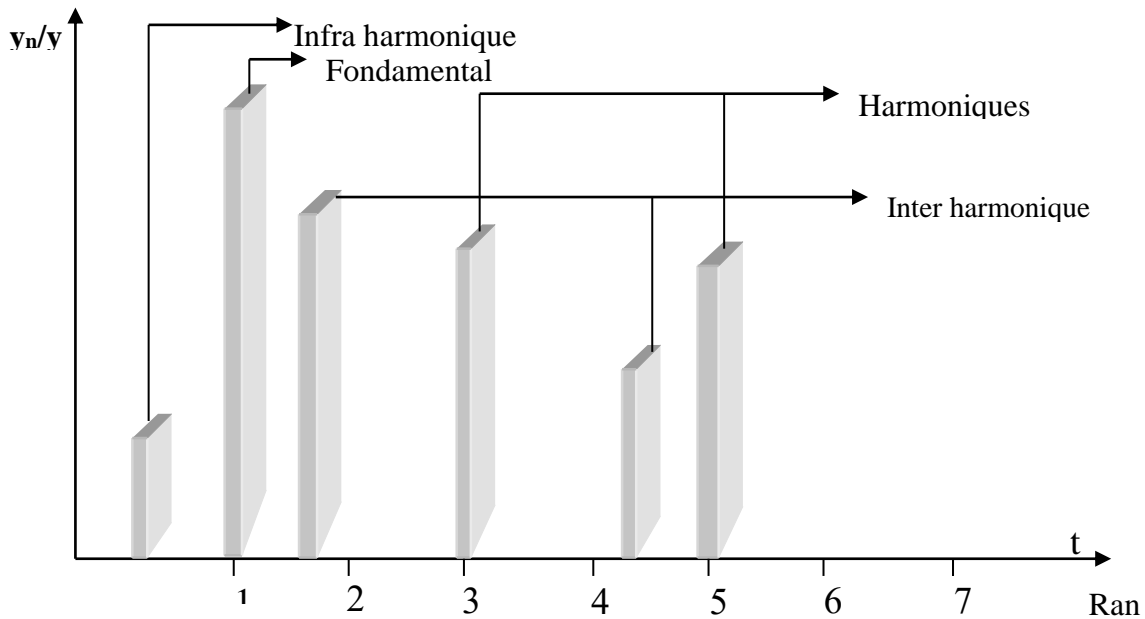


Figure 1.4 : représentation spectrale d'un signal périodique

Les harmoniques proviennent des caractéristiques non linéaires des dispositifs et des charges connectés sur le système d'alimentation. Le niveau de déformation harmonique est décrit par le spectre harmonique complet avec les amplitudes de chaque composante harmonique individuelle. Le taux global de distorsion.

## 1.5. Quantification des perturbations :

Différents critères sont définis pour caractériser les perturbations : Le taux de distorsion harmonique et le facteur de puissance sont les plus employés pour quantifier respectivement.

### 1.5.1. Le taux de distorsion harmonique THD :

Le taux de distorsion harmonique THD est un facteur très important dans la détermination de la pollution et de la dépollution harmonique. Le THD s'exprime par:

$$THD (\%) = 100 \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} \frac{C_k^2}{C_1^2}} \dots\dots\dots(1.2).$$

Où

$C_k$  représente la composante harmonique de rang  $k$

$C_1$  représente la composante fondamentale

# Chapitre 1 : Pollution harmonique des réseaux électriques

En général, les harmoniques pris en compte dans un réseau électrique sont inférieurs à 2500 Hz, ce qui correspond au domaine des perturbations basses fréquences au sens de la normalisation. Les harmoniques de fréquence plus élevée sont fortement atténués par l'effet de peau et par la présence des inductances de lignes. De plus, les appareils générant des harmoniques ont, en grande majorité, un spectre d'émission inférieur à 2500 Hz, c'est la raison pour laquelle le domaine d'étude des harmoniques s'étend généralement de 100 à 2500 Hz, c'est-à-dire des rangs 2 à 50 [3].

Deux taux de distorsion harmonique sont distingués :

- ✚ Le taux de distorsion harmonique en courant, noté THDI
- ✚ Le taux de distorsion harmonique en tension, noté THDV.

## a. Taux de distorsion harmonique en courant THDI :

Les harmoniques augmentent le courant efficace, ce qui conduit à :

- ✚ une augmentation des pertes, donc à une baisse de rendement
- ✚ des surcharges et échauffement
- ✚ des risques de détérioration du courant (il ne dépend que des valeurs efficaces du courant de charge)

Le THDI traduit la déformation du courant. Pour cela, il doit être fortement réduit afin de limiter les effets des courants harmoniques.

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

$$THDI (\%) = 100 \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left( \frac{I_{cK}}{I_1} \right)^2} \dots\dots\dots(1.3).$$

Différents taux de distorsion en courant sont proposés dans le tableau (1.1) [4]

Charges non linéaires	THDI (%)
Variateurs de vitesse	80
Alimentation de micro-ordinateur	70
Tubes fluorescents	>100

**Tableau 1.1** : THDI Pour diverses charges non linéaires

# Chapitre 1 : Pollution harmonique des réseaux électriques

## b. Le taux de distorsion harmonique de la tension THDV

La distorsion harmonique de la tension peut être définie comme étant le produit du courant harmonique et l'impédance à travers laquelle il circule. Cette distorsion est susceptible d'atteindre des valeurs élevées lorsque le courant harmonique rencontre lors de son passage un circuit résonant série ou parallèle [5].

La circulation des courants harmoniques dans l'impédance de source amène aussi une déformation de la tension d'entrée. Le taux global de distorsion en tension, ou THDV, qui en résulte, doit être limité (en général à 5%) pour que la déformation de tension ne perturbe pas d'autres utilisateurs connectés au même jeu de barre.

$$THDV (\%) = 100 \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} \left( \frac{V_{CK}}{V_{C1}} \right)^2} = 100 \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} \left( \frac{|Z_{sc}^K| I_{CK}}{V_{C1}} \right)^2} \dots\dots\dots(1.4).$$

$V_{C1}$  : désigne la valeur efficace de  $v_{c1}$

$|Z_{sc}^K|$  : Module de l'impédance de court-circuit par l'harmonique de rang K

Ainsi, plus les impédances  $Z_{sc}^K$  ( $k > 1$ ) sont faibles, plus la distorsion en tension est faible, la réduction du THDV implique la réduction des courant harmoniques qui en sont la cause, si possible avec une solution indépendante de la source [5], [6].

### I.5.2. Normes imposées sur le THD :

Les perturbations entraînent des déformations de tension, des pertes joules supplémentaires, influents sur les circuits environnants et, notamment crée des phénomènes de résonances et d'interférences avec des circuits de télécommunications. Il existe des normes pour éviter ou diminuer ces influences. Ces normes sont imposées par le réseau de distributeur, en France le réseau distributeur EDF impose les limitations suivantes [7], pour chaque utilisateur pris séparément.

- ✚ Pour tout les harmoniques :  $THD \leq 1.6\%$
- ✚ Pour tout les harmoniques :  $\left| \frac{V_{2k}}{V_1} \right| \leq 0.6\%$
- ✚ Pour tout les harmoniques :  $\left| \frac{V_{2k+1}}{V_1} \right| \leq 1\%$



# Chapitre 1 : Pollution harmonique des réseaux électriques

---

Il est d'usage de dire que, dans les installations industrielles, les tensions harmoniques dont le THD est inférieur à 5% ne produisent pas d'effet notable.

Entre 5% et 7% on commence à observer des effets, et pour plus de 10% les effets sont quasi certains [8].

Si ces valeurs sont dépassées par l'utilisateur, il est indispensable, soit d'augmenter la puissance apparente court-circuit ou de bénéficier d'installation de filtrage qui ont pour objectif de baisser le taux de distorsion harmonique [7].

### 1.5.3. Le Facteur de puissance :

Normalement, pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance est donné par le rapport entre la puissance active (P) et la puissance apparente (S). Donc il s'exprime par la relation

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{V_n I_n \cos \varphi}{V_n I_n} \dots\dots\dots(1.5).$$

$V_n$  : la tension nominale

$I_n$  : le courant nominal

L'idéal est pour  $\cos \varphi$  à 1, on tire alors la puissance c'est dire que toute la puissance que peut fournir le réseau (puissance apparente) est utilisée en puissance active.

Mais en réalité, il existe une autre puissance que l'on appelle puissance réactive qui ne fournit aucune puissance « physique ». Cette puissance existe car elle dépend des caractéristiques réseaux (ZSCC). cette puissance réactive a pour expression et s'exprime en volt ampère réactif (VAR) [7]

$$Q = V_n I_n \sin \varphi \dots\dots\dots(1.6).$$

Dans le cas où il y a des harmoniques, une puissance supplémentaire appelée la puissance déformante (D), donnée par la relation (I.14), apparaît comme le montre le diagramme de « Fresnel » de la figure (VI.1.) :

$$D = 3V_1 \sqrt{\sum_{k=2}^{50} I_k^2} \dots\dots\dots(1.7).$$

Donc le facteur de puissance devient

$$FP = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \cos \varphi_1 \cos \gamma \dots\dots\dots(1.8).$$

# Chapitre 1 : Pollution harmonique des réseaux électriques

---

On voit bien que les harmoniques affectent aussi le facteur de puissance

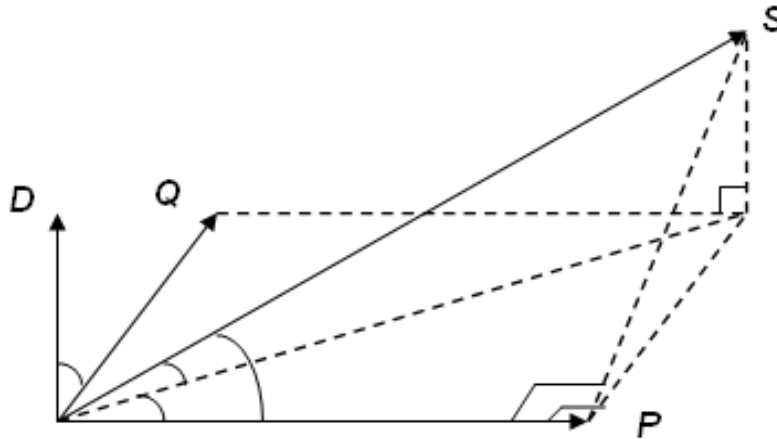


Figure 1.5 : diagramme de Fresnel des puissances

## 1.6. Conséquences des harmoniques et leurs effets :

La présence d'harmoniques de courant ou de tension conduit à des effets néfastes sur le réseau de distribution. Les tensions et courants harmoniques superposés à l'onde fondamentale conjuguent leurs effets sur les appareils et équipements utilisés.

Ces grandeurs harmoniques ont des effets différents selon les récepteurs rencontrés :

- soit des effets instantanés.
- soit des effets à terme dus aux échauffements.

### 1.6.1. Les effets instantanés

Sur les systèmes électroniques, les tensions harmoniques peuvent perturber les dispositifs de régulation. Elles peuvent influencer les liaisons et les équipements "courants faibles", entraînant des pertes d'exploitation.

Les compteurs d'énergie présentent des erreurs supplémentaires en présence d'harmoniques : par exemple un compteur classe 2 donnera une erreur supplémentaire de 0,3 % avec un taux de 5 % d'harmonique 5 sur le courant et la tension.

# Chapitre 1 : Pollution harmonique des réseaux électriques

Les récepteurs de télécommande centralisée à fréquence musicale utilisée par les distributeurs d'énergie peuvent être perturbés par des tensions harmoniques de fréquence voisine de celle utilisée par le système.

## a. Vibrations, bruits

Par les efforts électrodynamiques proportionnels aux courants instantanés en présence, les courants harmoniques généreront des vibrations, des bruits acoustiques, surtout dans les appareils électromagnétiques (transformateurs, inductances).

Des couples mécaniques pulsatoires, dus aux champs tournants harmoniques, donneront des vibrations dans les machines tournantes.

Ils peuvent entraîner une destruction du matériel. [9]

## b. Perturbations induites sur les lignes à courants faibles (téléphone, contrôle-commande)

Des perturbations surviennent lorsqu'une ligne à courants faibles chemine le long d'une canalisation de distribution électrique avec courants et tensions déformés. [9]

### 1.6.2. Les effets à terme :

Le tableau suivant récapitule les principaux effets néfastes des harmoniques :

<i>Nature du matériel électrique</i>	<i>Effet de la pollution harmonique</i>
Machines tournantes. Moteurs triphasés. Alternateurs.	Echauffement supplémentaire (effet Joule) dans les enroulements statoriques, couples oscillatoires. augmentation du bruit. Nuisances sonores. Réduction des possibilités d'utilisation a pleine charge.
Transformateurs	Pertes supplémentaires dans le fer (par courants de Foucault) et dans les enroulements (par effet Joule). Risque de saturation en présence d'harmoniques paires. Vibrations mécaniques. Nuisances sonores
Les câbles et les équipements	Augmentation des pertes surtout dans le câble de neutre où s'ajoutent les harmoniques de rang 3 et multiple de 6 Pertes diélectriques supplémentaires l'élévation de la résistance apparente de l'âme avec la fréquence, phénomène dû à l'effet de peau.

# Chapitre 1 : Pollution harmonique des réseaux électriques

	Tous les équipements soumis à des tensions ou traversés par des courants harmoniques ont des pertes accentuées et devront faire l'objet de déclassements incertains.
Electronique de puissance (ponts redresseurs à thyristors, transistor,...etc.)	Troubles fonctionnels liés à la forme d'onde (commutation synchronisation)
Condensateurs de puissance	Pertes diélectriques supplémentaires aboutissant à un vieillissement prématuré des condensateurs. Echauffement. Vieillessement prématuré (claquage). Résonance.
Ordinateurs.	Dysfonctionnement lié aux couples pulsatoires des moteurs d'entraînement des supports magnétiques.
Dispositifs de protection (Fusibles, disjoncteurs magnétothermiques.)	Fonctionnement intempestif.
Appareils de mesure.	La dégradation de la précision.
Téléviseurs.	Déformation d'image.
Lampes à décharge.	Risque de vacillement sous l'effet de l'harmonique de rang 2.

**Tableau 1.2** : Les effets à terme d'harmonique

# Chapitre 1 : Pollution harmonique des réseaux électriques

---

## 1.7. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons parlé de la pollution harmonique dans les réseaux électriques, consacrant l'onde de tension du réseau. Comme nous avons pu le constater, cette pollution a des effets catastrophiques sur les équipements électriques, ces effets peuvent produire des échauffements et des dégradations du fonctionnement jusqu'à la destruction totale de ces équipements.

Les charges responsables de la propagation de la pollution harmonique sont les charges non linéaires qui englobent les convertisseurs statiques et les transformateurs, l'utilisation de ces charges est irremplaçable. Donc, il est impératif d'aller chercher les solutions aux problèmes d'harmoniques ailleurs sans avoir à éliminer ces charges.

La maîtrise des harmoniques est une importance capitale à fin de mettre à l'utilisateur de trouver un réseau électrique propre et rendre les installations semblable aux normes connus.

La présentation des différentes solutions existantes, sera étudiée dans le deuxième chapitre.

# **Chapitre 1 : Pollution harmonique des réseaux électriques**

---

## **2.1 Introduction :**

Les mesures effectuées ces dernières années montrent que la pollution harmonique s'accroît régulièrement sur l'ensemble des réseaux. Face à cela, une politique de maîtrise de la pollution harmonique doit être menée aussi bien du côté des distributeurs d'électricité que de celui des fabricants de matériel ou des utilisateurs industriels.

Dans ce chapitre nous allons étudier les différentes méthodes utilisées afin de réduire la pollution harmonique dans les réseaux de distribution. Parmi ces méthodes, citons : le surdimensionnement des éléments composant le réseau, le filtrage passif et le filtrage actif. Les deux derniers moyens de mitigation mentionnés sont les plus répandus.

## **2.2 Solutions de dépollution des réseaux électriques :**

Afin de compenser toutes les perturbations, séparées en deux types : courant et tension, deux groupes de solution de dépollution, traditionnelle et moderne, vont être étudiées. L'approche de la dépollution la mieux adaptée à notre objectif de recherche sera détaillée par la suite.

### **2.2.1 Solutions de dépollution traditionnelles :**

Suivant les types de perturbation, courant et tension, deux solutions traditionnelles de dépollution sont analysées.

#### **a. Dépollution des courants perturbateurs :**

Afin de dépolluer les réseaux électriques de ce type de perturbation, plusieurs solutions ont été introduites dans la littérature.

#### **b. Rééquilibrage des courants du réseau électrique :**

Puisque les courants déséquilibrés dans un réseau électrique basse tension résultent généralement des charges monophasées et biphasées mal réparties, la première solution est la répartition égale des charges sur les trois phases. Une autre solution est l'installation d'un compensateur passif composé d'inductance et de condensateur.

## CHAPITRE 2 : DEPOLLUTIONS HARMONIQUES

La Figure (2.1) montre ce compensateur, appelé montage de Steinmetz. Ce montage permet de présenter à 50 Hz une impédance équilibrée. Cependant, le montage de Steinmetz provoque un fort déséquilibre pour des fréquences différentes de 50 Hz, avec des résonances qu'il faut éviter d'exciter à proximité d'un générateur d'harmoniques. [10]

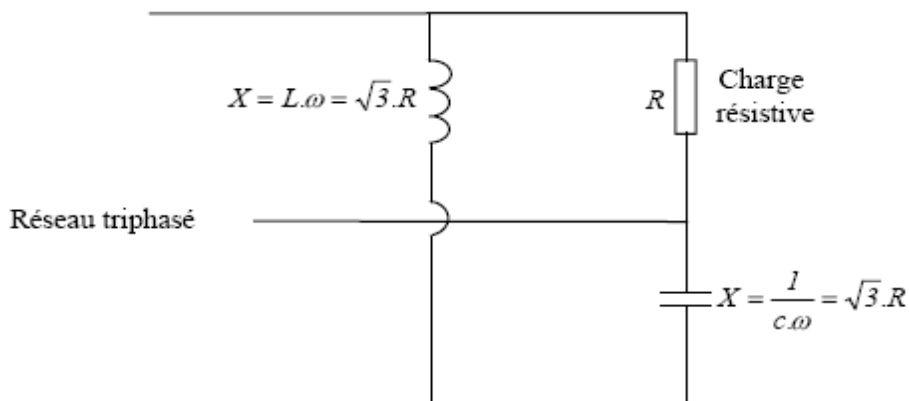


Figure 2.1 : Montage de Steinmetz pour le rééquilibrage [10]

### 2.2.2 Compensation des courants harmoniques

Plusieurs solutions existent pour limiter la propagation et l'effet des harmoniques dans les réseaux électriques :

- ✓ L'augmentation de la puissance de court-circuit du réseau et l'utilisation de convertisseurs peu polluants qui ont pour effet de diminuer la distorsion harmonique,
- ✓ L'utilisation de dispositifs de filtrage pour réduire la propagation des harmoniques produits par des charges non linéaires.

#### a. Compensation de la puissance réactive

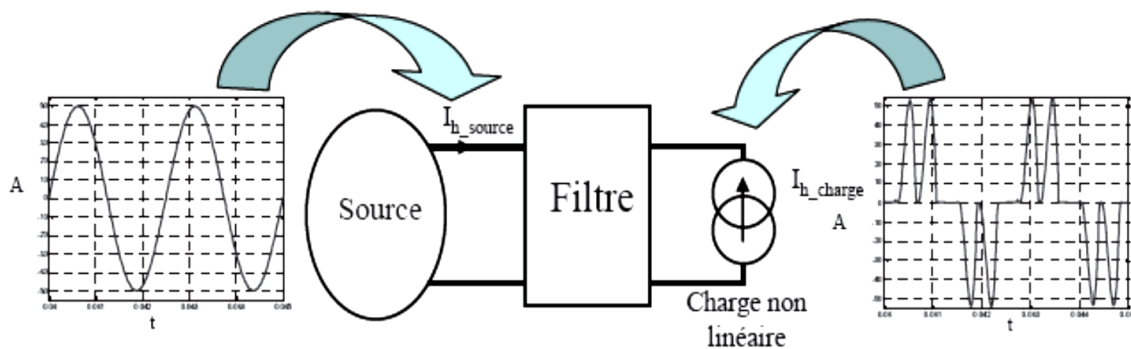
La puissance réactive est majoritairement consommée par les moteurs asynchrones et plus récemment par des dispositifs à base d'électronique de puissance. Différentes méthodes de compensation sont utilisées pour relever le facteur de puissance. La plus simple consiste à placer des batteries de condensateurs en parallèle avec le réseau.

L'inconvénient de cette méthode réside dans le fait que la puissance réactive fournie par les condensateurs est constante et qu'elle ne s'adapte pas à l'évolution du besoin.



## b. Le filtrage d'harmoniques

Depuis l'apparition d'Organe pollueurs (en termes d'harmoniques), l'ajout de filtres s'est imposé pour garantir le respect des normes en vigueur. Le principe est simple ; le filtre doit « Piéger » les harmoniques générés par la charge afin que le courant et la tension vus du générateur soient les plus sinusoïdaux possibles (Figure 2.2). Le filtre peut être connecté en série ou en parallèle à la charge. En règle générale, les filtres shunts permettent d'améliorer les courants alors que les filtres séries compensent les perturbations de tension.



**Figure 2.2 :** Principe du filtrage

Il apparaît logiquement que le principal critère de dimensionnement est la norme en vigueur sur le réseau étudié. Pour le réseau de distribution 400V-50Hz, la norme dépend du niveau de courant absorbé au nœud de raccordement et limite les amplitudes des raies de courant (par exemple pour un équipement de moins de 16A RMS, l'harmonique de rang 5 ne doit pas dépasser 1,14A). Concernant le réseau 115V-400Hz des avions civils, la norme diffère selon que l'équipement testé est monophasé ou triphasé. Cette norme est relative au fondamental du courant absorbé par la charge. Par exemple, quelle que soit la puissance de la charge, les harmoniques 3, 5 et 7 ne doivent pas dépasser 2% du fondamental. Pour respecter ces normes, il existe de nombreuses structures qui peuvent se regrouper en trois catégories de filtres : passifs, actifs et hybrides.

### - Filtre passif :

Le filtrage passif se fait par la mise en parallèle avec l'impédance du réseau d'un circuit de très faible impédance devant l'impédance du réseau à la fréquence de l'harmonique que l'on veut éliminer, le courant choisit le chemin le moins résistant et de ce fait l'harmonique pour

## CHAPITRE 2 : DEPOLLUTIONS HARMONIQUES

---

lequel le filtre a été dimensionné, sera dévié à travers ce dernier. Le facteur de qualité, le rapport de la résistance ou de la capacitance résonante par rapport à la résistance du filtre, que détermine la précision de l'accord doit être assez élevé, supérieur à 50, toutefois la bande passante étant inversement proportionnel au facteur de qualité, de forte valeur de ce dernier peut être gênante dans le cas d'un filtre même légèrement désaccordé.

Des filtres passifs dit amortis peuvent aussi être aussi utilisés. Ils sont conçus de telle sorte à filtrer une plage de fréquence, ils sont généralement utilisés avec un faible facteur de résonance car pour ce genre de filtres, ce facteur de qualité est défini comme le rapport de la résistance sur la réactance.

On distinguera deux types de filtres assurant la limitation des tensions harmoniques :

- ✚ Le filtre résonant (ou filtre de type shunt).
- ✚ Le filtre amorti.

### Filtre résonant :

Le filtre résonant (ou filtre shunt) est composé d'une inductance L en série avec un condensateur C.

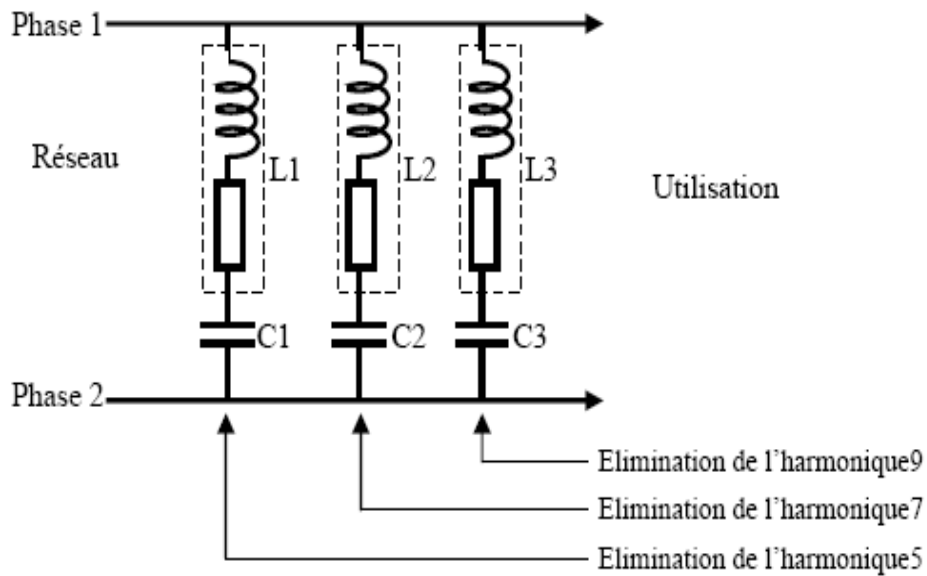
Les valeurs d'inductance L et de capacité C sont calculées à la fréquence de résonance correspondant à la fréquence de l'harmonique à éliminer.

Lorsque l'on souhaite réaliser le filtrage d'un signal déformé entaché par plusieurs courants harmoniques, il est nécessaire de prévoir un ensemble de filtres où chacun d'entre eux agit sur le rang harmonique à éliminer Figure (II.3).

Un filtre shunt efficace doit posséder un grand facteur de qualité Q. Celui-ci s'exprime par la relation suivante :  $Q = Z/r$ , avec  $r \ll x$  soit :  $Q = x/r$  puisque  $\sqrt{r^2 + x^2}$

L'ordre de grandeur de ce facteur est de 75.

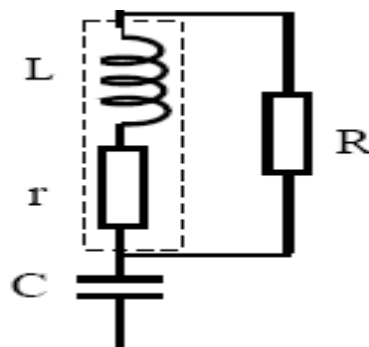
## CHAPITRE 2 : DEPOLLUTIONS HARMONIQUES



**Figure 2.3 :** Filtres résonants agissant sur plusieurs rangs harmoniques.

### Filtre amorti :

Le filtre amorti est constitué d'une structure identique au filtre résonant, avec en supplément, une résistance R branchée en parallèle sur l'inductance Figure (2.4).



**Figure 2.4 :** Structure du filtre amorti.

Ce filtre assure l'atténuation des harmoniques dans une plus large bande de fréquence que le filtre résonant mais sans éliminer concrètement ces perturbations. Il ne réalise donc pas la suppression de ces harmoniques, mais contribue à améliorer sensiblement le taux de distorsion harmonique global d'une installation polluée.

Pour des installations utilisant le filtrage harmonique, on peut concevoir de mettre en œuvre un filtre résonant pour les rangs 5 et 7, associé à un filtre amortie accordé pour h égale à 13.

## CHAPITRE 2 : DEPOLLUTIONS HARMONIQUES

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

[11]

### Les avantages et les inconvénients de filtre passif :

Les inconvénients	Les avantages
<ul style="list-style-type: none"><li>• Manque de souplesse à s'adapter aux variations du réseau et de la charge,</li><li>• Équipements volumineux</li><li>• Problèmes de résonance avec l'impédance du réseau.</li><li>• Leur efficacité dépend de l'impédance du réseau, mal connue et susceptible de varier.</li><li>• Leur incapacité de couvrir une large bande de fréquence, d'où l'utilisation de plusieurs filtres de rang d'accord différents.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Leurs performances sont moins sensibles aux variations de température, aux déviations de fréquence, aux tolérances des composants, etc.</li><li>• Ils présentent une faible valeur d'impédance pour une large gamme de fréquences harmoniques.</li><li>• L'usage de multiples filtres résonants peut provoquer des résonances parallèles entre les filtres et l'admittance du réseau. Dans ce cas, l'usage d'un ou de plusieurs filtres amortis est préférable.</li></ul>

**Tableau 2.1** : Les avantages et les inconvénients de filtre passif

### Coût du filtre passif :

Le coût d'un filtre est de l'ordre de 5 à 15 % du coût de tout l'équipement de la station de conversion (AC/DC). Il est réparti entre la puissance réactive que doit générer le filtre et le filtrage des harmoniques, mais sans base logique de la division.

Le but est donc de concevoir un filtre à coût minimum qui filtre adéquatement et qui fournit une partie de la puissance réactive. Fait important à noter, la capacité représente environ 60 % du coût total du filtre. Avec ces données, une conception précise du filtre est bien justifiée. [13]

## **CHAPITRE 2 : DEPOLLUTIONS HARMONIQUES**

---

### **2.2.2 Solution de dépollutions modernes :**

Les solutions de dépollutions classiques ne répondent plus à l'évolution des réseaux électriques et des charges à protéger, comme venons de le décrire précédemment, d'autres solutions modernes ont été proposées. La première **solution** de dépollution consiste à modifier la structure de la charge polluante en renforçant l'alimentation, pour fabriquer la charge la moins polluante possible. Cela se présente soit par l'utilisation des redresseurs de différentes structures, soit par la technique de la modulation de largeur d'impulsion (MLI).

La seconde solution c'est le filtrage actif. (Elle semble d'être la plus révélatrice et la plus encourageante pour contrer les harmoniques même dans les conditions de fonctionnements les plus perturbés.

En effet cette solution peut s'adapter aux évolutions de la charge et du réseau électrique et ceci sans toucher aux installations du fournisseur d'énergie et du consommateur)

On considère dans cette étude le cas spécial d'une charge polluante représentée par un redresseur triphasé constitué d'un pont de Graëtz à six thyristors.

#### **a. Utilisation des redresseurs triphasés :**

Nous allons étudier dans cette première partie les caractéristiques et les performances des différentes structures des redresseurs triphasés à base des thyristors. On va commencer par le redresseur de type hexaphasé et par la suite en modifiant la structure du montage en ajoutant un deuxième pont redresseur de 6 pulses monter avec le premier en parallèle afin d'avoir un redresseur dodécaphasé à 12 pulses, et de la même manière on peut avoir un redresseur de 24 pulses en raccordant deux redresseurs de 12 pulses...

##### **a.1. Redresseur hexaphasé :**

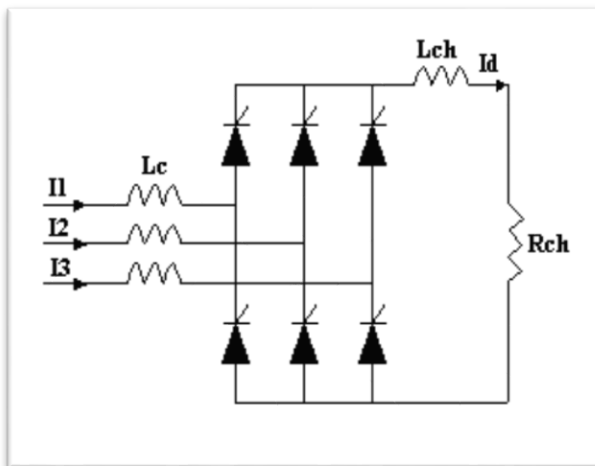
Ce redresseur est un pont de Graëtz à thyristors associé à une inductance de lissage  $L_{ch}$  d'impédance très élevée de façon à ce que le courant  $I_d$  de sortie soit parfaitement lissé et une résistance  $R_{ch}$ . La structure de ce redresseur est montrée par la figure (2.5).

Hypothèse : on néglige :

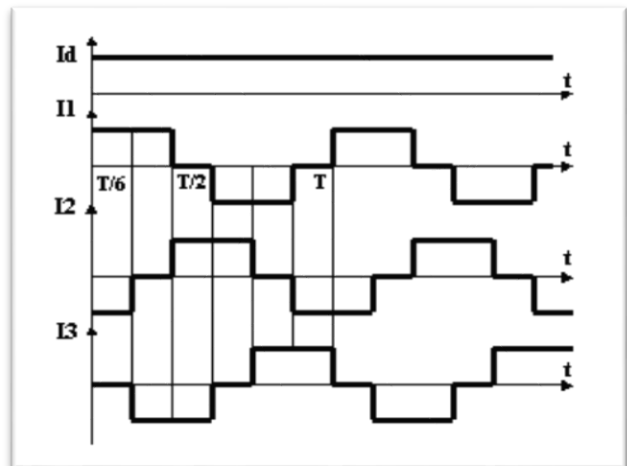
- Les phénomènes d'empiètement dans la conduction des interrupteurs (thyristors).
- L'impédance du réseau  $Z_s$ .
- Les pertes commutations.
- Les inductances d'entrée  $L_c$ .

• **Forme du courant d'entrée :**

Les courants d'entrée fournis par la source, sur chaque phase, sont des courants rectangulaires ( $i_1, i_2, i_3$ ) comme le montre la figure (2.6), chargés d'harmoniques.



**Figure 2.5 :** Redresseur hexaphasé



**Figure 2.6 :** Spectre théorique du courant

Chaque thyristor conduit le courant pendant **1/3** de période, la valeur et la forme du courant redressé  $I_d$ , continu si on suppose que l'impédance de lissage est infinie.

Et comme nous avons négligé l'impédance de source  $Z_s$ , Le courant s'établit instantanément à la valeur  $I_d$  lorsqu'un thyristor devient conducteur

• **SPECTRE théorique des courants harmoniques :**

En supposant que le redresseur soit alimenté par des sources parfaites et quelles débitent un courant redressé lisse, la décomposition en série de Fourier de ce courant dont l'allure est donnée ci-dessous, s'écrit :

## CHAPITRE 2 : DEPOLLUTIONS HARMONIQUES

$$i_{1(t)} = i_1 \sqrt{2} \left( \sin(\omega t - \alpha_1) + \frac{1}{5} \sin(5(\omega t - \alpha_1)) + \frac{1}{7} \sin(7(\omega t - \alpha_1)) + \frac{1}{11} \sin(11(\omega t - \alpha_1)) \dots \dots \dots \right) \dots \dots \dots (2.1)$$

**Remarque :**

Par rapport à un redresseur monophasé, les courants harmoniques de rang 3 ont disparu. On constate alors que les harmoniques sont de rang  $n=6k\pm 1$ , le spectre des courants harmoniques est donné par le tableau. 2.2 [12]

Harmoniques	% de H1
H5	20% (1/5)
H7	14 % (1/7)
H11	9 % (1/11)
H13	8 % (1/13)
H17	6 % (1/17)
H19	5 % (1/19)

**Tableau 2.2 :** Spectre théorique des courants harmoniques

- **Distorsion théorique en courant et en tension :**

Comme nous avons déjà dit au premier chapitre le THDI, mesure l'importance des harmoniques par rapport au fondamental.

Le spectre représenté par la figure (2.7) correspond au taux de distorsion en courant.

# CHAPITRE 2 : DEPOLLUTIONS HARMONIQUES

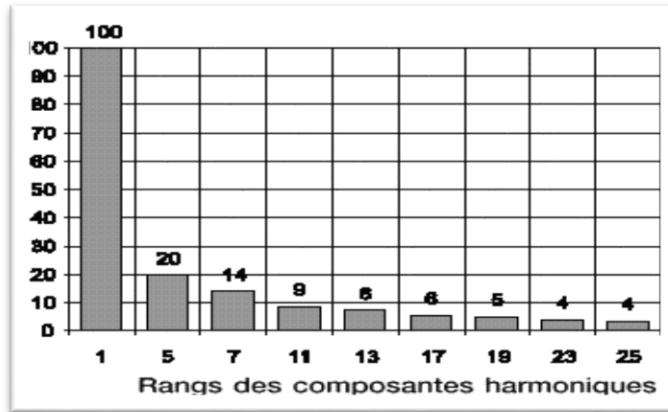


Figure 2.1 : Spectre harmonique théorique.

Le spectre précédent correspond à un taux de :

$$\text{THDI} (\%) = 100 \frac{\sqrt{I_5^2 + I_7^2 + I_{11}^2 + \dots}}{I_1} \dots\dots\dots (2.2)$$

Soit THDI (%) ≈ 30%

Dans le cas considéré, la distorsion en tension est nulle, la source étant supposée avoir une impédance nulle (puissance infinie).

- **Observations réelles :**

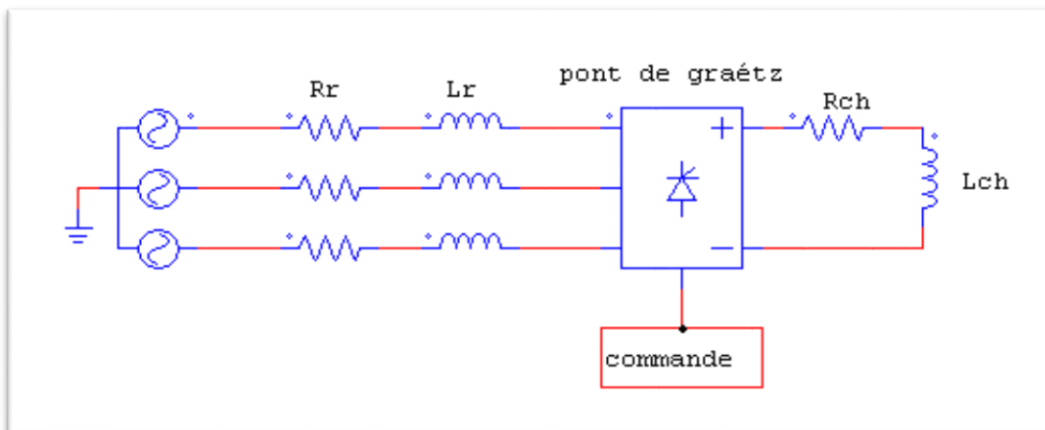


Figure 2.8 : Redresseur hexa phasé ou pont de Graëtz.

**Paramètres de la simulation [11] :**

Réseau :  $V_{\text{alim}} = 230 \text{ V}$ ,  $r = 0.25 \Omega$ ,  $L = 1\text{mH}$ .



# CHAPITRE 2 : DEPOLLUTIONS HARMONIQUES

Charge :  $R_{ch} = 10\Omega$  ,  $L_{ch} = 2\text{Mh}$ .

## Simulation et interprétation :

En réalité, plusieurs phénomènes modifient cette valeur théorique est amènant a une distorsion en tension. Les variations du courant ne sont pas instantanées et il se produit un phénomène d'empîement<sup>1</sup> lors de la commutation. Le courant de ligne n'est pas exactement rectangulaire et son contenu harmonique est un peu modifié. L'impédance de lissage n'est pas infinie est le courant redressé présente une ondulation. La forme réelle des courants d'entrée est de sortie du redresseur est donné par les figures (2.9) (2.10)

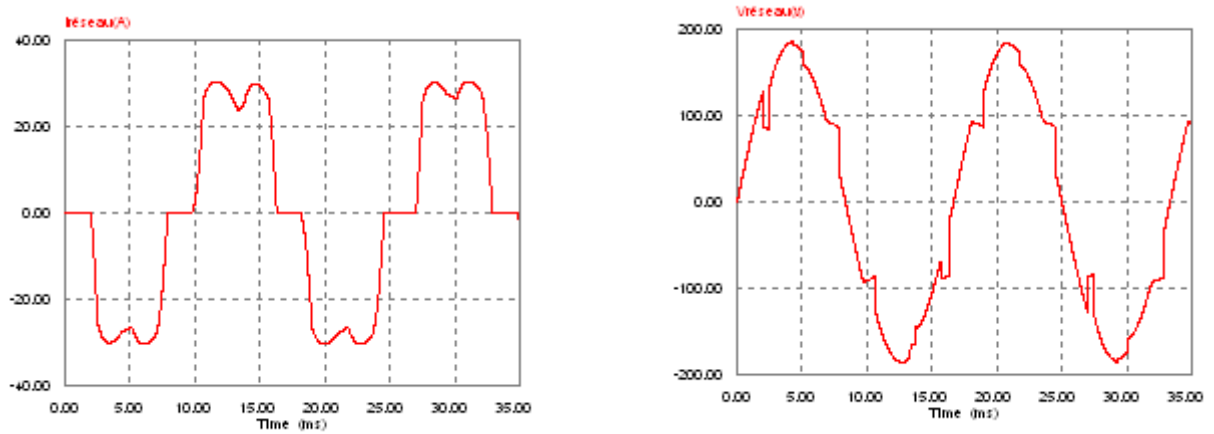


Figure 2.9 : Forme réelle de courant et tension d'entrée du redresseur 6 pulses

(Retard à l'amorçage  $\varphi = \pi / 6$  )

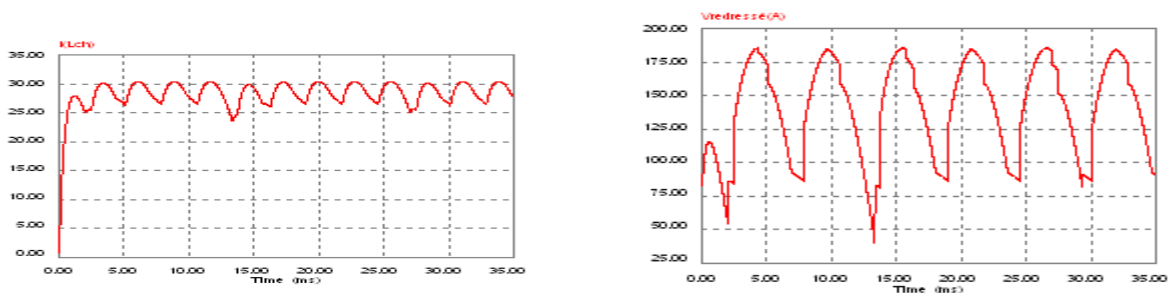


Figure 2.10 : Forme réelle de courant et tension de sortie du redresseur 6 pulses

(Retard à l'amorçage  $\varphi = \pi / 6$  )

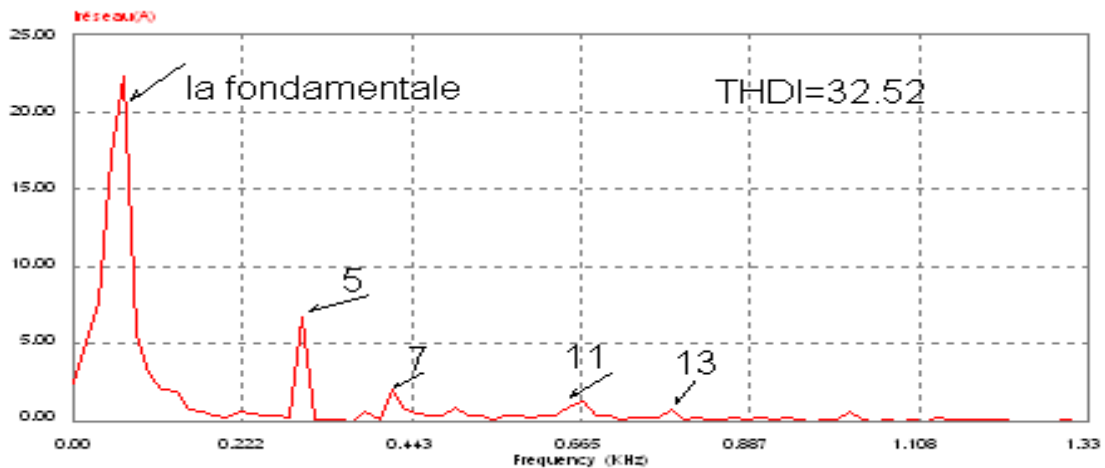


Figure 2.11 : Spectre harmonique de la tension d'alimentation

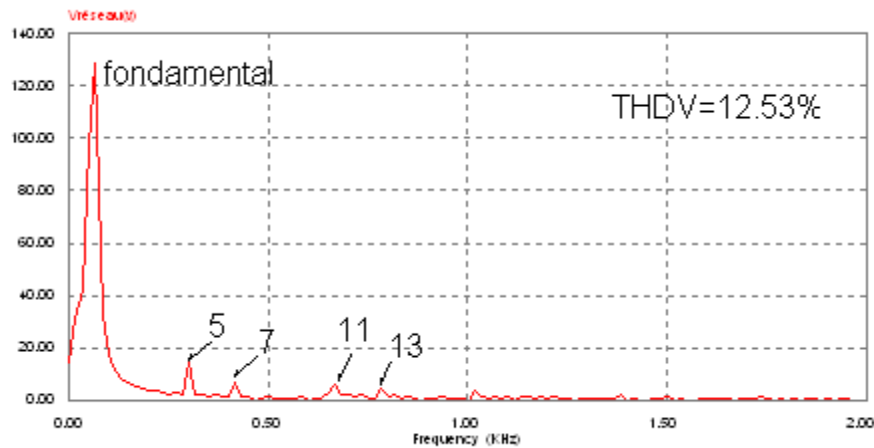


Figure 2.12 : Spectre harmonique des courants du redresseur 6 pulses

Les figures 2.11, 2.12 illustrent bien le spectre harmonique des courant réels. On constate une importance accrue de l'harmonique  $H_5$  est une diminution de  $H_7$ ,  $H_{11}$  et  $H_{13}$  par rapport aux valeurs théoriques. Alors que les harmoniques de rang  $3k$  ( $k$ =entier) ont disparu et le THDI correspondant est de 32.52 % proche de la valeur théorique 30 %.

On constate aussi que la tension du réseau V réseau est infectée par les courants harmoniques ce qui induit un taux de distorsion  $THDV=12.53\%$ .

## CHAPITRE 2 : DEPOLLUTIONS HARMONIQUES

### a.2. Redresseur dodécaphasé :

- **Principe :**

Le redresseur Dodécaphasé ou 12 pulses est réalisé en raccordant en parallèle deux redresseurs hémiphases pour alimenter un bus continu commun. Côté entrée, les redresseurs sont alimentés par un transformateur à trois enroulements ou par deux transformateurs à deux enroulements. Dans les deux cas, les secondaires des transformateurs sont déphasés de 30°. La figure 2.13 montre le principe d'un redresseur dodécaphasé :

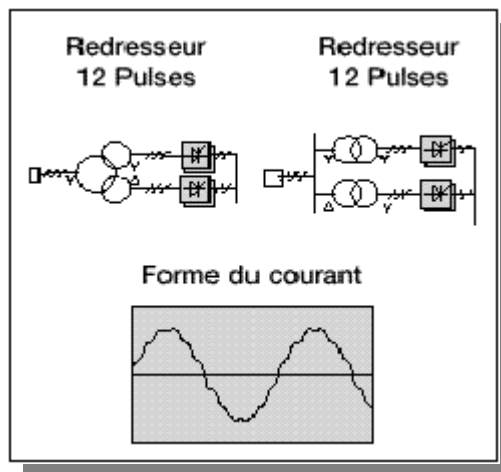


Figure 2.13 : Redresseur dodécaphasé.

- **Distorsion théorique en courant et en tension :**

Avec l'hypothèse d'une impédance amont du redresseur nulle et d'un courant continu parfaitement lissé la valeur efficace de chaque harmonique de courant est de la forme  $i_n = \frac{i_1}{n}$  avec  $n=12k\pm 1$ .

Le taux de distorsion théorique est donc :

## CHAPITRE 2 : DEPOLLUTIONS HARMONIQUES

$$THDI (\%) = 100 \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} (i_{12k+1}^2) (i_{12k-1}^2)}}{i_1} \dots\dots\dots (2.3)$$

Soit THDI (%) ≈ 15% ce qui représente la moitié de la valeur obtenue avec un seul redresseur.

**Avantage :**

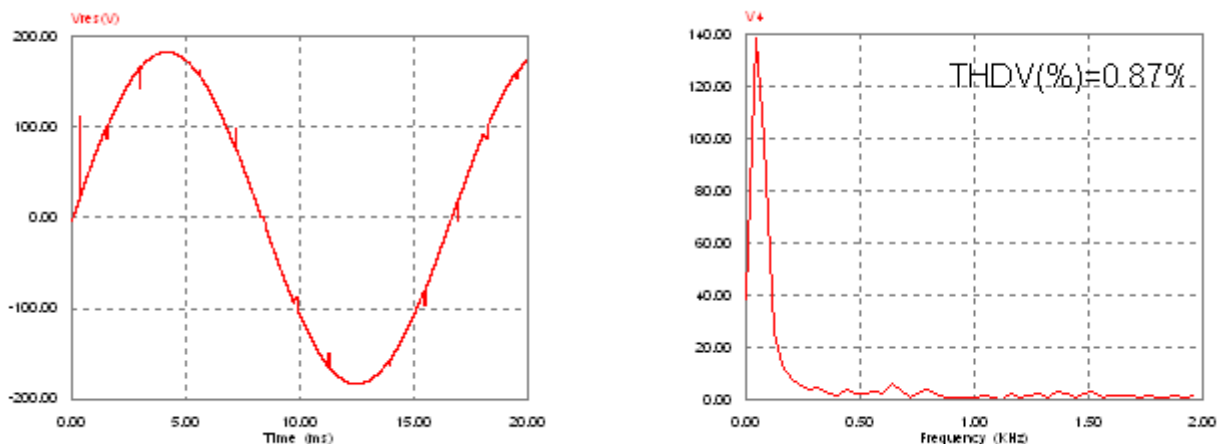
L'avantage de cette solution est que du côté réseau, certains harmoniques se trouvent en opposition de phase et donc supprimés. En théorie, la composante harmonique de plus faible fréquence vue côté primaire du transformateur est l'harmonique de rang 11.

**Inconvénient :**

L'inconvénient majeur de cette solution est le recours à des transformateurs de conception spéciale et le surcoût par rapport à un redresseur 6 pulse.

- **Simulation et interprétation :**

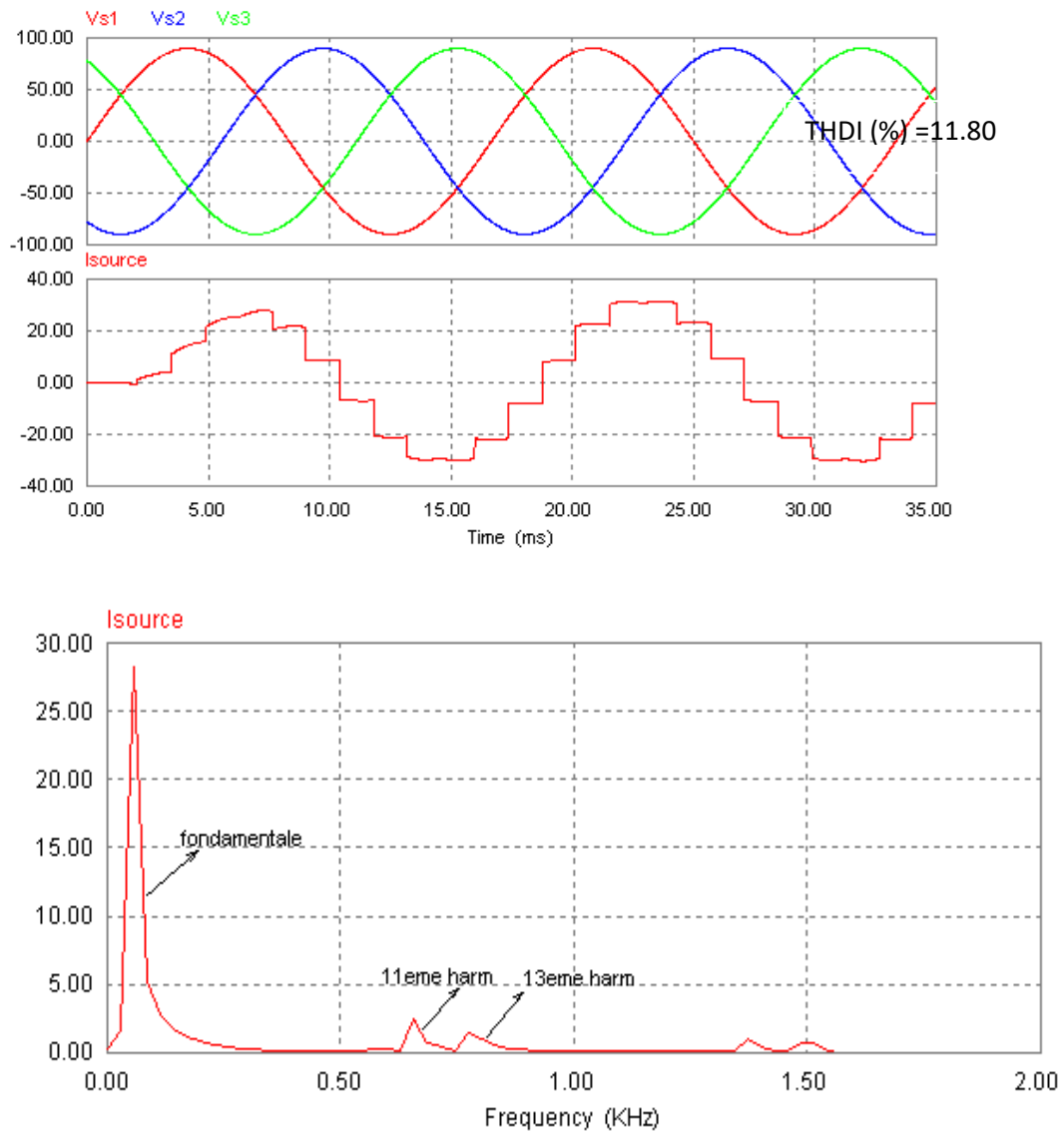
On conserve les mêmes paramètres de simulation que le redresseur à 6 pulse, sachant que chaque secondaire délivre une tension de valeur efficace 115V et le primaire est alimenté par un réseau délivrant une tension de 230V ,50Hz.



**Figure 2.14** Tension du réseau et son spectre harmonique correspondant

Le taux de distorsion en courant égale à 11.8% qui est égale à la moitié du THDI d'un pont redresseur à 6 pulses. La figure 2.15 montre le courant de ligne absorbée par le primaire du transformateur.

En remarque l'amélioration du le taux de distorsion en tension qui égale à 83% par



**Figure 2.15 :** Courant du pont dodécaphasé est son spectre Harmonique correspondant

On remarque la présence des harmoniques de rang  $12k \pm 1$  (11,13...) avec k entier dans le spectre harmonique du courant du redresseur dodécaphasé, inversement aux courants du redresseur métaphase qui comportent les rang  $6k \pm 1$ .

Donc le montage dodécaphasé série à permet d'éliminer les harmoniques de rang  $6k \pm 1$  (avec k impair) générées par le pont redresseur hémaphasé.

On conclusion on peut établir le tableau 2.3 qui résume les taux de distorsion en courant des deux structures précédentes.

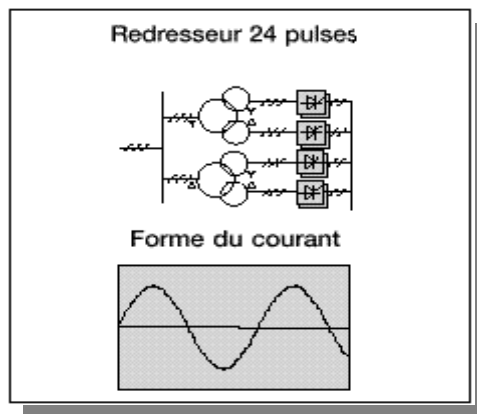
## CHAPITRE 2 : DEPOLLUTIONS HARMONIQUES

Type de structure	THDI (%)		THDV (%)		Rang des harmoniques existants	Rang des harmoniques éliminées
	Théorique	Réel	Théorique	Réel		
Pont triphasé de greatz ( <b>6 pulses</b> )	30	32.52	0	12.53	$6k \pm 1$ k entier naturel	Pairs et impairs multiples de trois
Pont Dodécaphasé série ( <b>12 pulses</b> )	15	11.80	0	0.87	$12k \pm 1$ k entier naturel	

**Tableau 2.3 :** THD et harmoniques des montages étudiés

### a.3. Redresseur 24 pulses :

Le principe du redresseur 24 pulses est illustré à la figure II.16. Il comporte deux redresseurs 12 pulses en parallèle avec deux transformateurs à trois enroulements dont les enroulements primaires sont déphasés de 30°.



**Figure 2.16 :** Redresseur 24 pulses

Les seuls harmoniques restants sont alors de rang  $n = 24k \pm 1$ , les premiers harmoniques de courant sont donc les harmoniques 23 et 25 et les suivants 47 et 49. Pratiquement tous les harmoniques de basse fréquence sont supprimés

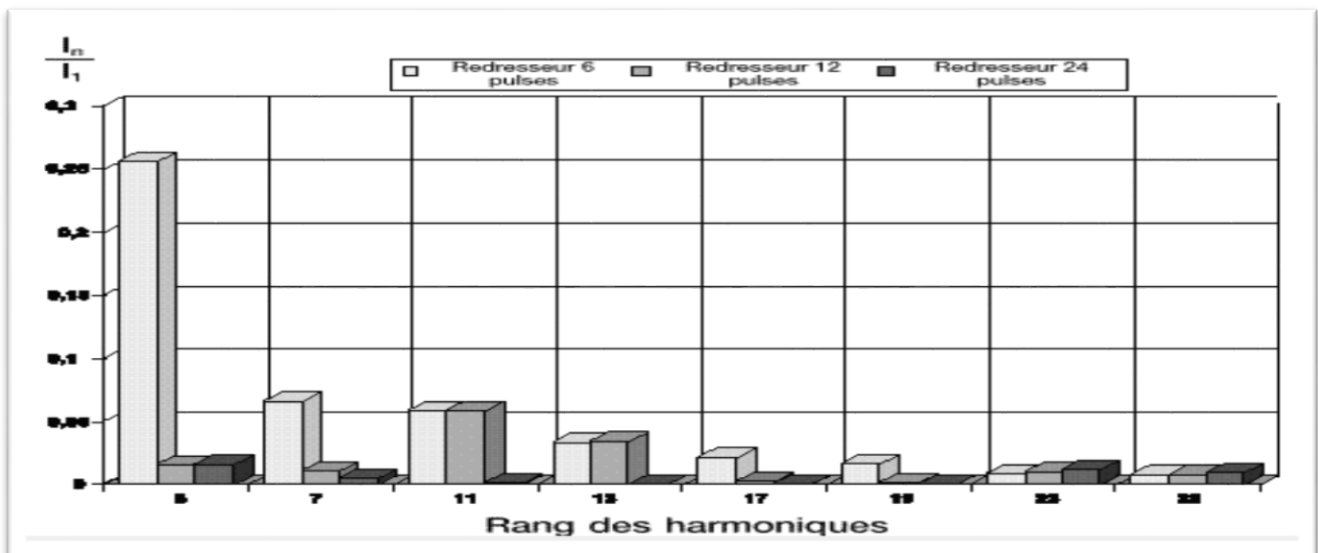
## CHAPITRE 2 : DEPOLLUTIONS HARMONIQUES

- **Avantage :**

L'avantage de cette solution que pratiquement tous les harmoniques basses fréquences sont supprimés. Dans le cas d'une installation mono entraînement de forte puissance ou multi entraînement importante, un système 24 pulses peut constituer la solution la plus économique avec les distorsions harmoniques les plus faibles.

- **Inconvénient :**

Son coût élevé et complexe et en conséquence, son utilisation est réservée aux équipements de forte puissance.



**La figure 2.17 :** Montre le spectre harmonique du courant avec différents redresseurs.

Ces montages sont intéressants dans la mesure où ils permettent d'obtenir des taux de distorsion en courant et en tension relativement faibles. Ils sont l'inconvénient d'être complexe et coûteux et en conséquence, leur utilisation est réservée aux équipements de forte puissance.

### **b. Le filtrage actif :**

C'est la solution qui semble être la plus révélatrice et la plus encourageante pour contrer les harmoniques par les résultats très satisfaisants qu'elle offre. Son seul handicap actuel, qui s'oppose à son déploiement dans tous les réseaux électriques de tous les pays du monde, est le problème de surcoût.

La présentation détaillée de cette solution est le cœur de prochain chapitre et fera l'objet de la suite, notamment de la partie simulation.

### **2.4. Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue les différents moyens de mitigation contre la pollution harmonique. ET Nous avons présenté plusieurs solutions traditionnelles et modernes de dépollution. La solution classique à base de filtres passifs est souvent pénalisée en termes d'encombrement et de résonance. De plus, les filtres passifs ne peuvent pas s'adapter à l'évolution du réseau et aux charges polluantes.

Le surdimensionnement des éléments composant le réseau, le transformateur de mise à la terre, les transformateurs déphaseurs, le filtrage passif et le filtrage actif sont toutes des méthodes qui sont utilisées pour minimiser les harmoniques et certaines de leurs conséquences.

Le filtrage passif ainsi que le filtrage actif se sont clairement démarqués dans le monde industriel lors des dernières décennies. De par ses sur le filtre passif, le filtre actif constitue la voie par excellence pour, non seulement compenser les harmoniques, mais pour améliorer la qualité de l'énergie du réseau électrique.

Le filtre actif parallèle c'est la meilleure méthode pour minimiser les effets de la pollution harmonique. Suite à ça nous avons choisis cette méthode qui sera un peu détaillé dans le prochain chapitre ou nous allons montrer la structure des filtres actifs suivis d'une simulation.



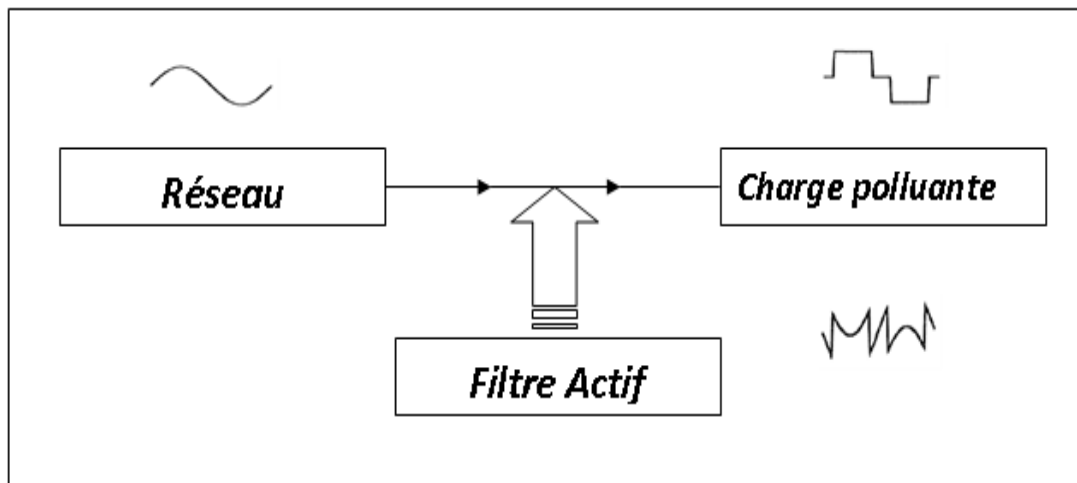
# Chapitre 3 : Généralités sur les filtres actifs d'harmoniques

## 3.1. Introduction :

Les filtres actifs sont des structures qui fonctionnent dans un mode à puissance active nulle. Ils utilisent une source contrôlable pour introduire la tension ou le courant dans le réseau, présentant ainsi une forme d'onde qui compense les harmoniques. Donc son principe consiste à générer, en opposition de phase, les courants ou tensions harmoniques présent sur le réseau, afin de les annuler ou les diminuer par connexion au réseau.

## 3.2. Principe du filtre actif :

Le principe du filtre actif consiste à générer des harmoniques en opposition de phase à ceux existant sur le réseau. Ceci peut être schématisé sur la figure 3.1



**Figure 3.1.** Schéma de principe d'un filtre active

Alors le courant absorbé par la charge polluante est non sinusoïdal, le courant créé que par le filtre actif est tel que le courant absorbé au réseau est sinusoïdal [11,12].

Les filtres ont pour but d'injecter sur le réseau soit :

- ✚ Des harmoniques de courant dans le cas d'un filtre actif parallèle.
- ✚ Des harmoniques de tension dans le cas d'un filtre actif série.
- ✚ Soit les deux dans le cas de filtres hybrides. [12]

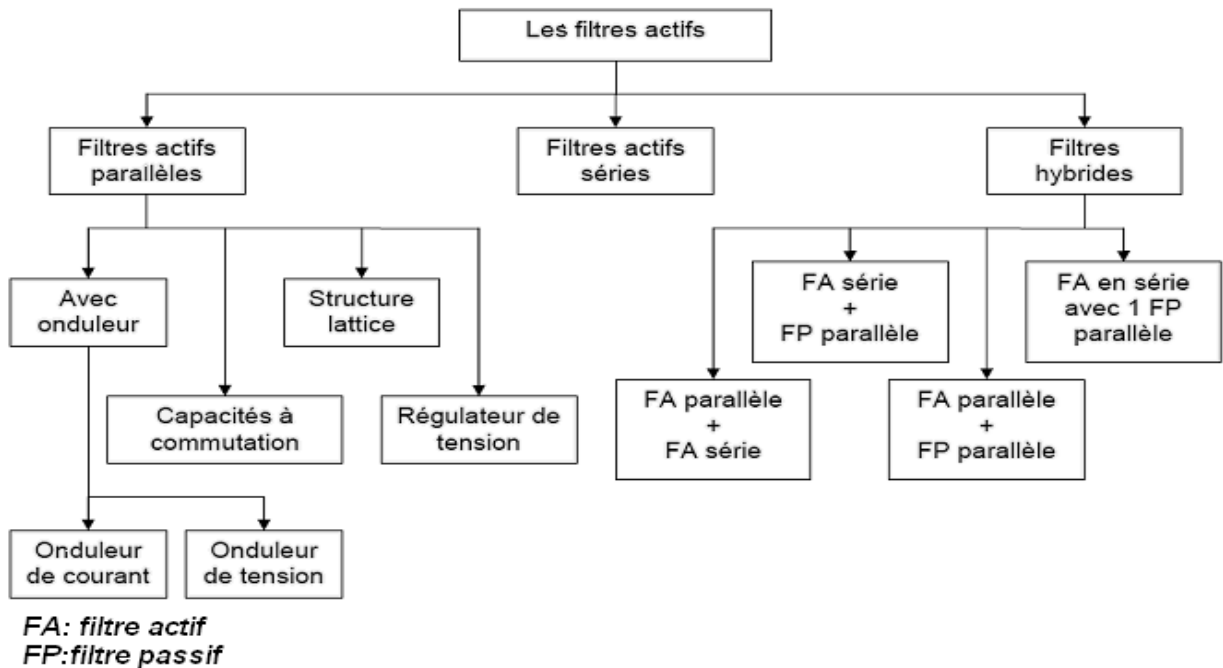


Figure 3.2 : Les différents types de filtres actifs [12]

### 3.1.1. Structure générale d'un filtre actif :

Un filtre actif est composé de deux parties comme le montre la figure 3.3 la partie puissance est constituée d'un circuit de stockage d'énergie, d'un onduleur destiné à répartir le courant dans les différentes phases et un filtre de sortie destiné a réaliser l'interface entre le réseau et l'onduleur. La partie contrôle tient compte du circuit de stockage d'énergie, du filtre de sortie et des harmoniques sur le réseau et permet d'actionner le circuit onduleur.

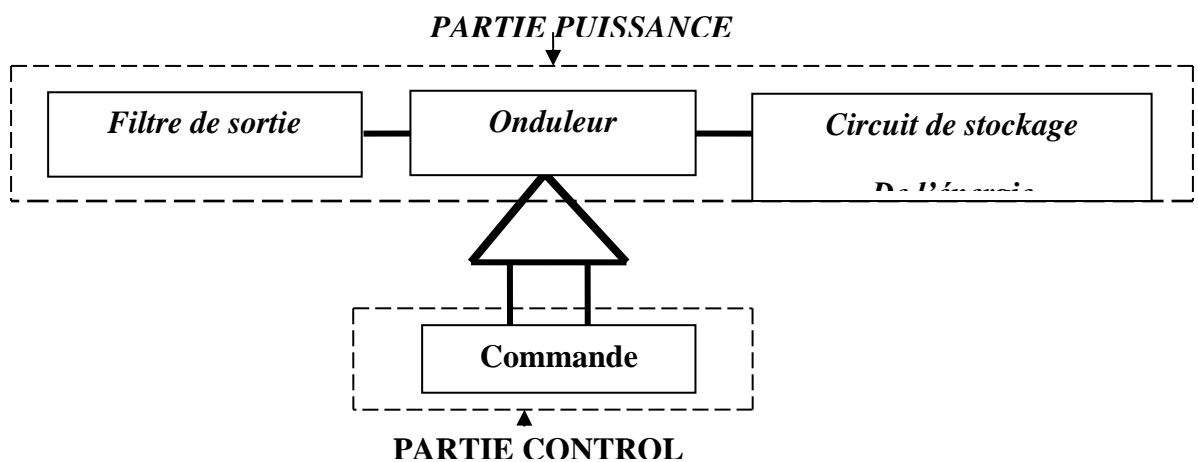


Figure 3.3 : Structure générale d'un filtre actif.

# Chapitre 3 : Généralités sur les filtres actifs D'harmoniques

## 3.1.2. Les différents types de filtres actifs :

### a. Filtre Actif Série (FAS) :

Les filtres actifs séries injectent une tension, sur le réseau, qui est ajoutée à la tension de source pour maintenir une tension purement sinusoïdale aux bornes de la charge. Le but est de protéger les installations sensibles à toutes perturbations de la tension fournie par le réseau. Cependant, le filtrage actif série ne permet pas de compenser les harmoniques de courant créés par la charge.

Le principe des filtres actifs séries est montré en Figure 3.4 Ci-dessous

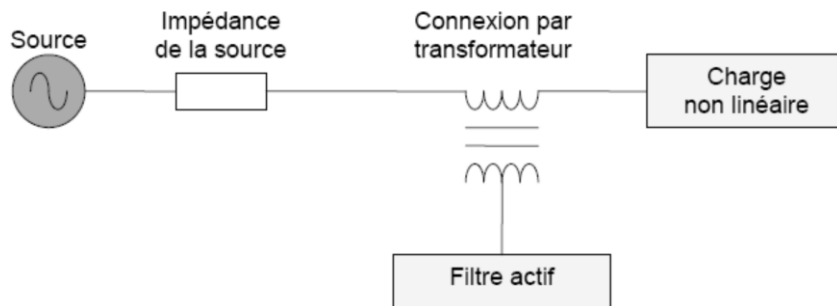


Figure 3.4 : Le principe des filtres actifs séries [12]

### b. Filtre Actif Parallèle (FAP) :

Cette classe de filtre constitue la configuration la plus largement répandue dans les procédés industriels. Le filtre est connecté au circuit principal de puissance comme montré dans la Figure 3.5

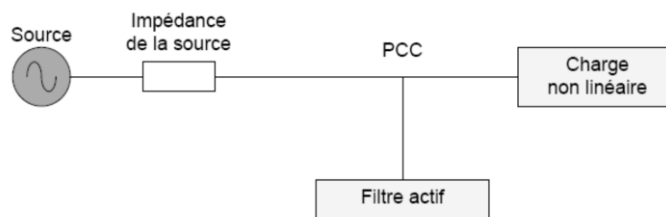


Figure 3.5: Le principe des filtres actifs parallèles [12]

# Chapitre 3 : Généralités sur les filtres actifs D'harmoniques

## 3.3. Filtre actif Parallèle :

Le filtre actif parallèle injecte dans le réseau les harmoniques de courant consommés par la charge de telle sorte que le réseau ne fournisse plus que le courant fondamental comme on peut le voir sur la Figure 3.6

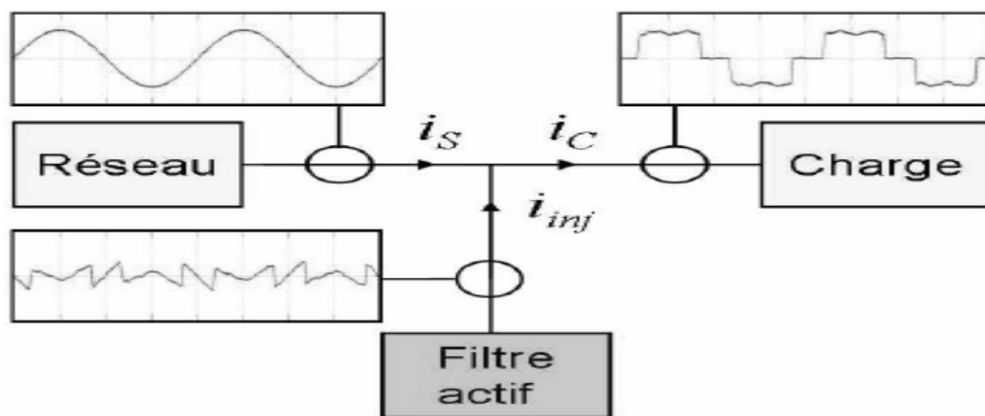


Figure 3.6 : Visualisation des courants mis en jeu [12]

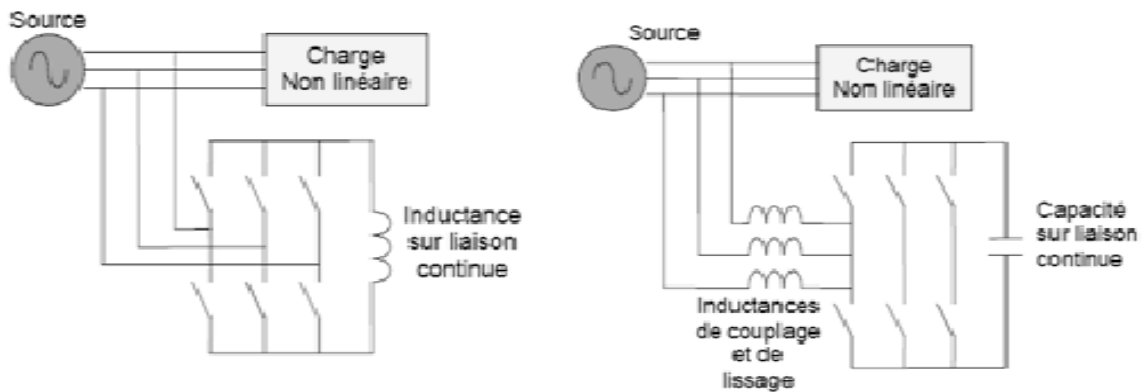
Le but de ce type de filtre est d'annuler les harmoniques de courant que la charge fournit à la source, il peut également contribuer à la compensation de la puissance réactive et équilibrer les 3 phases du courant.

Les filtres actifs parallèles ont l'avantage d'apporter seulement le courant de compensation et un peu du fondamental du courant fournit pour compenser les pertes du système. Il est aussi possible de connecter plusieurs filtres en parallèle pour approvisionner des courants importants, ce qui rend ce type de circuit adapté pour une large gamme de puissance.

Les filtres actifs parallèles de puissance se répartissent en 4 catégories distinctes de circuit :

- ✚ Les filtres actifs parallèles avec onduleur de courant ou de tension voire la figure (3.7)
- ✚ Les filtres actifs parallèles avec capacités à commutation voire la figure (3.8)
- ✚ Les filtres actifs parallèles avec structure lattice voir la figure (3.9)

Les filtres actifs parallèles avec régulateur de tension voir la figure (3.10)



Filtre actif parallèle avec

Onduleur de courant

Filtre actif parallèle avec onduleur

de tension

Figure 3.7 : Les filtres actifs parallèles avec onduleur [12]

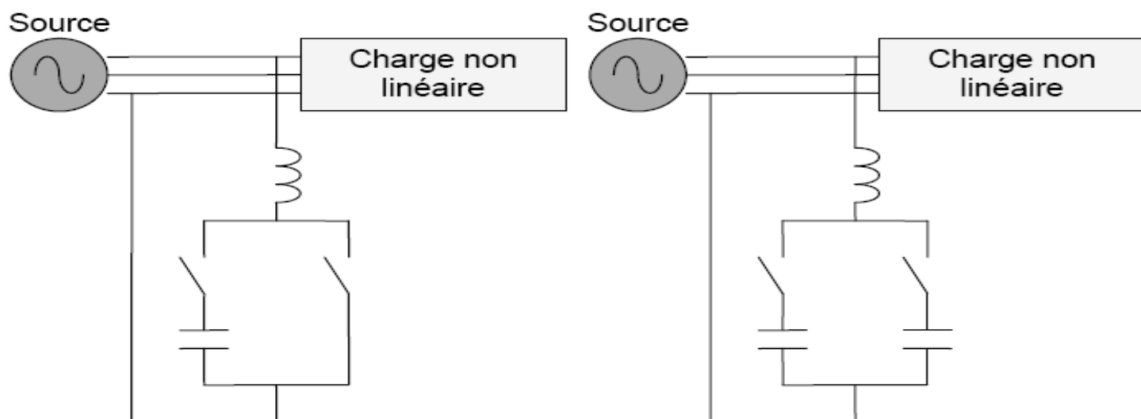


Figure 3.8 : Les filtres Actifs parallèles avec capacités à commutation [12]

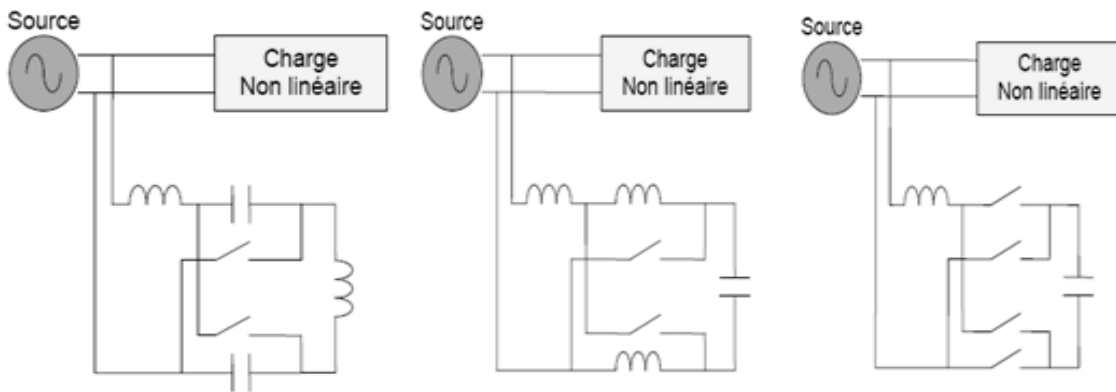


Figure 3.9 : Les filtres actifs parallèles avec structure lattice [12]

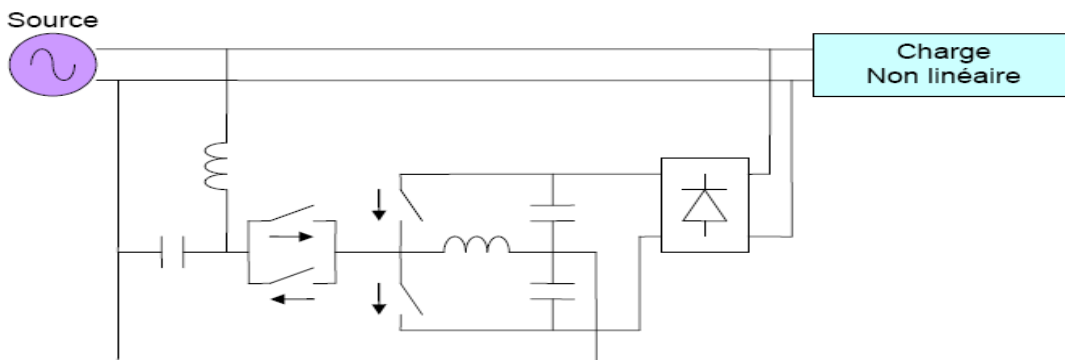


Figure 3.10 : Les filtres actifs parallèles avec régulateur de tension [12]

### 3.4. Les avantages et les inconvénients des filtres actifs parallèles :

Le filtre actif parallèle peut-être une solution de filtrage économique pour la compensation d'harmonique sous les conditions suivantes :

- L'amplitude des harmoniques de courant est limitée.
- Il y a un déplacement des contraintes du facteur de puissance sous des conditions de charges légères.

- Si les interactions avec le filtre passif sont un problème (ce qui est généralement le cas pour les charges de puissances moyennes et faibles) sinon le filtre passif est plus approprié.
- Pour les charges industrielles de puissances apparentes faibles et moyennes, où les efforts de développement et les coûts d'installation sont une très grosse part des coûts globaux du système final.

### 3.4.1. Les avantages des filtres actifs parallèles sont les suivants :

- Ils peuvent être installés avec des coûts de développement et d'installation minimaux et sont très bien adaptés aux charges industrielles de puissances apparentes faibles à moyennes.
- Ils ne créent aucun problème de déplacement du facteur de puissance.
- Ils ne nécessitent pas de condensateurs de découplage à la sortie de l'onduleur.
- Plusieurs filtres peuvent être utilisés pour augmenter les capacités de charge.
- Les filtres actifs parallèles ne nécessitent pas d'appareil de protection coûteux.

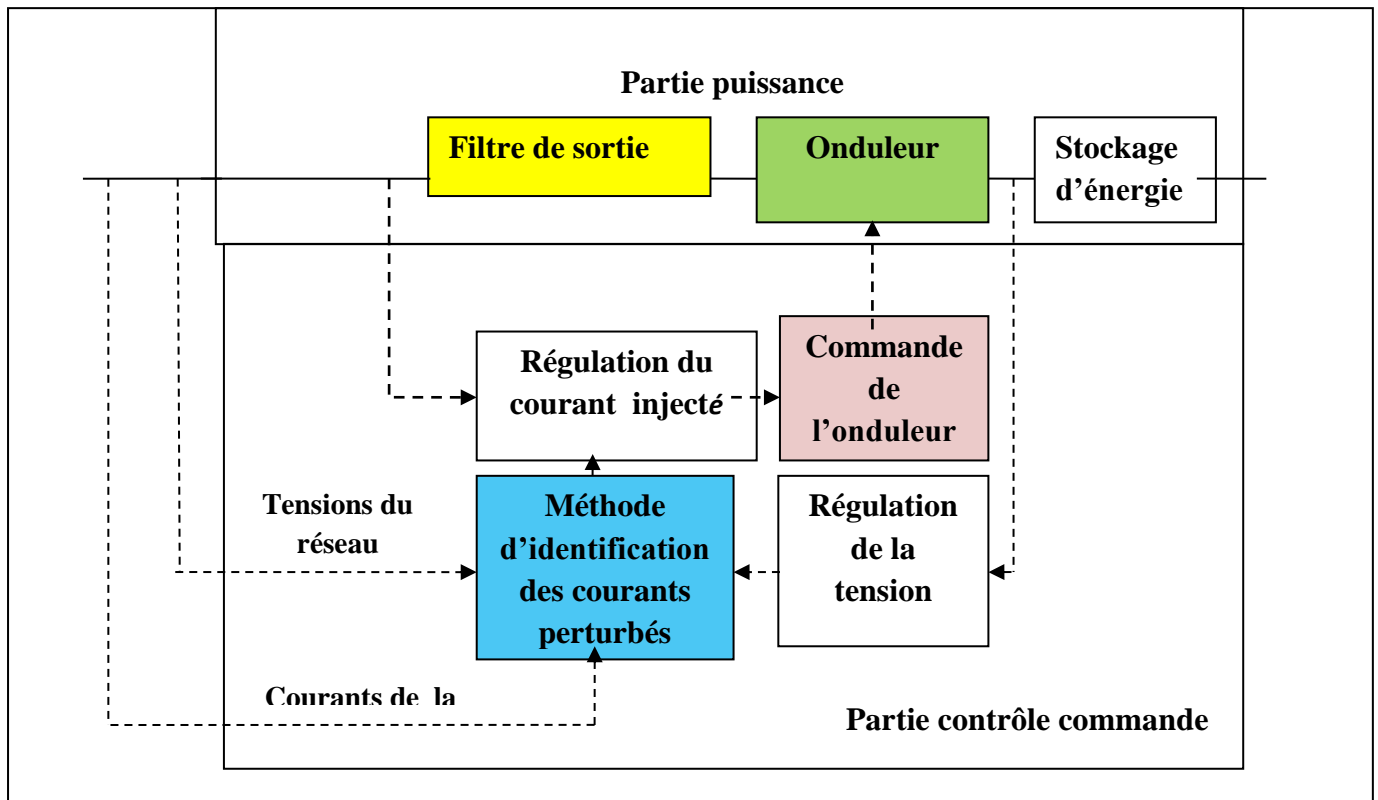
### 3.4.2. Les principaux défauts des filtres actifs parallèles sont :

- Les filtres actifs parallèles peuvent poser des problèmes pour la compensation à des niveaux de puissances élevés.
- Les onduleurs MLI génèrent des harmoniques qui peuvent circuler dans des filtres passifs qui seraient connectés au système.

Ainsi pour cette étude c'est le FAP qui a été retenu car il répond principalement à la problématique des harmoniques de courant qui est la plus cruciale actuellement, tout en restant simple à mettre en œuvre et offre de très bonnes performances.

## 3.6. Structure du filtre actif parallèle :

Un filtre actif est composé de quatre parties comme le montre la figure suivante :



**Figure 3.11 :** Structure générale du filtre actif parallèle

La structure générale du filtre actif parallèle se compose de deux blocs :

**1. La partie puissance est constituée :**

- a) 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,
- b) D'un circuit de stockage d'énergie, souvent capacitif,
- c) D'un filtre de sortie.



## 2. La partie contrôle-commande quant à elle est constituée :

- a) De la méthode d'identification des courants perturbés
- b) De la régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie,
- c) De la régulation du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension,
- d) De la commande de l'onduleur de tension.

### 3.6.1. La partie puissance

#### a. L'onduleur :

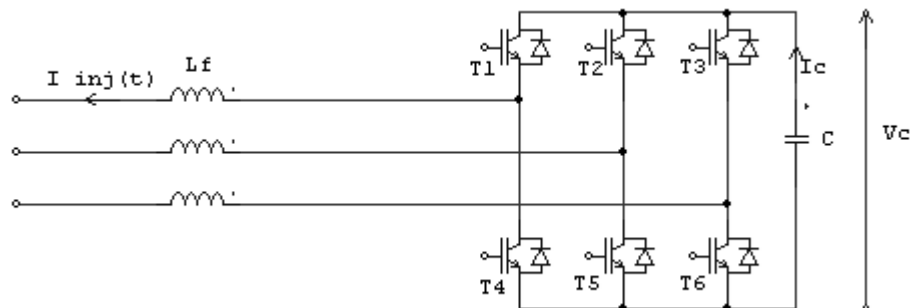
Un onduleur est un convertisseur statique, assurant la conversion continue – alternative. Par exemple si on dispose à l'entrée d'une tension continue et c'est grâce à des semi-conducteurs, on relie chacune des bornes du récepteur tantôt à l'une tantôt à l'autre borne d'entrée, on peut obtenir entre les bornes du récepteur de tension positive,

Il existe deux types d'onduleurs :

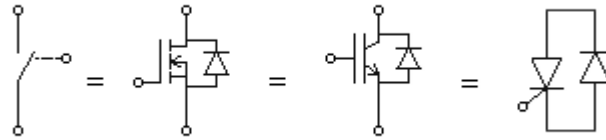
- ✓ Onduleur de tension : alimenté par une source de tension continue.
- ✓ Onduleur de courant : alimenté par une source de courant continu.

- **Onduleur de tension :**

L'onduleur triphasé à structure de tension 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. Cet onduleur de tension est représenté par la figure 3.12 :



**Figure 3.12** : Schéma électrotechnique d'un onduleur tension

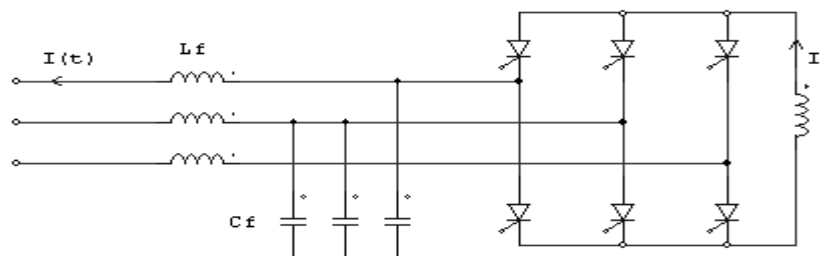


**Figure 3.13** Interrupteurs correspondant à la structure tension

- **Onduleur du courant :**

La structure électrotechnique d'un onduleur courant ou commutateur de courant est schématisée par la figure 3.14 ; il s'agit de commuter un courant dans les différentes phases [11] Le circuit de stockage d'énergie se fait par l'inductance qui joue le rôle d'une source de courant continu. Le courant il traversant cette inductance est maintenu quasiment constant pour ne pas dégrader les performances de cet onduleur.

L'onduleur de courant est relié au réseau par l'intermédiaire d'un filtre passe-bas du second ordre constitué d'une inductance  $L_f$  et d'une capacité  $C_f$ . Ainsi le courant  $i_f$  du filtre actif est égal au courant délivré par l'onduleur filtré par le filtre LC dont la fréquence propre est  $(1/2\pi L_f C_f)$ . La bande passante du filtre actif est donc essentiellement imposée par le choix de  $L_f$  et de  $C_f$ . Ceux-ci peuvent être dimensionnés de manière à atténuer la fréquence de commutation des interrupteurs de l'onduleur. Les interrupteurs sont unidirectionnels. Ils sont formés par des transistors commandés à l'ouverture et à la fermeture, ceux-ci ne pouvant supporté de tension inverse ils nécessitent une diode en série [13] comme le montre la figure 3.14 [12].



**Figure 3.14** : Schéma électrotechnique d'un onduleur courant

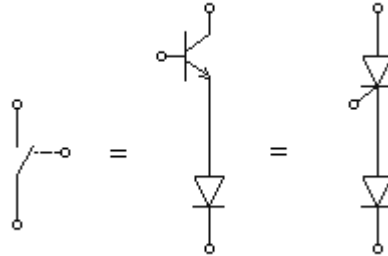


Figure 3.15 Interrupteurs correspondant à la structure courante

### b. Circuit de stockage d'énergie, souvent capacitif :

Le stockage de l'énergie est réalisé côté continu à l'aide d'un système de stockage capacitif, représenté par un condensateur  $C_{dc}$  jouant le rôle d'une source de tension continue.

Une valeur élevée de  $C_{dc}$  réduit les ondulations de  $v_{dc}$  mais augmente le coût et la taille du FAP [10].

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

### c. Filtre de sortie :

Le filtre de sortie est un filtre passif utilisé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique. Le filtre de sortie est dimensionné afin de satisfaire à deux critères :

- ✚ Assurer la dynamique en courant, définie par :

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{di_{ref}}{dt}$$

- ✚ Empêcher la propagation sur le réseau électrique des harmoniques générés par les commutations. Un filtre de sortie du premier ordre est le plus souvent utilisé dans la littérature [13].

# Chapitre 3 : Généralités sur les filtres actifs D'harmoniques

## 3.6.1. La partie contrôle-commande :

### a. Introduction :

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 :

- 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 [8]. C'est pourquoi cette méthode de détection sera employée dans ce travail.

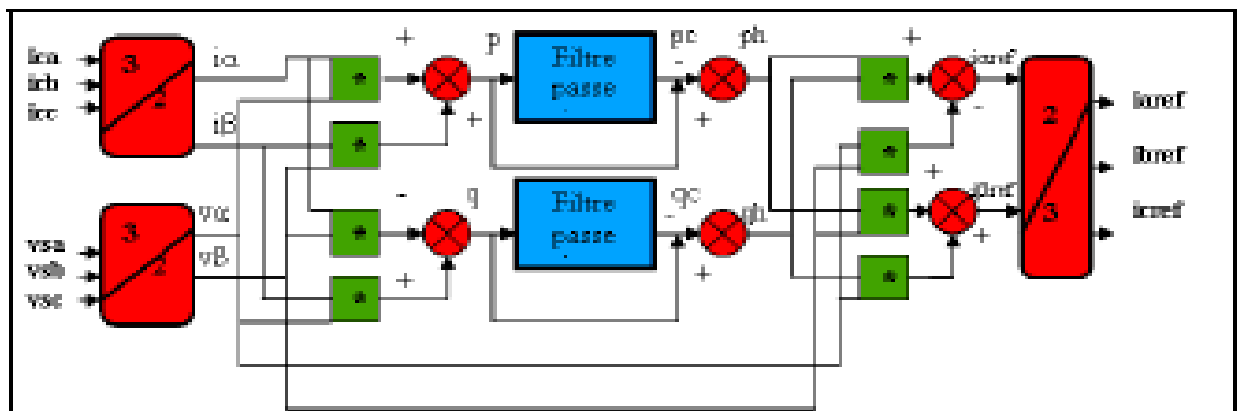


Figure 3.16 : Bloc fonctionnel de calcul des courants de référence

### b. Méthode d'identification des courants perturbés :

Les différentes méthodes d'identification du courant perturbateur, peuvent être regroupées en deux familles.

- 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. [3]

- 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 utilisés 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 totale

Le but essentiel de cette procédure est la réduction de la taille du système à résoudre. En effet, au lieu d'avoir un système de six équations, on n'aura qu'à résoudre un système de quatre équations données par l'expression. (3.1). (3.2)

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \dots\dots\dots(3.1)$$

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \dots\dots\dots(3.2)$$

Après avoir obtenu les tensions  $v_\alpha, v_\beta$ , et les courants  $i_\alpha, i_\beta$ , on passe à la détermination des puissances instantanées réelle et imaginaire dans le but d'en extraire les composantes harmoniques.

Les expressions des puissances instantanées réelle et imaginaire sont données par le système matriciel. (3.3)

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_\alpha & i_\beta \\ -i_\alpha & i_\beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \dots\dots\dots(3.3)$$

Avec :  $p$  : la puissance instantanée réelle en [W].

$q$  : est la puissance instantanée imaginaire en [var]

# Chapitre 3 : Généralités sur les filtres actifs D'harmoniques

---

Ces puissances peuvent être décomposées en composantes continues  $p_c$ ,  $q_c$ , plus des composants alternatifs  $p_h$ ,  $q_h$  relatives aux harmoniques.

$$\begin{aligned} p &= p_c + p_h \\ q &= q_c + q_h \end{aligned} \dots\dots\dots(3.4)$$

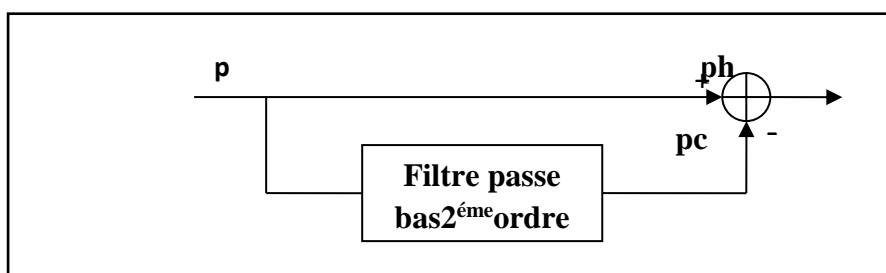
L'étape qui suit consiste à éliminer les composantes continues afin de ne conserver que les composantes alternatives relatives aux composantes harmoniques recherchées. Ceci est faisable par simple utilisation d'un filtre passe bas.

L'ordre de ce filtre passe-bas définit la dynamique et l'efficacité de la méthode d'identification.

Des filtres de puissance du quatrième ou cinquième ordre ont été proposés [9]. 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 :

$$F_{pb}(p) = \frac{\omega_n^2}{p^2 + 2\xi\omega_n p + \omega_n^2} \dots\dots\dots(3.5)$$

Avec :  $p$  opérateur de Laplace égal à  $j\omega$ ,  $\omega_n$  fréquences propre du filtre,  $\xi$  est le dépassement ou le coefficient d'amortissement.



**Figure 3.17** : Schéma représentant le principe de séparation des puissances  
à l'aide d'un filtre passe bas 2<sup>ème</sup> ordre

Les courants en quadrature de référence  $i_{\alpha ref}$  &  $i_{\beta ref}$  sont données par l'équation

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha ref} \\ i_{\beta ref} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2}} \cdot \begin{bmatrix} v_{\alpha} & -v_{\beta} \\ v_{\alpha} & v_{\beta} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_h \\ q_h \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3.6)$$

Par une simple utilisation de la transformation de Concordia inverse définie par l'équation ci-dessous (3.7), on arrive au courant de référence  $i_{ref}$  mentionné dans la figure. 3.18

Les courants de référence sont donnés par l'équation :

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha ref} \\ i_{\beta ref} \\ i_{cref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{\alpha ref} \\ i_{\beta ref} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3.7)$$

La figure 3.18 montre l'allure combinée des trois courants  $i_{\alpha ref}$ ,  $i_{\beta ref}$ ,  $i_{cref}$ .

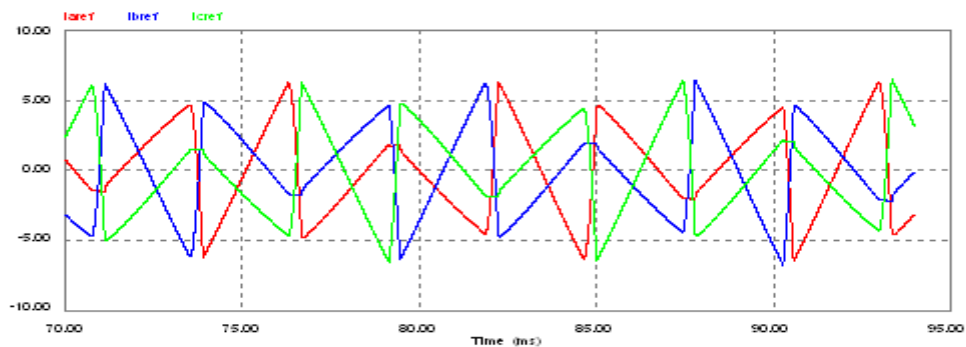


Figure 3.18 : Schéma représentant l'allure des trois courants  $i_{\alpha ref}$  (rouge),  $i_{\beta ref}$  (bleu),  $i_{cref}$  (vert).

### 3.7. La commande de l'onduleur :

Dans notre étude nous avons choisi la commande par MLI

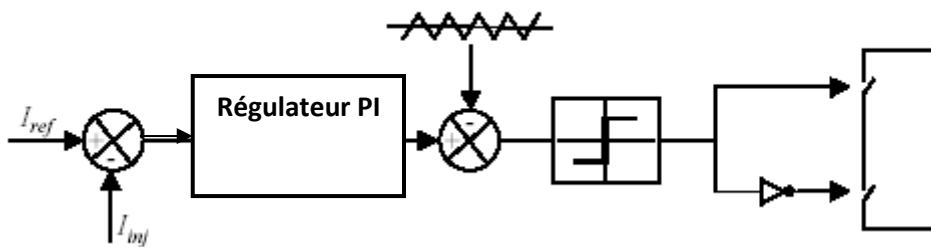
#### 3.7.1. Commande par modulation de largeur d'impulsion

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

La plus simple et la plus connue des modulations de largeur d'impulsion est sans doute la MLI à échantillonnage naturel, dite MLI intersective. Cette technique de commande met en

œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur (modulatrice) à partir de l'écart entre le courant mesuré et sa référence. Cette dernière est ensuite comparée avec un signal triangulaire (porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation).

La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs. Le schéma de principe est donné par la Figure (3.19).



**Figure 3.19 :** Principe de commande des courants par MLI.

Nous avons choisi, dans la suite de notre étude, la technique de commande à MLI à échantillonnage naturel. Cette technique représente en réalité la MLI analogique et pourra être employée dans la partie de simulation profitant en cela de sa facilité de modélisation.

### 3.8. Conclusion :

Dans la première partie de ce chapitre on a présenté le filtrage actif d'une manière générale. En effet, on a globalement expliqué l'intérêt de son utilisation, son principe et on a brièvement présenté sa structure.

Dans la deuxième partie on s'est intéressé d'une façon plus approfondie au filtre parallèle, ou nous l'avons présenté d'une façon détaillée. Car c'est la structure qui se trouve la plus utilisée dans les installations de filtrage.

Ceci est désormais le cœur du prochain chapitre qui est l'étude d'un filtre actif



## 4.1. Introduction

Notre travail est basé sur la configuration parallèle, utilisant un onduleur de tension monophasé. Pour étudier cette configuration, on passera par les étapes suivantes :

- Etape 1: où on montrera l'allure du courant dans la source avant application de toute opération de filtrage, son spectre harmonique contenant les informations sur le THDi.
- Etape 2: consacrée à l'étude de la configuration parallèle, pour le cas d'un onduleur de tension à source d'alimentation constante; on y exposera le circuit de puissance, le bloc d'identification du courant harmonique ainsi que le circuit de commande.

## 4.2. Caractéristiques du courant de source avant filtrage actif

### 4.2.1. Etude théorique de la charge polluante

Les redresseurs sont des charges dites non linéaires parce qu'ils absorbent un courant dont l'allure est différente de celle de la tension qui les alimente.

Dans la figure (4.1), on a considéré un montage redresseur triphasé (pont de Graëtz) à 4 diodes, alimentant une charge continue RL, on va étudier l'influence de ce redresseur sur l'allure du courant fourni par la source  $I_s$ .

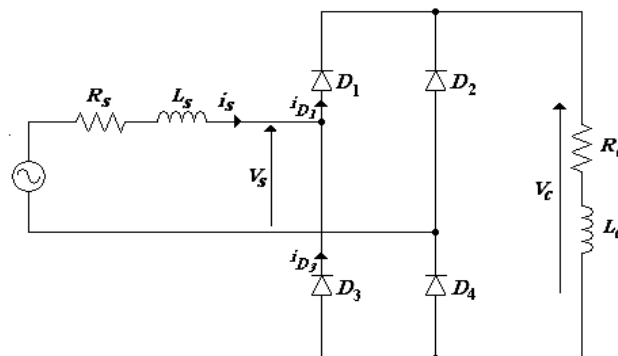
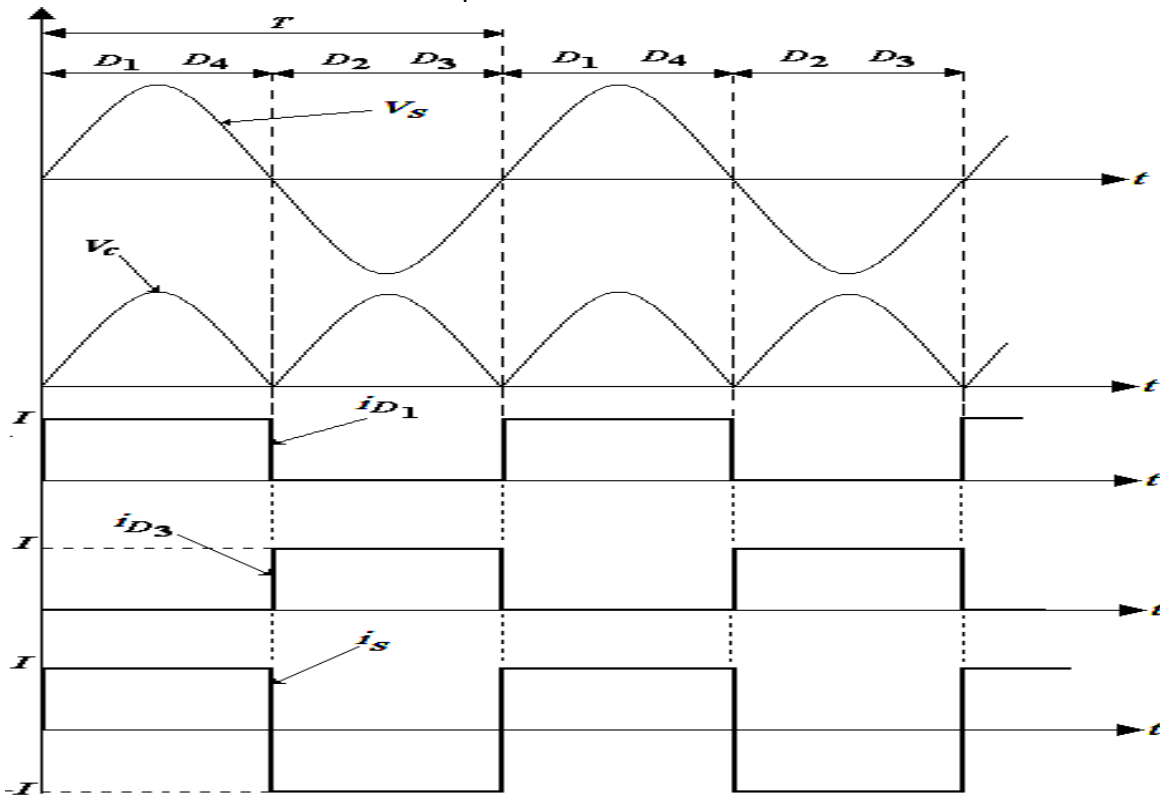


Figure 4.1 : Redresseur monophasé alimentant une charge RL.

La figure (4.2) montre les allures des différents courants et tensions en jeu, en précisant les intervalles de conduction de chaque élément



**Figure 4.2 :** Allures des courants et des tensions dans un montage redresseur double alternance.

D'après la figure (4.2), on remarque que le courant de la source  $i_s$  n'est pas sinusoïdal. Son allure est de forme carrée variant entre  $+ I$  et  $-I$ . Ainsi, son spectre fréquentiel ou harmonique comportera uniquement les rangs  $2n-1$ ,  $n$  étant un nombre entier ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ).

#### 4.2.2. Modélisation de l'ensemble réseaux-charge polluante

Sous les paramètres mentionnés dans le Tableau II, on a construit, sous Matlab-Simulink, le modèle de la figure (4.3).

Parameters		Valeurs numériques
Réseau d'alimentation	Tension efficace $V_s$	230 V
	Fréquence $f$	50 Hz
	Résistance de ligne $R_s$	0.25 m $\Omega$
	Inductance de ligne $L_s$	1.94 $\mu$ H
Charge non-linéaire (Pont de Graëtz à 4 diodes)	Puissance apparente $S$	3.3 kVA
Charge linéaire (aval à la charge non-linéaire)	Résistance de charge DC $R_c$	6 $\Omega$
	Inductance de charge DC $L_c$	50 mH

Tableau 4.1 : Paramètres de simulation de la charge polluant

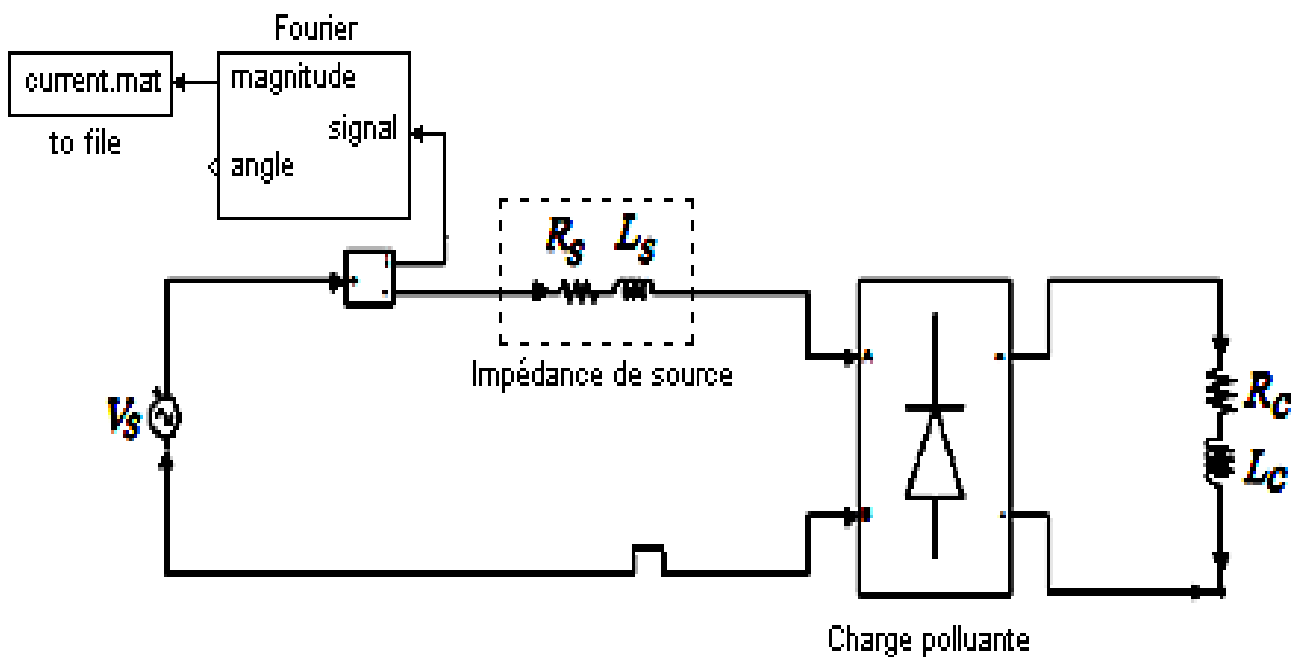


Figure4.3 : Modèle de la charge polluante établi sous Matlab-Simulink.

Les courbes concernant le courant de source avant application du filtrage actif sont représentées dans les figure (4.4a,b et c) On constate une distorsion symétrique du courant  $i_s$  par rapport au point de demi période figure(4.4a), ce qui signifie que les harmoniques paires (multiples de 2) sont inexistantes dans le spectre de  $i_s$  et que seuls les harmoniques impaires (ceux de rang  $(2n - 1)$  ) sont présents ; Ceci est confirmé par le spectre de  $i_s$  figure(4.4b) représentant les 25 premiers harmoniques les plus significatifs, avec un THDi de 40.92 % pour une durée d'observation de 0.3 s. Cette valeur doit être impérativement réduite à moins de 5 %.

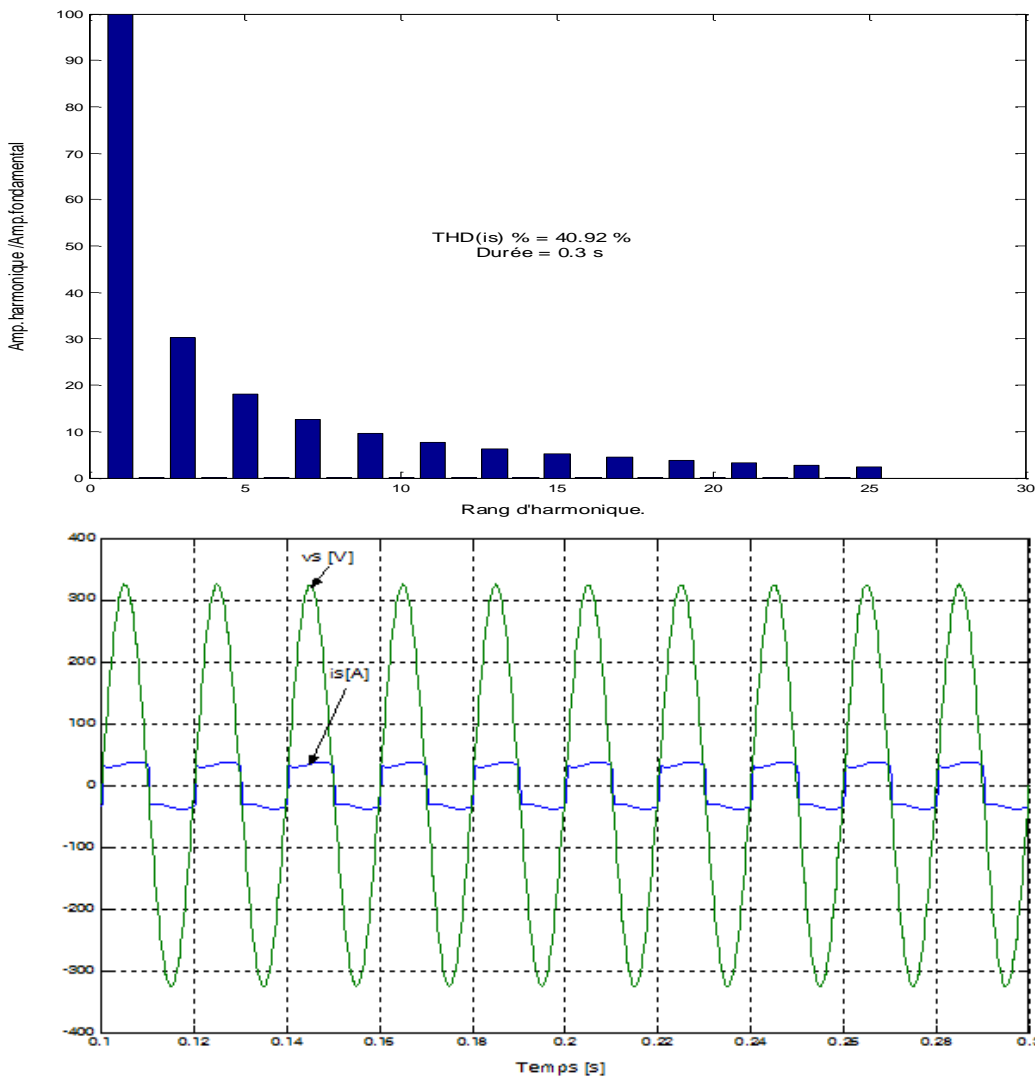


Figure 4.4a,b : Allure de  $i_s$  avant filtrage actif suivi de son spectre harmonique

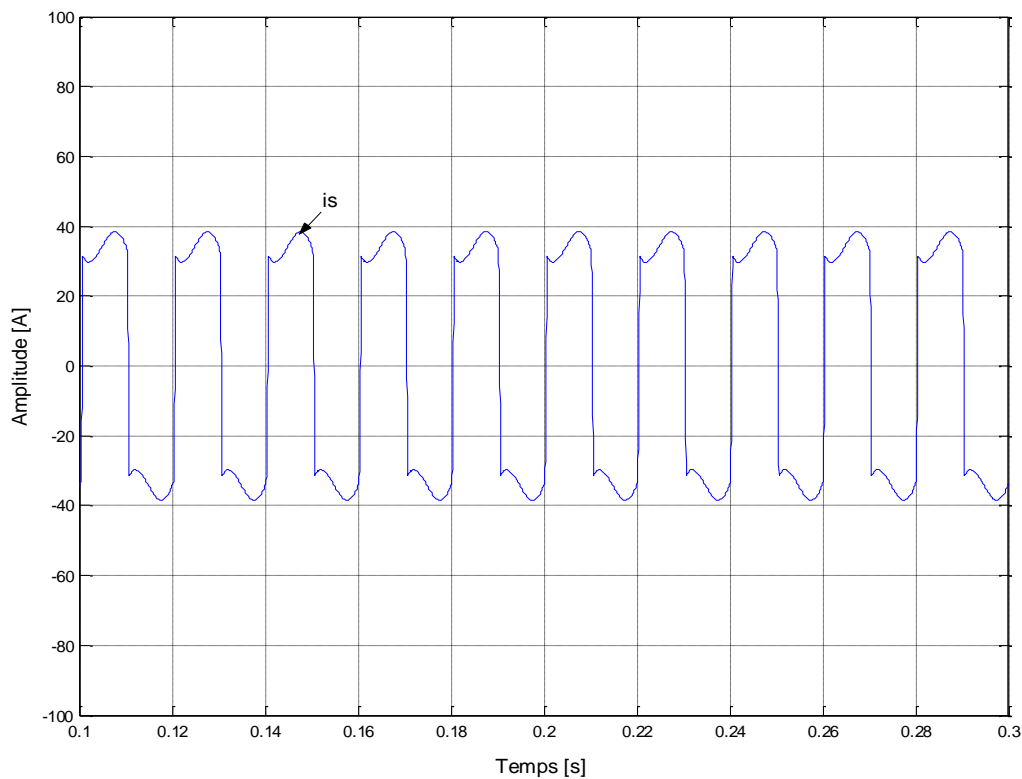


Figure 4.4c : Courant  $i_s$  déphasé de la tension  $v_s$ .

### 4.3. Application du filtrage actif parallèle

Le circuit de puissance du filtre actif parallèle, à base d'onduleur de tension est placé entre un réseau monophasé et une charge non-linéaire polluante en pont de Graëtz est représenté dans la figure (4.5). Les interrupteurs constituant le filtre actif sont des IGBT disposés en antiparallèle avec des diodes. On considère une **source continue** pour l'alimentation de ce filtre actif.

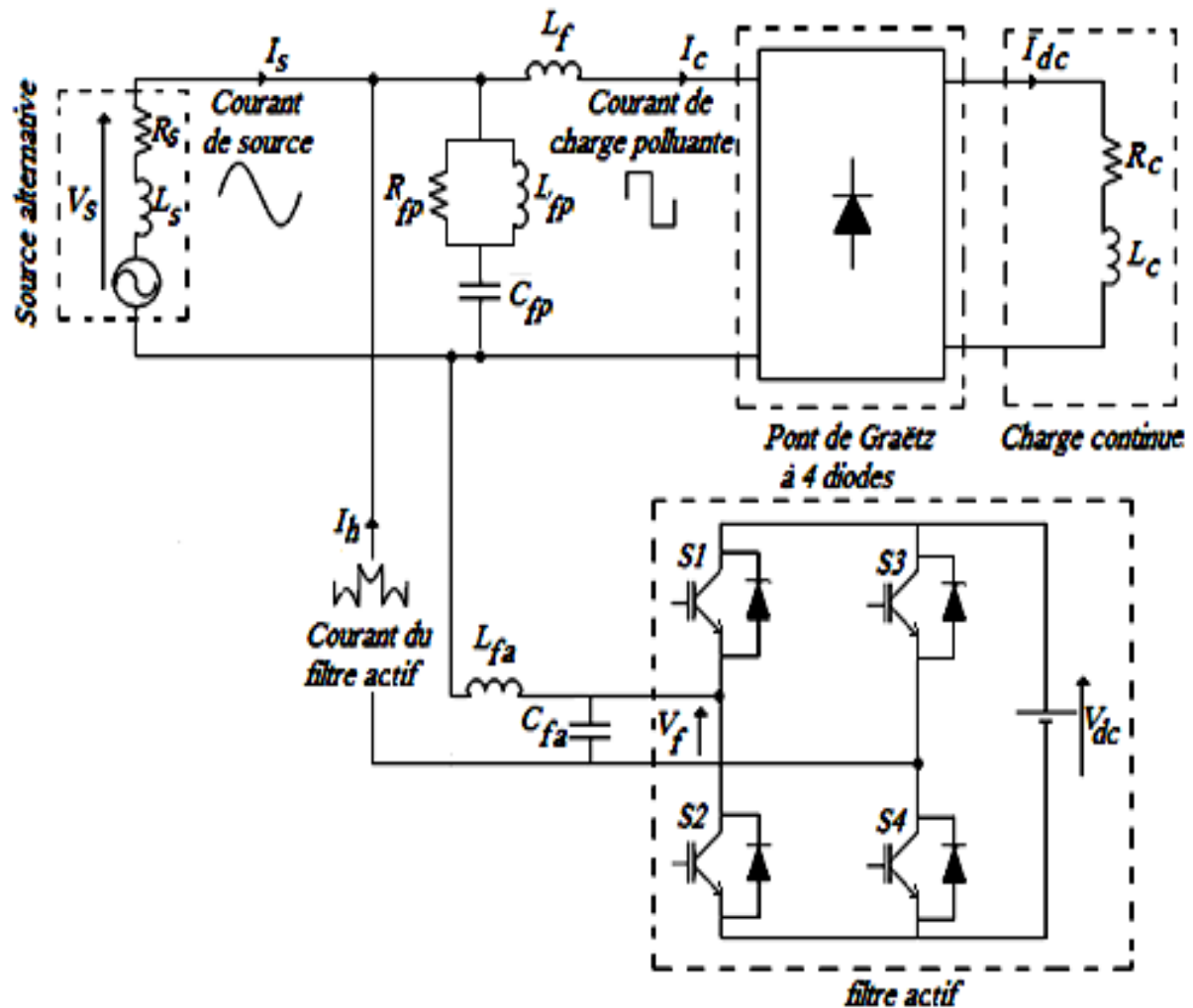


Figure 4.5 : Circuit de puissance du filtre actif parallèle

Avec :

$I_s$  : Courant de la source d'alimentation.

$V_s$  : Tension de la source d'alimentation.

$V_f, I_h$  : Tension et courant du filtre actif.

$L_{fa}, C_{fa}$  : Inductance et capacité constituant le filtre de sortie du filtre actif.

$R_{fp}, L_{fp}, C_{fp}$  : Résistance, inductance et capacité du filtre passif des harmoniques de rang  $\geq 11$ .

$I_c, L_f, I_{dc}$  : Courant, inductance de correction et courant aval au pont de Graëtz constituant la charge polluante.

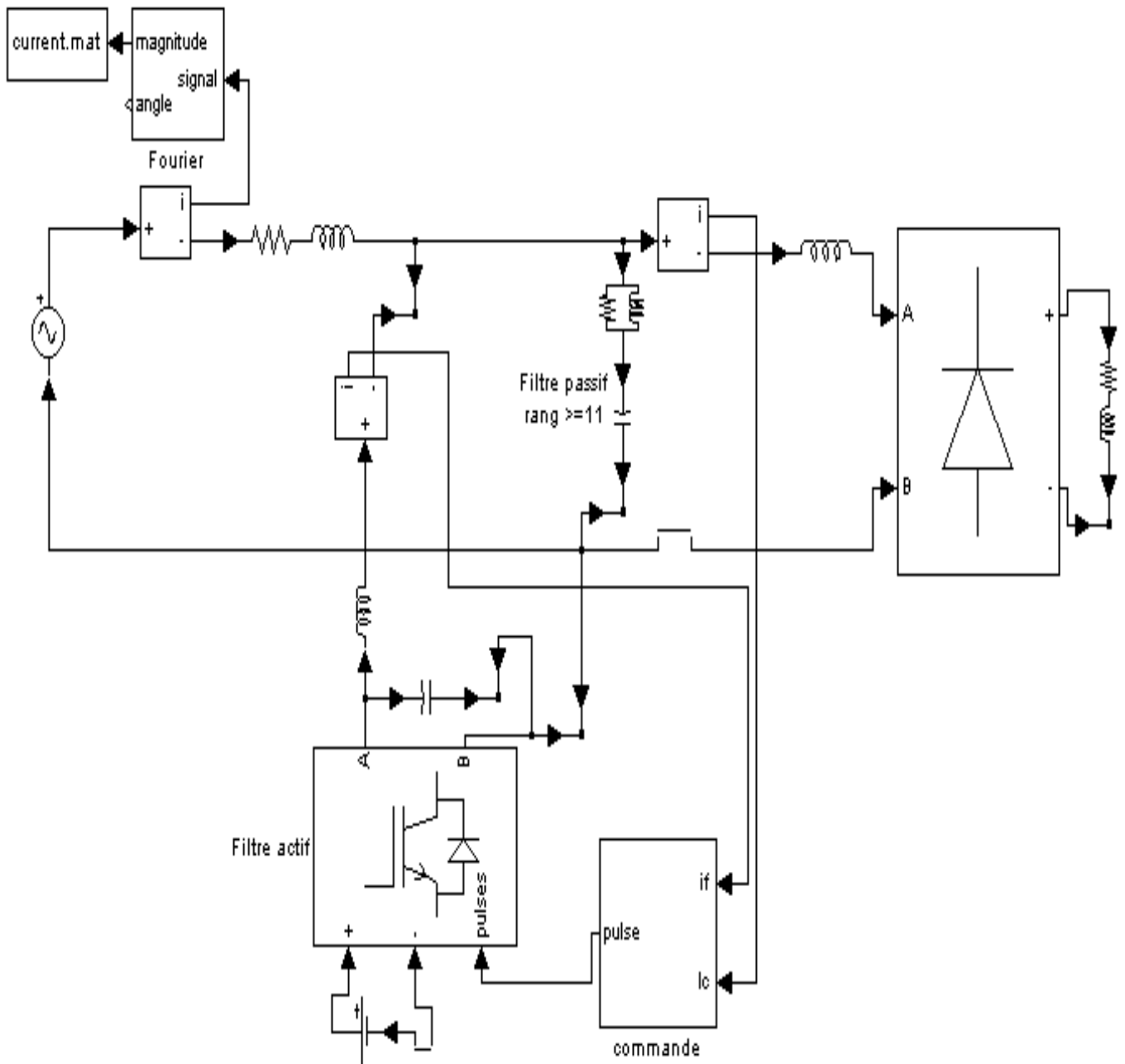


Figure 4.6 : Modèle du filtrage actif monophasé parallèle établi sous Matlab-Simulink.

### 4.3.1. Circuit de commande

Le circuit de commande est, en général, réparti en trois blocs distincts :

- 1)- Bloc de détection des courants de référence ;
- 2)- Bloc de génération des impulsions ;

3)- Bloc de régulation de la tension continue  $V_{dc}$ ;

Cette application est dépourvue du 3ème bloc dans la mesure où l'on a considéré une source de tension continue produisant  $V_{dc}$

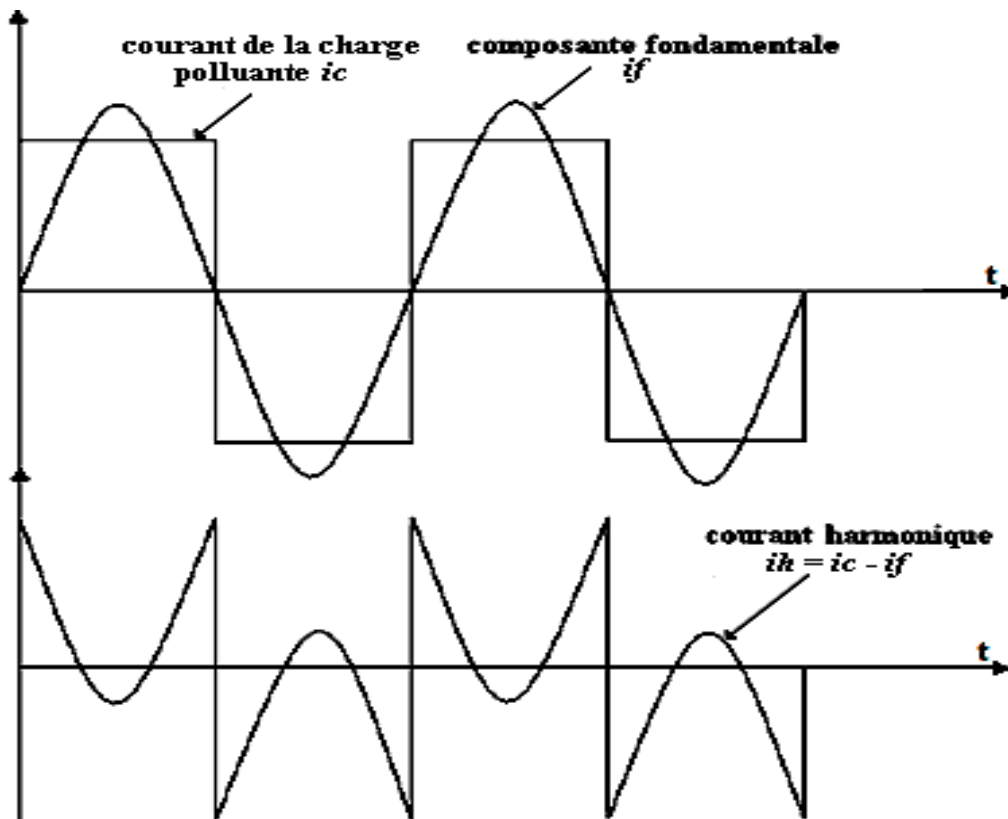


Figure 4.7 : Extraction graphique de courant harmonique

#### 4.3.1.a. Détection du courant de référence

- **Etude théorique**

La figure (4.7) montre la détermination graphique de l'allure du courant harmonique par la soustraction point par point du graphe représentant le courant absorbé par la charge polluante, et une sinusoïde représentant la composante fondamentale du courant.

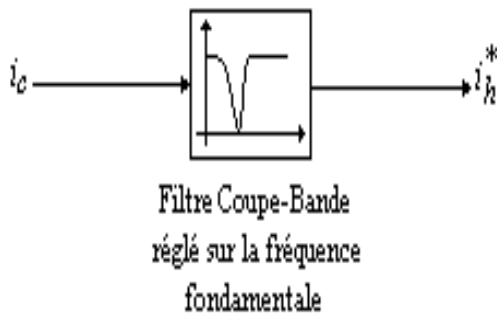
- **Méthode du filtre coupe-bande « Notch Filter »**

La méthode choisie pour la détection des courants harmoniques de référence est celle du filtre coupe-bande ou « Notch Filter » [2,7], dont le principe est illustré dans la figure (4.8). Le courant de charge passe par un filtre coupe-bande où il sera dépourvu de sa composante

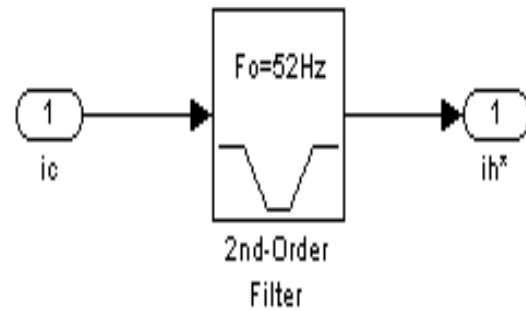


fondamentale, ainsi, à la sortie du filtre, on aura un signal contenant les composantes harmoniques de références souhaitées.

Le modèle *Simulink* de cet algorithme est montré dans la figure (4.9)



**Figure 4.8 :** Génération du courant de référence par la méthode du Notch Filter



**Figure 4.9 :** Modèle Simulink de la méthode Notch Filter

Cette méthode est caractérisée par :

- ✚ Applicable aux systèmes monophasé, biphasé ou triphasé, équilibré ou non.
- ✚ Le nombre d'harmoniques compensés dépend de la bande passante des semi-conducteurs composant le filtre actif.
- ✚ Méthode de calcul simple avec un bon temps de réponse lors du régime transitoire.
- ✚ Risque d'atténuation des harmoniques de compensation du filtre actif.

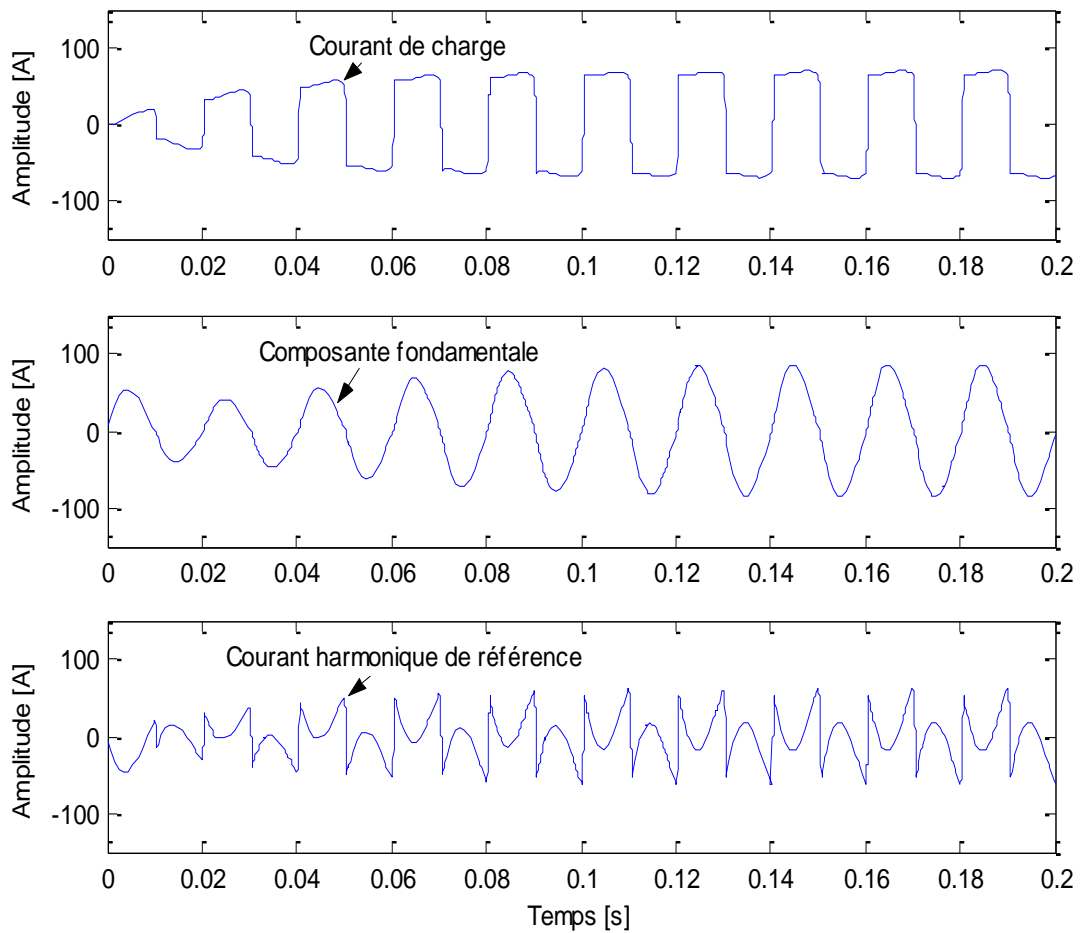


Figure 4.10 : Allures des courants de charge, fondamental et harmonique de référence.

L'allure du courant harmonique obtenu par la simulation sous Simulink du modèle de la (Fig. 14) est montrée dans la (Fig.15). Les paramètres du Notch Filter utilisé sont :

- Une **fréquence** de coupure 52 Hz,
- Coefficient d'amortissement  $\xi = 0.2$ ,
- Conditions initiales : amplitude du signal d'entrée 70 A, phase initiale  $5.2^\circ$ , fréquence initiale 52 Hz

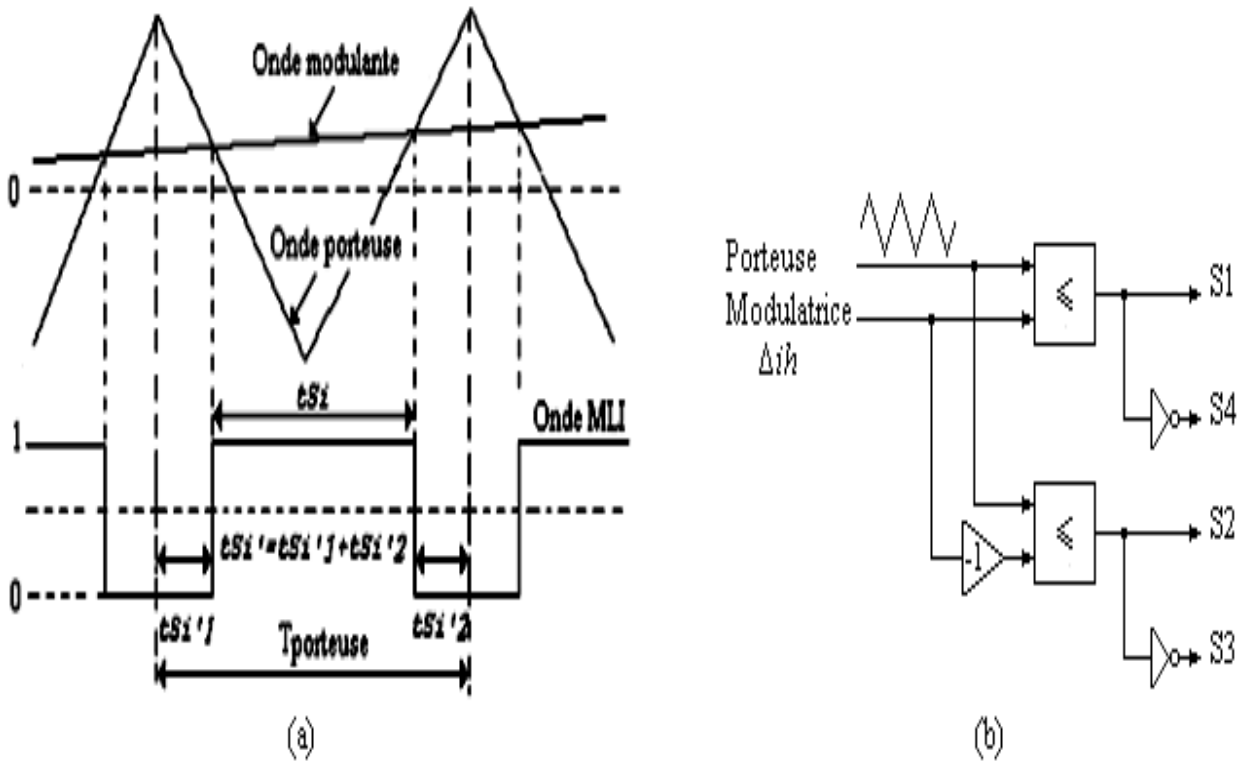


Figure 4.11 : Commande MLI intersective.  
 (a). Principe général.  
 (b). Cas de la commande d'un FA monophasé.

4.3.1.b. Génération des impulsions

Pour la génération des impulsions, on a opté pour la commande **MLI intersective**. Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine le signal modulateur à partir de l'écart entre le courant du filtre actif mesuré et sa référence identifiée plus haut. Le signal modulateur est ensuite comparé avec un ou plusieurs signaux porteurs (le plus souvent de forme triangulaire ou en dents de scie) à fréquence élevée par rapport à celle du modulateur. La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs.

La fréquence de commutation est égale à la fréquence de signal porteur. Le schéma de principe de cette technique est présenté dans la figure (4.11).

Le modèle *Simulink* de la stratégie MLI que nous avons élaboré est montré dans la figure 4.12

Le bloc de correction est un filtre passe-bas du 1<sup>er</sup> ordre dont la fonction de transfert est  $FT = K/(1 + j\tau\omega)$ .

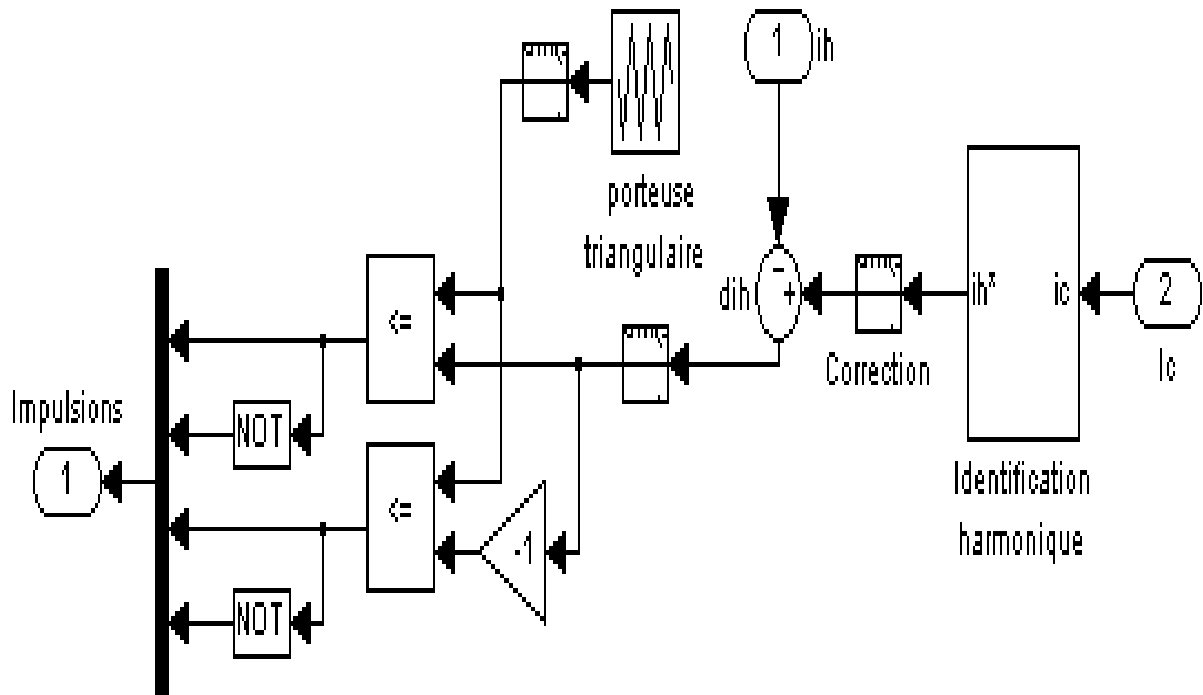


Figure4.12 : Modèle Simulink de la MLI intersective d'un FA monophasé

**4.4. Résultats de simulation sous Matlab-Simulink**

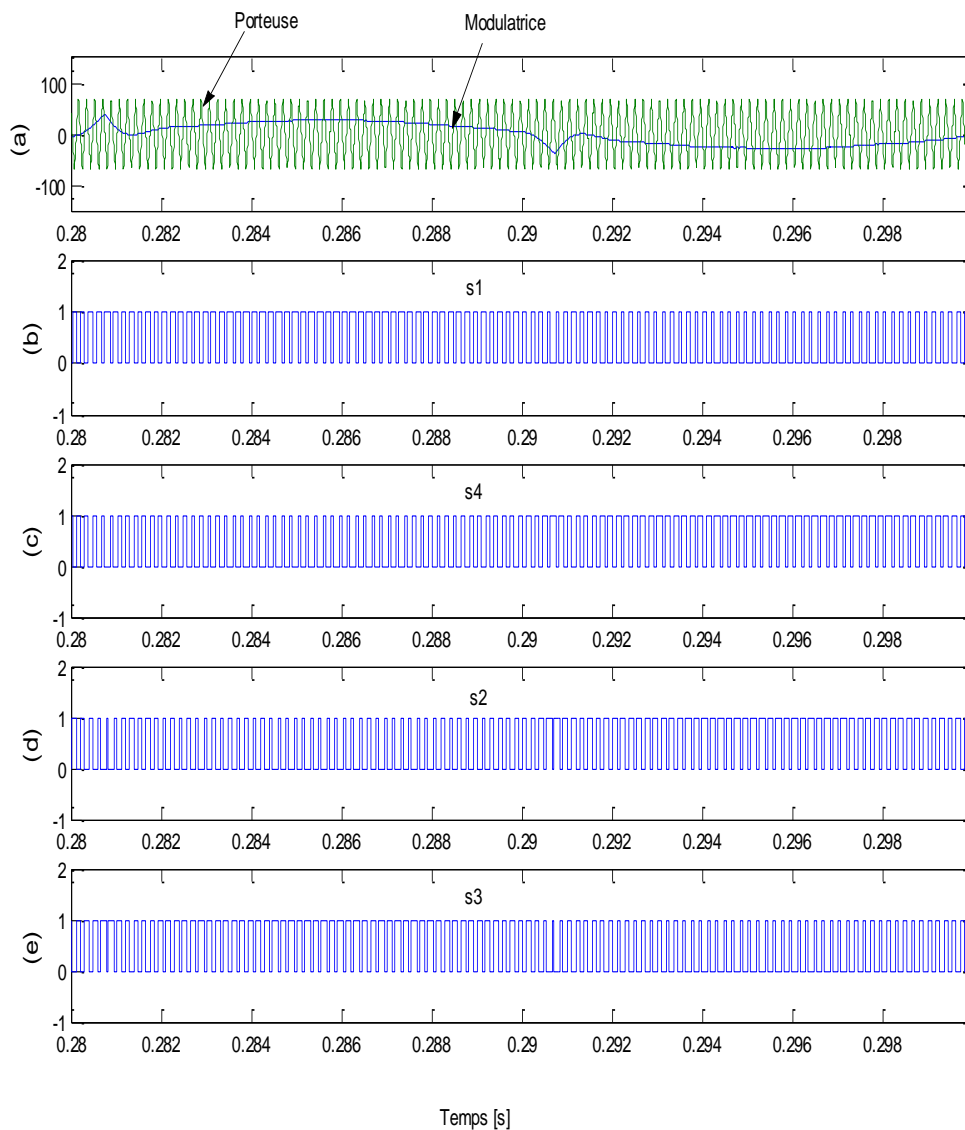
Pour la simulation du modèle de la figure (4.6) sous *Matlab-Simulink*, on a utilisé les paramètres inscrits dans le Tableau 4.2

Paramètres		Valeurs numériques
<u>Filtre Actif</u>	$V_{dc}$	850 V
	$L_{fa}$	3 mH
	$C_{fa}$	4000 $\mu$ F
<u>Filtre Passif Parallèle</u>	$R_{fp}$	60 $\Omega$
	$L_{fp}$	0.8 mH
	$C_{fp}$	138.2 $\mu$ F
<u>Amont Filtre</u>	$L_f$	0.3 mH
<u>Porteuse</u>	$f_p$	11 kHz
	$I_p$	70 A
<u>Correcteurs</u>	$K$	1
	$\tau$	1.59 $\mu$ s

**TABLEAU 4.2 :** PARAMETRES DE SIMULATION

Les courbes de la figure (4.13) montrent le procédé de génération des impulsions à partir des intersections entre la porteuse triangulaire et la modulatrice ( $\Delta ih$ ). Dans la (Fig.18.a), on mentionne la porteuse et la modulatrice. Dans les (Fig.18.b, c, d) et e, on illustre les impulsions des quatre interrupteurs S1, S4, S2, S3 respectivement. On constate la complémentarité entre S1, S4 d'une part et S2, S3 de l'autre part.

Après application du filtre actif parallèle proposé, on enregistre une nette amélioration dans l'allure du courant de source  $i_s$ , comme le démontre la (Fig.19). Donc,  $i_s$  a été dépollué à un niveau assez satisfaisant, ceci est conforté par le spectre harmonique, avec un THDi de 5.24 % durant 0.3 s.



**Figure 4.13 (a) Porteuse et modulatrice (b): Impulsion S1 (c): S4 (d): Impulsion S2 (e): Impulsion S3.**

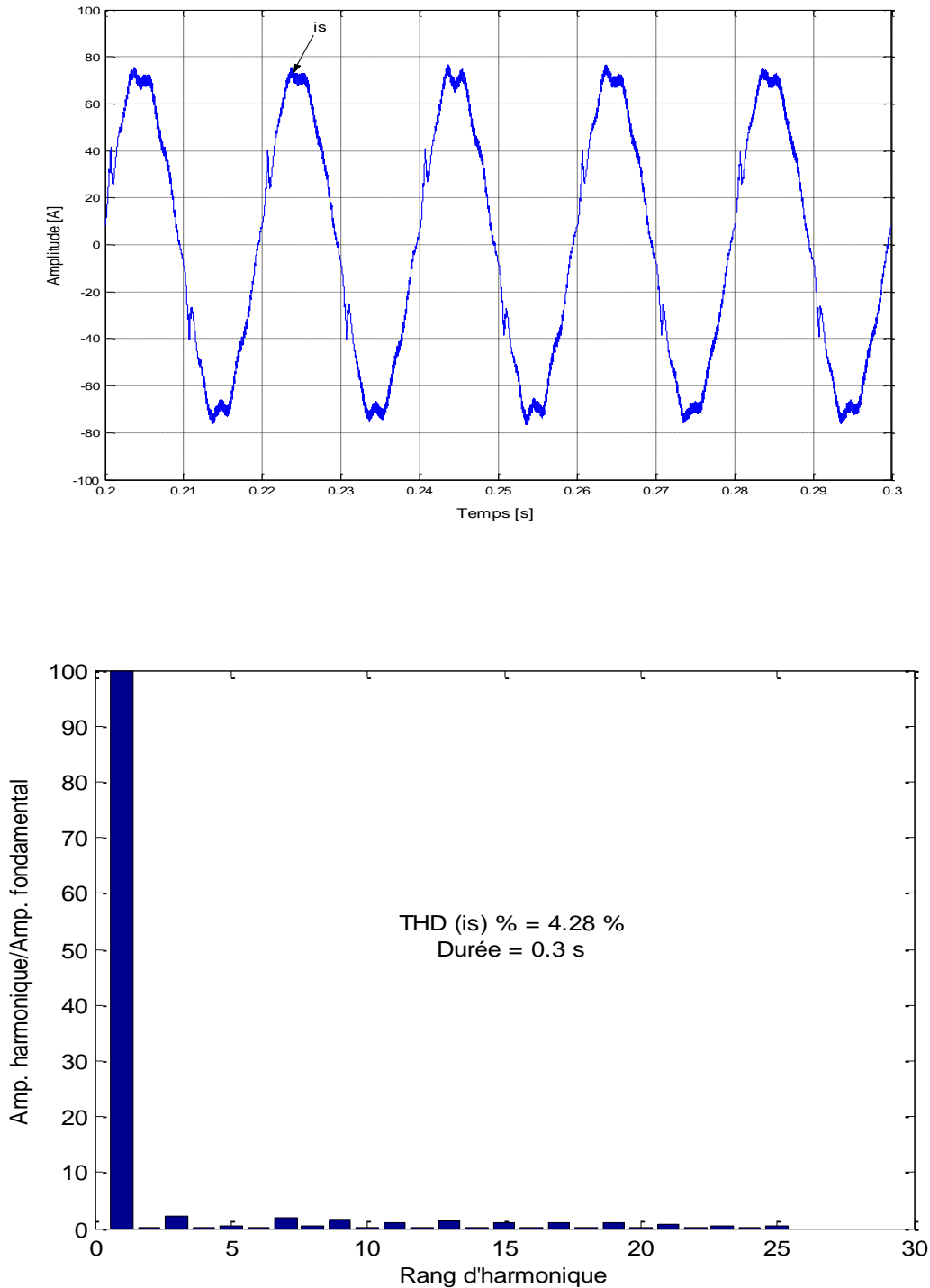
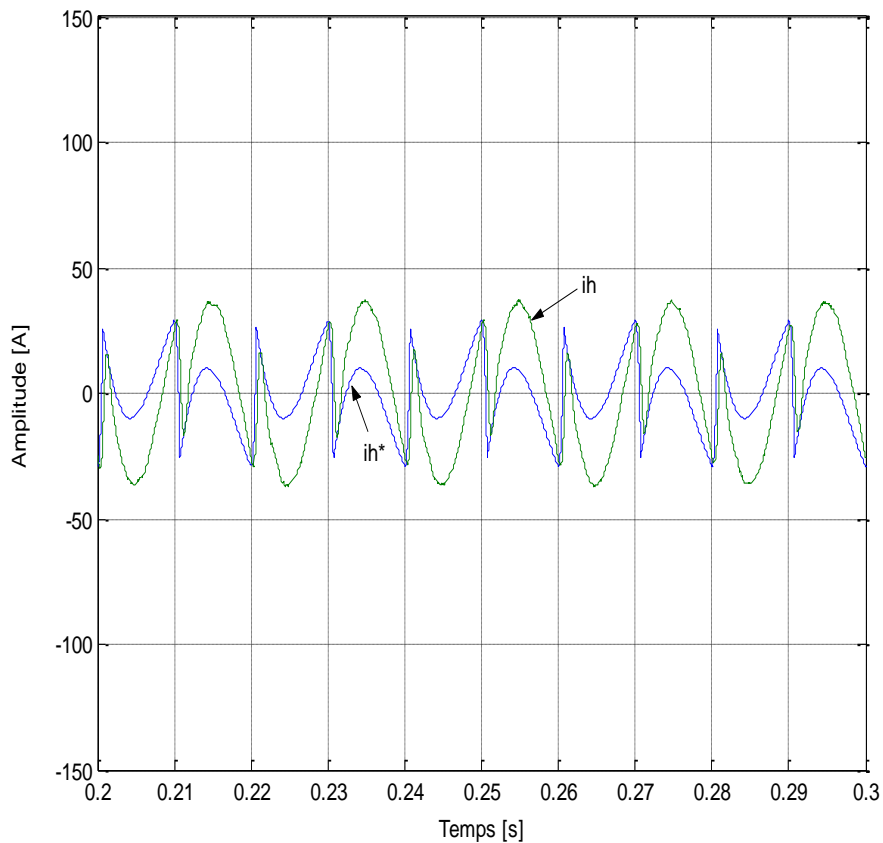


Figure 4.14 : Allure du courant de source is après filtrage actif suivi de son spectre harmonique de is.

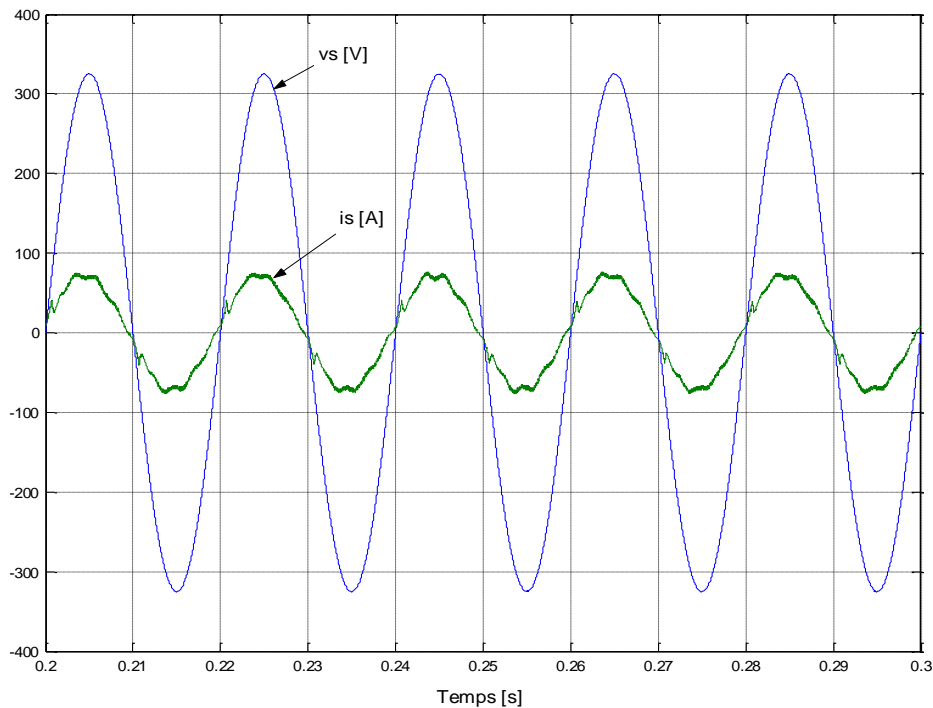
On voit sur les deux courbes de la figure (4.15) que  $i_h$  et  $i_h^*$  se concordent malgré quelques régions où ils ne sont pas bien superposés, sans qu'il y ait un grand impact sur le courant filtré.

Dans la figure (4.16) on voit que la tension et le courant de la source sont presque en phase, d'où un bon facteur de puissance.



**Figure 4.15 :** Courant généré par le filtre actif  $i_h$  et sa référence  $i_h^*$





**Figure 4.16 :** Allures de  $i_s$  et  $v_s$  après filtrage actif

Pour améliorer l'allure du courant de source et la valeur du THDi, on a fait passer le courant de source par un filtre passe-bas du 1<sup>er</sup> ordre, dont les paramètres et la fonction de transfert  $K = 1$  et  $\tau = 0.2$  ms. Le courant obtenu est montré dans la (Fig.22), l'allure du courant a subi des améliorations. En effet, le spectre harmonique concernant la représentation fréquentielle de ce nouveau courant donne un THDi de 4.28 % durant 0.3 s (une baisse de près de 1 %)

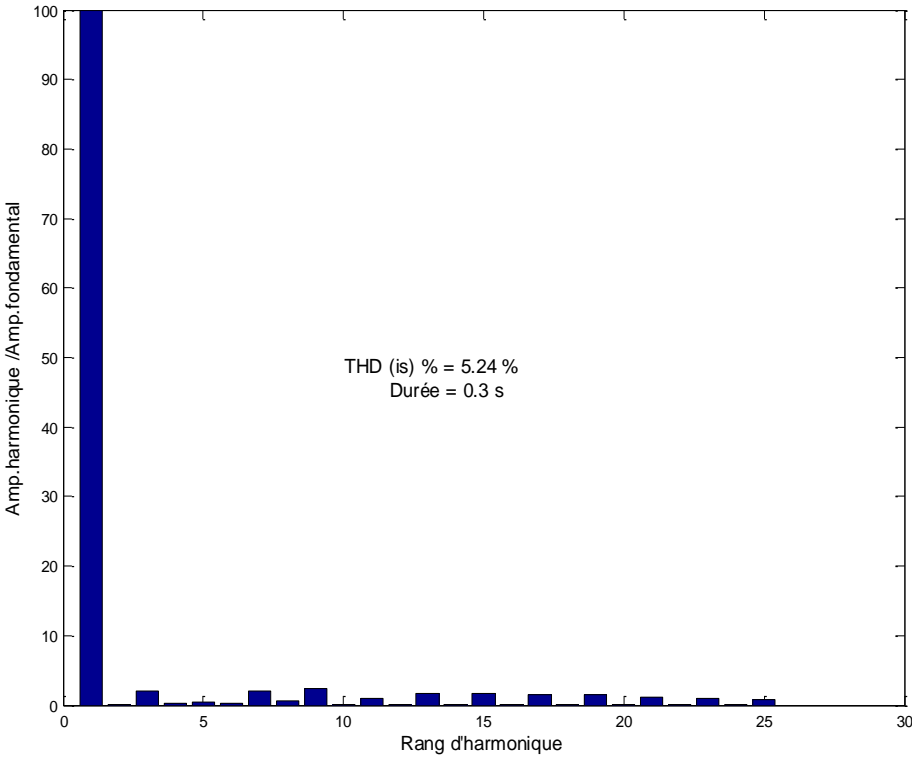
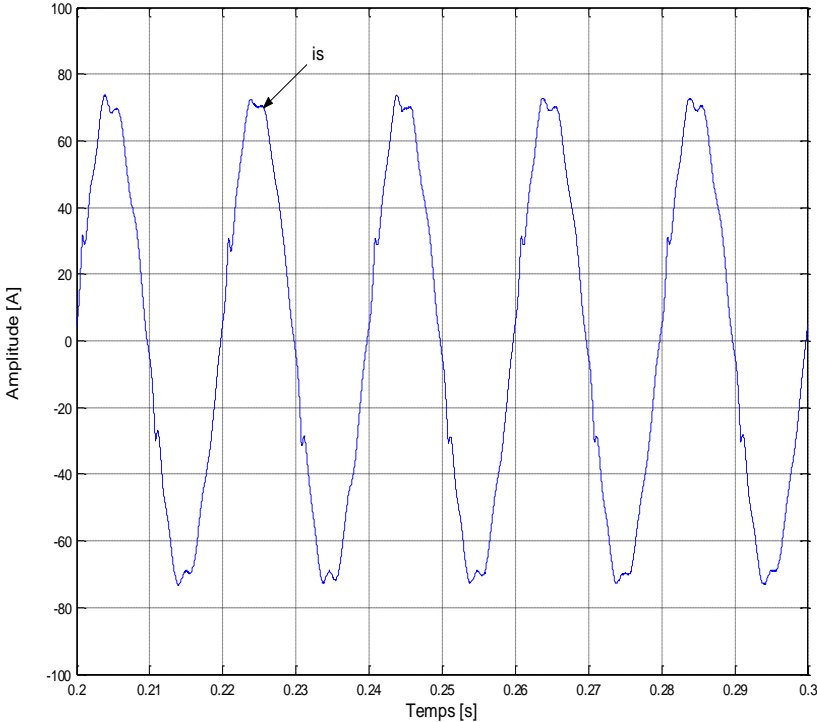


Figure 4.17 : Allure de is après filtrage actif suivi de son spectre harmonique

L'analyse de ce spectre et le calcul taux de distorsion individuel de chaque rang harmonique montrent que le modèle de filtrage actif que nous avons proposé respecte les normes de la CEI 61000-3-2 . Les taux obtenus pour les 25 premiers rangs du spectre de la (Fig.22) sont reportés dans le Tableau 4.3

<b>RANGS HARMONIQUES</b>		<b>COURANT HARMONIQUE MAXIMALE AUTORISE [A]</b>	
<b>HARMONIQUES IMPAIRES</b>			
<b>RANG</b>	<b>NORME</b>	<b>OBTENU</b>	
<b>3</b>	<b>2.3</b>	<b>2.29</b>	
<b>5</b>	<b>1.14</b>	<b>0.57</b>	
<b>7</b>	<b>0.77</b>	<b>1.8</b>	
<b>9</b>	<b>0.40</b>	<b>1.585</b>	
<b>11</b>	<b>0.33</b>	<b>1.03</b>	
<b>13</b>	<b>0.21</b>	<b>1.26</b>	
<b>RANG</b>	<b>NORME</b>	<b>OBTENU</b>	
<b>2</b>	<b>1.08</b>	<b>0.24</b>	
<b>4</b>	<b>0.43</b>	<b>0.07</b>	
<b>6</b>	<b>0.3</b>	<b>0.21</b>	

**TABLEAU 4.3 :** CONCORDANCE DES TAUX DE DISTORSION DE CHAQUE HARMONIQUE AVEC CEUX IMPOSES PAR LA CEI 61000-3-2.

#### 4.5. CONCLUSION

Dans ce travail on s'est intéressé à la modélisation du filtrage actif monophasé parallèle alimenté par une source constante. Dans un premier temps, on a modélisé l'ensemble réseau-charge polluante (redresseur monophasé à 4 diodes), nous avons vu l'influence de la charge polluante sur la forme d'onde du courant fourni par la source, puis on a appliqué le filtrage actif monophasé parallèle dont les ordres de commutation ont été envoyés par la commande MLI intersective. Les résultats de simulation étaient assez satisfaisants. En effet, le courant de source est passé d'un taux de distorsion de près de 41 % à 4.28 %, *c.-à-d.*, une réduction de la pollution harmonique de **89.56 %**.

La conclusion qu'on peut tirer par cette étude théorique et de simulation est que la qualité de filtrage actif dépend de plusieurs paramètres:

- ✚ Tension d'alimentation de l'onduleur, devant être suffisante et non fluctuante (850 V);
- ✚ Fréquence de commutation des IGBT (la fréquence de la porteuse), qui doit être assez élevée (11 kHz) ;
- ✚ Amplitude de la porteuse, assurant un rapport de 1.2 avec la modulatrice afin d'assurer le maximum d'intersection,
- ✚ Paramètres des filtres coupe-bande «*Notch Filter*» : fréquence et dépassement, qui doivent être bien déterminés afin d'avoir les harmoniques de référence exactes que le filtre actif doit reproduire.

## Conclusion générale :

A l'issue de ce travail qui est consacré à l'étude du filtrage actif parallèle de puissance, après avoir traversé et abordé les points suivants :

- ❖ Définition et notion sur les problèmes d'harmoniques et les effets dommageables qu'ils génèrent,
- ❖ Etude de structure d'un pont redresseur thyristors comme étant une charge non linéaire,
- ❖ Etude de méthode des puissances instantanées pour l'identification des courants harmonique,
- ❖ La synthèse d'un filtre actif parallèle commandé par un onduleur MLI.

On conclut que les perturbations harmoniques des courants sont liées aux :

- ◆ Système d'alimentation « tension du réseau »
- ◆ Impédance du réseau,
- ◆ Système de commande « Génération des signaux de commande »,

Les courants de source contiennent en plus des harmoniques caractéristiques des harmoniques non caractéristiques causés par un déséquilibre dans le système d'alimentation, un déséquilibre des impédances du réseau ou/et un déséquilibre dans le système de commande.

## **Conclusion Générale**

---

L'étape d'identification des harmoniques nous a permis de mettre au point un outil nécessaire à la détermination quantitative du dimensionnement des éléments de stockages d'énergie et des semi-conducteurs du filtre actif. Les calculs passent par la résolution d'un système relativement simple d'équation différentielle non linéaire.

Cependant, le modèle du filtre est validé selon une stratégie de commande basée sur la théorie de calcul des puissances active et réactive instantané.

Cette stratégie a permis de mettre au point le principe de fonctionnement du filtre actif ainsi que la loi de commande par MLI.

Finalement nous concluons d'après les résultats obtenus que le filtre actif parallèle réduit d'une manière efficace les harmoniques du réseau alternatif.

Ce type de filtre va connaître une grande évolution avec le développement des lois de commandes tel que MLI et hystérésis permettant ainsi de réduire les harmoniques à une valeur tolérable.

### Références bibliographiques :

- [1] **S. Bernard, G. Eescriva.**  
"Surcoût engendrée par les harmoniques et économique réalisées grâce à la compensation active"  
REF N= 5, 1999.
- [2] **T. Deflandre , p. Mauras.**  
"les harmoniques sur les réseaux électriques  
Editions eyrolles .1998.
- [3] **Mohamad Alaa Eddin Alali**  
"Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension"  
Thèse de docteur de l'Université Louis Pasteur – Strasbourg Génie électrique  
2002.
- [4] **Man Chung Wong**  
"Non-linear adaptive hysteresis band pulsewidth modulation control for hybrid active power filters".  
IET Power Electronics · August 2015
- [5] **F. labrique, R . Bausiere.**  
"La conversion continue – alternative."  
Londers new York. Paris 1995.
- [6] **G .Seguier**  
"La conversion alternative – continue."  
Londers new york. paris 1992.
- [7] **G. Seguier**  
"Electronique de puissance : les fonctions de bas et leur principales applications"  
7<sup>e</sup> edition Dunod 1999.
- [8] **F. labrique , H .Buyse , G .Seguier , R . Bausiere.**  
"Commande et comportement dynamique."  
Londers new york. paris 1998.

- [9] **P. Ladoux , G. Ollé.**  
"Compensateur d'harmonique et de puissance réactive."  
Publication RESELEC 2002.
- [10] **Leila Merabet.**  
"Etude par simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des courants harmoniques génères par un pont redresseur triphasé"  
Thèse de MAGISTER, université de Annaba 2000.
- [11] **Karuppanan P and Kamalakanta Mahapatra**  
" A Novel SRF Based Cascaded Multilevel Active Filter for Power Line Conditioners"  
Annual IEEE India Conference (INDICON) 2010 978-1-4244-9074-5/10
- [12] **Huang SJ, Wu JC.**  
Design and operation of cascaded active power filters for the reduction of harmonic distortions in a power System.  
IEEE Proc.-Gener Trans Distrib 1999; 146(2): 193-199.
- [13] **Karuppanan P, Mahapatra KK.**  
"Shunt Active Power Line Conditioners for Compensating Harmonics and Reactive Power".  
Proceedings of the International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2010; 277-280.