

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : GENIE ELECTRIQUE



DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

FILIERE: GENIE ÉLECTROTECHNIQUE

OPTION : RESEAUX ELECTRIQUES

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

Par: YETTOU miloud

DEBLA nacer Eddine

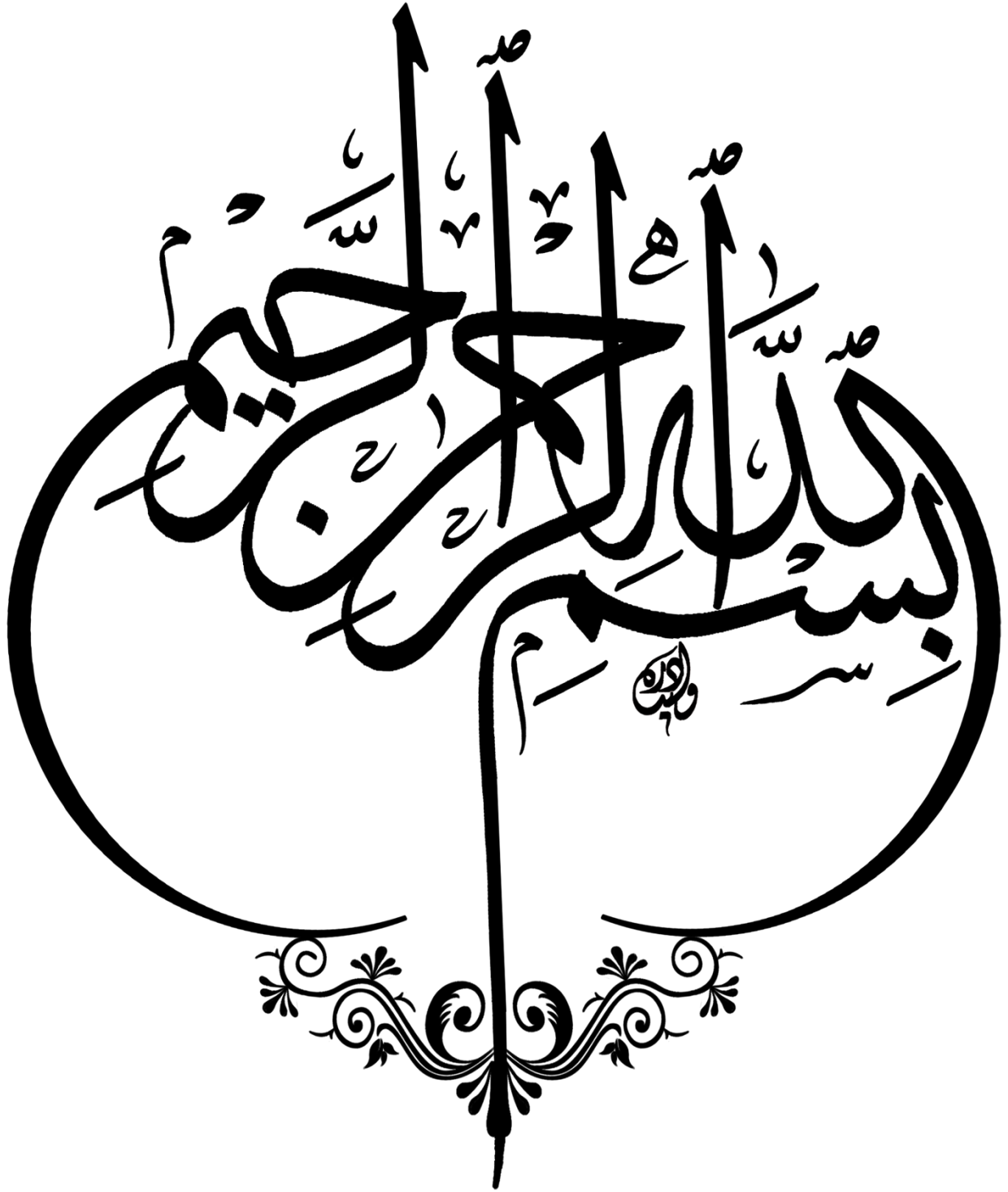
**THEME**

**Commande d'un Filtre Actif Parallèle  
À trois niveaux (NPC)  
Par différentes stratégies de commande**

**Soutenu devant le jury composé de:**

Mr. BENGUESMIA Hani	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Président
Mr. Benyettou Lotfi	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Rapporteur
Mr. BAHIDDINE Miloud	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Examineur

**Année universitaire : 2017 /2018**



## REMERCIEMENTS

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

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

Mr. BENYETTOU Lotfi qui a aidé pour rendre ce travail effectif.

Je tiens également à remercier vivement les membres de jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail.

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

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

H. BENCENI, H. BAKHI Mr. BENYETTOU. Zitouni et tous les collègues.

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

## SOMMAIRE

REMERCIEMENTS .....	I
LISTE DES FIGURES .....	V
LISTE DES TABLEAUX .....	VIII
NOTATIONS SYMBOLIQUES .....	1
Chapitre I : Perturbations des Réseaux Electriques	
Introduction générale .....	
I.1. Introduction .....	1
I.2. Perturbation électrique .....	1
I.2.1 Creux et coupures de tension .....	2
I.2.2 Fluctuations de tension .....	2
I.2.3 Déséquilibre du système triphasé de tension .....	3
I.3 Les harmoniques .....	4
I.3.1 Le signal déformé .....	4
I.4 Sources des harmoniques .....	5
I.5 Caractérisation des perturbations harmoniques .....	6
I.5.1 Rang de l'harmonique .....	6
I.5.2 Le taux de distorsion harmoniques .....	6
I.5.3 Le facteur de puissance .....	6
I.6 Les effets des harmoniques .....	7
a. Les effets instantanés .....	7
b. Les effets à terme .....	7
I.7 Solutions de dépollution du réseau électrique .....	8
I.7.1 Solutions traditionnelles .....	8
a. Filtrage Actif .....	10
b. Filtre actif parallèle (FAP) .....	10
c. Filtre actif série (FAS) .....	11
d. La combinaison parallèle-série actifs (UPQC) .....	11
I.8. Conclusion .....	12
Chapitre II: Principe du filtre actif parallèle	
II.1. Introduction .....	14
II.2. Principe de filtre actif .....	14
II.2.1 Filtre actif .....	14
II.2.2 Objectif du filtre actif .....	14
II.3. Le filtre actif parallèle .....	14
II.3.1 Principe de fonctionnement .....	14
II.3.2 Structure générale d'un filtre actif parallèle .....	15
II.3.3 Applications des filtres actifs parallèles .....	16
II.3.4 Classement des filtres actifs parallèles .....	17
II.4. Structure de l'onduleur à trois niveaux .....	18
II.5. Identification des courants harmoniques de référence .....	19
II.5.1 Méthodes du domaine fréquentiel .....	19
II.5.2 Méthode du domaine temporel .....	19
II.5.3 Stratégie de l'identification .....	20
II.5.4 Généralités sur les puissances instantanées .....	20
II.5.4.1 Séparation des puissances perturbatrices .....	22
II.5.4.2 Calcul des courants perturbateurs .....	22
II.5.5 Algorithme d'identification .....	23
II.6. Commande de l'onduleur .....	23

II.6.1. Commande des courants par hystérésis .....	23
II.6.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) .....	24
II.6.3 La logique floue .....	25
II.6.3.1 Principe et définitions .....	25
II.6.3.2 Structure d'un système flou .....	26
II.6.3.3 Commande par hystérésis à bande floue .....	27
II.7 Conclusion .....	28
Chapitre III: Commande du filtre actif parallèle à trois niveaux	
III.1. Introduction .....	31
III.2 Schéma global de l'association réseau-charge-onduleur avant et après compensation ...	31
III.3 Résultats de la simulation.....	32
III.3.1 Stratégie de commande hystérésis .....	32
III.3.2 Interprétation .....	38
III.3.3 Résultats de la simulation pour la commande hystérésis à bande floue.....	39
III.3.4 Interprétation .....	43
III.3.5 Commande à MLI.....	44
III.3.6 Interprétation .....	47
III.3 Conclusion .....	47
Conclusion générale .....	49
Références bibliographiques .....	2

# **LISTE DES FIGURES**

## LISTE DES FIGURES

Figure I. 1 Creux et coupures de tension.....	2
Figure I. 2 Fluctuations de tension .....	3
Figure I. 3 Déséquilibre du système triphasé de tension.....	3
Figure I. 4 Variation de la fréquence.....	4
Figure I. 5 Harmoniques.....	4
Figure I. 6 Présentation spectrale d'un signal périodique.....	5
Figure I. 7 Structure du filtre résonant .....	9
Figure I. 8 Montage du filtre amorti.....	9
Figure I. 9 Filtre actif parallèle.....	10
Figure I. 10 Filtre actif série.....	11
Figure I. 11 Filtre combiné parallèle-série (UPQC).....	11
Figure II. 1 Principe du filtrage actif parallèle.....	15
Figure II. 2 Structure générale d'un filtre actif parallèle .....	15
Figure II. 3 Schéma d'un onduleur NPC à 3 niveaux .....	18
Figure II. 4 schéma représentant le principe de séparation ( $Y = p$ ou $q$ ) .....	22
Figure II. 5 algorithme d'identification des harmoniques.....	23
Figure II. 6 Principe de la commande des courants par hystérésis.....	24
Figure II. 7 Principe de commande des courants par MLI.....	24
Figure II. 8 Répartition des commutations sur un bras d'un onduleur.....	25
Figure II. 9 Classification des personnes en trois ensembles selon la logique classique .....	26
Figure II. 10 Classification des personnes en trois ensembles selon la logique floue .....	26
Figure II. 11 Structure d'un système flou .....	26
Figure II. 12 Les fonction d'appartenance des variable.....	27
Figure III. 1 Schéma global de l'association réseau-charge-onduleur avant et après compensation.....	31
Figure III. 2 Courants injectés par l'onduleur et leurs spectres fréquentiels pour .....	32
Figure III. 3 Courants de référence, injectés et leurs spectres pour la commande.....	33
Figure III. 4 Courants de source après filtrage et leurs spectres fréquentiels pour la .....	34
Figure III. 5 Courants injectés par l'onduleur et leurs spectres fréquentiels pour .....	35
Figure III. 6 Courants de référence, injectés et leurs spectres pour la commande.....	36
Figure III. 7 Courants de source après filtrage et leurs spectres fréquentiels pour la .....	37
Figure III. 8 commande hystérésis à bande floue.....	39

Figure III. 9 la tension et le courant avant le filtrage .....	39
Figure III. 10 la tension et le courant après le filtrage .....	39
Figure III. 11 Courants injectés par l'onduleur et leurs spectres fréquentiels pour .....	40
Figure III. 12 Courants de référence, injectés et leurs spectres pour la commande.....	41
Figure III. 13 Courants de source après filtrage et leurs spectres fréquentiels pour la .....	42
Figure III. 14 Courants injectés par l'onduleur et leurs spectres fréquentiels pour la commande à MLI.....	44
Figure III. 15 Courants de source après filtrage et leurs spectres fréquentiels pour la commande à MLI .....	46

# **LISTE DES TABLEAUX**

## Liste des Tableaux

Tableau I. 1 Sources des perturbations harmoniques .....	5
Tableau I. 2 Effet des harmoniques sur quelques matériels .....	8
Tableau II. 1 Comparaison entre les méthodes d'identification des harmoniques.....	19
Tableau III. 1 Règles de la commande floue.....	27

# **NOTATIONS SYMBOLIQUES**

## NOTATIONS SYMBOLIQUES

Symbole	Signification
<b>THD</b>	taux de distorsion harmonique
<b>F</b>	facteur de puissance
<b>I<sub>h</sub></b>	le courant harmonique
<b>I<sub>ch</sub></b>	courant de charge
<b>I<sub>s</sub></b>	courant de source
<b>D</b>	puissance Déformante
<b>P</b>	puissance active
<b>Q</b>	puissance réactive
<b>V<sub>α</sub>, V<sub>β</sub></b>	la tension biphasée l'axe α β
<b><math>\bar{P}</math></b>	Une puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant et de la tension.
<b><math>\bar{q}</math></b>	Une puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant et de la tension.
<b>V<sub>sn</sub></b>	tension au point de raccordement commun
<b>V<sub>fn</sub>, I<sub>fn</sub>, L<sub>f</sub></b>	tension, courant et inductance du filtre actif
<b>V<sub>dc</sub></b>	tension aux bornes du condensateur de l'onduleur
<b>R<sub>f</sub></b>	Résistance du filtre actif
<b>VA, VB, VC</b>	:Les tensions simples aux bornes de la charge
<b><math>\tilde{P}</math> &amp; <math>\tilde{q}</math></b>	des puissances alternatives liées à la somme des composantes perturbatrices du courant et de la tension.
<b>V<sub>ao</sub></b>	Les tensions simples à la sortie de l'onduleur entre les phases de la charge et le point milieu o
<b>(α, β)</b>	Le plan diphasé de la transformation de concordia
<b>P(t)</b>	la puissance réelle instantanée
<b>P<sub>0</sub>(t)</b>	la puissance homopolaire instantanée
<b>f<sub>n</sub></b>	fréquence de harmonique.
<b>f<sub>1</sub></b>	fréquence fondamentale.
<b>n</b>	harmonique de rang.
<b>y</b>	signale déformé d'harmonique.
<b>I<sub>eff</sub></b>	la valeur efficace de courant.
<b>S</b>	puissance apparente .

# **Introduction générale**

## Introduction générale

Aujourd'hui, la situation au niveau des réseaux d'énergie électrique est devenue très préoccupante, la qualité du courant dans les installations électriques se dégrade incontestablement. Elle devient donc une préoccupation importante pour les distributeurs de cette énergie et pour leurs clients. Cette dégradation découle directement de la prolifération des charges qui consomment un courant non sinusoïdal, appelées « charges non linéaires ». Ce type de charge est utilisé pour assurer la conversion, la variation et la régulation du courant électrique dans les installations commerciales, industrielles et résidentielles. [6]

D'autre part, la production d'énergie électrique et de distribution sous forme de tensions triphasées sinusoïdales, et contribue à fournir l'énergie nécessaire pour différentes charges sur le réseau électrique. Lorsque l'onde de tension n'est pas sinusoïdale, on rencontre des perturbations qui peuvent affecter le bon fonctionnement de nombreux équipements et de charges raccordés sur le réseau. Dans de telles circonstances, qui peuvent survenir des problèmes de compatibilité électromagnétique peuvent survenir entre ces éléments connectés au réseau.

Mais à présent, les développements récents dans la technologie de l'électronique de puissance apportent une capacité sans précédent de compensation et de correction de la distorsion harmonique générée par les charges non linéaires en utilisant un compensateur actif parallèle, permettant de dépolluer les réseaux électriques. [6]

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

le but de ce mémoire est de démontrer l'efficacité du filtrage harmonique parallèle qui permet l'adaptation à la charge en temps réel aux harmoniques nécessaires, donnant une performance quasi constante et indépendante du taux de charge.

Ce mémoire comporte trois chapitres :

Dans le premier, on présentera des notions générales sur les harmoniques, leurs sources, leurs conséquences et les méthodes classiques et modernes pour les compenser.

Le deuxième chapitre sera consacré au principe du filtrage actif parallèle nous établissons une méthode d'identification des courants harmoniques basée sur l'utilisation des puissances actives et réactives instantanées.

Au dernier chapitre, nous étudierons es stratégies de commande, à savoir la commande hystérésis à bande fixe et hystérésis à bande floue, la commande MLI et les résultats de simulation obtenus apparaîtront afin de comparer les trois stratégies, selon ce qui est le mieux,

Enfin, on présentera une conclusion générale et des perspectives pour les futures promotions.

# **Chapitre I**

## **Perturbations des Réseaux Electriques**

## I.1. Introduction

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

Afin de bien analyser les pollutions des réseaux électriques et, par conséquent, de trouver les meilleures méthodes de dépollution, on va distinguer deux types de perturbations, à savoir les perturbations de courant et celles de tension.

Les courants perturbateurs comme les courants harmoniques, les courants déséquilibrés et la puissance réactive sont majoritairement émis par des charges non linéaires, à base d'électronique de puissance, et/ou déséquilibrées. La puissance réactive peut être aussi consommée par des charges linéaires inductives comme les moteurs asynchrones qui sont largement présents dans les sites industriels.

Les perturbations de tension comme les creux, les déséquilibres et les harmoniques de tension trouvent généralement leurs origines dans le réseau électrique lui-même mais parfois également dans les charges.

Ces types de perturbation ont des effets très néfastes sur les équipements électriques. Ces effets peuvent provoquer des échauffements jusqu'à la destruction totale des équipements.

## I.2. Perturbation électrique

Les tensions d'un réseau électrique constituent un système alternatif triphasé, dont la fréquence de base est de 50 ou 60 Hz. Les paramètres caractéristiques d'un tel système sont :

- La fréquence.
- L'amplitude des tensions.
- La forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde.
- La symétrie du système triphasé (égalité des amplitudes et des déphasages entre les phases).

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

## I.2.1 Creux et coupures de tension

Le creux de tension est une diminution brutale de la tension à une valeur située entre 10% et 90% de la tension nominale pendant une durée allant de 10 ms jusqu'à quelques secondes.

Les creux de tension sont dus à des phénomènes naturels comme la foudre, ou à des défauts sur l'installation ou dans les réseaux tant publics que ceux des utilisateurs. Ils s'apparaissent également lors de manœuvres d'enclenchement mettant en jeu des courants de fortes intensités (moteurs, transformateurs, etc.) [2]

Une coupure de tension quant à elle est une diminution brutale de la tension à une valeur supérieure à 90% de la tension nominale ou disparition totale pendant une durée généralement comprise entre 10 ms et une minute pour les coupures brèves et supérieure à une minute pour les coupures longues. La plupart des appareils électriques admettent une coupure totale d'alimentation d'une durée inférieure à 10 ms. La figure (I.1) montre un exemple de creux et de coupure de tension

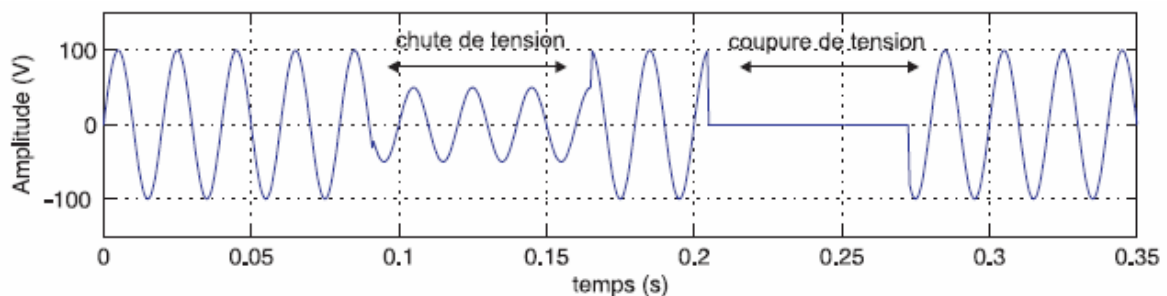


Figure I. 1 Creux et coupures de tension

## I.2.2 Fluctuations de tension

Les fluctuations de tension sont des variations périodiques ou erratiques de l'enveloppe de la tension. Ce sont des variations brutales de l'amplitude de la tension situées dans une bande de  $\pm 10\%$  et se produisent sur un intervalle de temps de quelques centièmes de Secondes. [2]

Elles sont en particulier dues à la propagation sur les lignes du réseau de courants d'appel importants. L'origine principale de ces courants est le fonctionnement d'appareil dont la puissance absorbée varie de manière rapide, comme les fours à arc et des machines à souder. Ces fluctuations se traduisent par des variations d'intensité, visible au niveau de l'éclairage causant un gêne visuel perceptible pour une variation de 1% de la tension. Ce phénomène de papillotement est appelé flicker. Un exemple de fluctuation de tension est montré dans la figure (I.2).

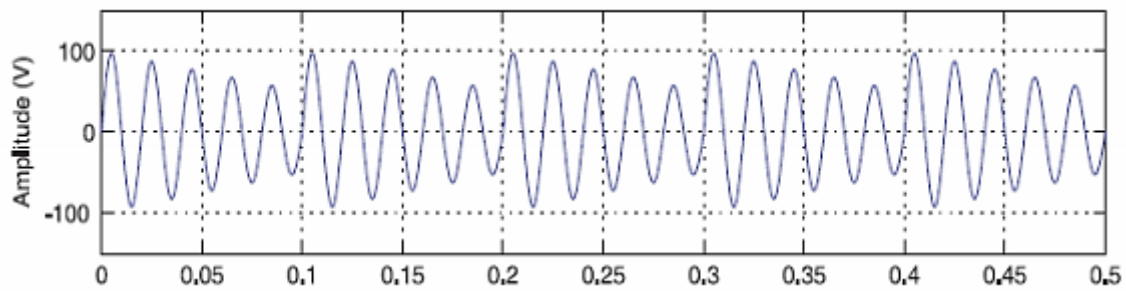


Figure I. 2 Fluctuations de tension

### I.2.3 Déséquilibre du système triphasé de tension

Lorsque les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalées d'un angle de  $120^\circ$  les unes par rapport aux autres, on parlera de déséquilibre du système triphasé comme le montre la figure (I.3). Un réseau électrique triphasé équilibré alimentant un récepteur électrique triphasé non équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau. [2]

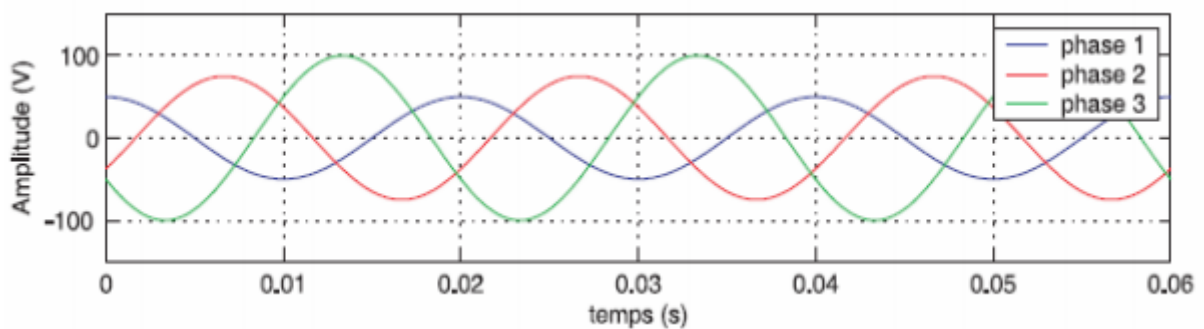


Figure I. 3 Déséquilibre du système triphasé de tension

### I.2.4 Variation de fréquence

Une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome, voir la figure (I.4). Au niveau des réseaux de distribution ou de transport, cette variation de la fréquence est très rare et n'est présente que lors de circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau. Dans les conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle  $50 \text{ Hz } 1\% \pm$ . [2]

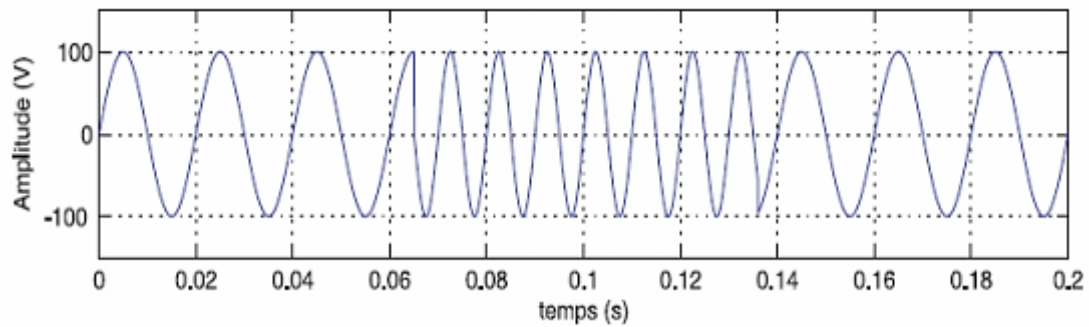


Figure I. 4 Variation de la fréquence

## I.3 Les harmoniques

L'expansion de l'emploi des charges électriques non linéaires durant les dernières années a significativement contribué à la propagation des harmoniques dans les systèmes d'électronique de puissance. Comme ces charges sont indispensables pour différents besoins domestiques et industriels.

Les déformations du courant et de la tension peuvent perturber le fonctionnement normal d'autres équipements électriques. C'est pourquoi, les distributeurs d'énergie ayant la contrainte de fournir une tension sinusoïdale, prennent en charge l'atténuation des perturbations harmoniques au moyen d'installation de forte puissance. Cependant, les nouvelles réglementations internationales imposent aux consommateurs des limites aux harmoniques, engendrées par leurs systèmes, tant en courant qu'en tension, ainsi, le filtrage des composantes harmoniques est au centre des préoccupations des distributeurs d'une part et des utilisateurs d'énergie électrique d'autre part. [3]

### I.3.1 Le signal déformé

Le signal déformé peut se décomposer en une somme d'ondes sinusoïdales et d'une composante continue éventuelle (théorème de Fourier). On distingue le fondamental (composante sinusoïdale de fréquence égale à celle du signal) et des harmoniques (composantes de fréquence multiple de celle du signal). [1]

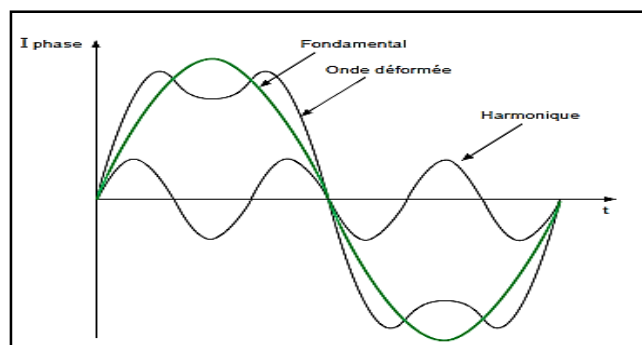


Figure I. 5 Harmoniques

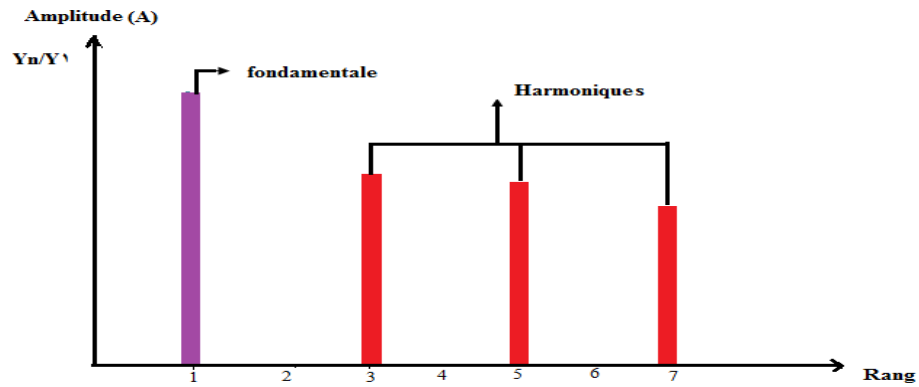


Figure I. 6 Présentation spectrale d'un signal périodique

### I.4 Sources des harmoniques

La cause principale de l'existence des harmoniques de tension est l'injection des courants non sinusoïdaux par des charges dites non linéaires, ainsi les charges déséquilibrées branchées au réseau. Le tableau (I.1) montre quelques sources des harmoniques. [4]

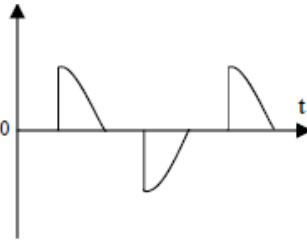
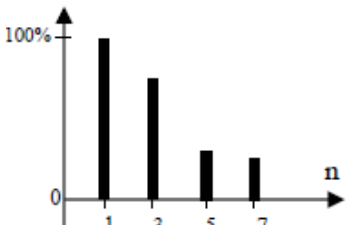
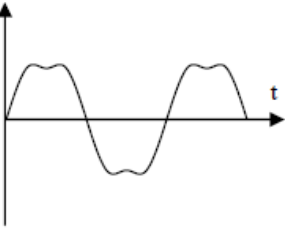
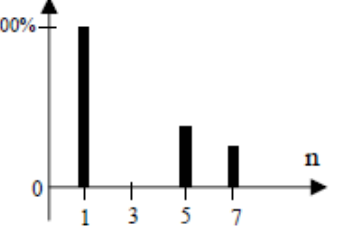
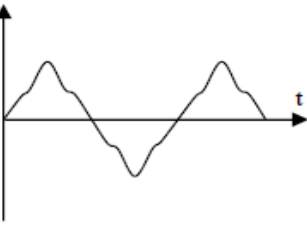
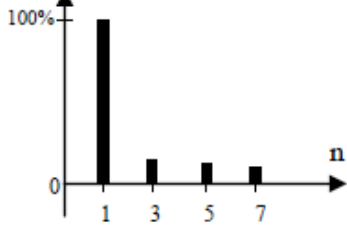
Type de charge	Appareils concernés	Courant absorbé	Spectre harmonique Correspondant
- Gradateurs monophasé (commande par angle de phase).	- Régulation de puissance de fours à résistances, - Modulation de puissance des lampes halogènes.		
- Redresseur triphasé à thyristors.	- Variateur de vitesse des moteurs à courant continu et des moteurs synchrones.		
- Moteur asynchrone.	- Machines-outils, - Appareils électroménagers, - Ascenseurs.		

Tableau I. 1 Sources des perturbations harmoniques

## I.5 Caractérisation des perturbations harmoniques

Le récepteur d'énergie se comporte comme une charge polluante, s'il absorbe des courants non sinusoïdaux ou déséquilibrés ou consomme de l'énergie réactive. La perturbation harmonique est généralement caractérisée par le taux de distorsion harmonique défini pour la tension ou le courant par rapport à une onde sinusoïdale. Le facteur de puissance est utilisé généralement pour définir la consommation de l'énergie réactive. [1]

### I.5.1 Rang de l'harmonique

On définit le rang harmonique comme le rapport de sa fréquence  $f_n$  à celle du fondamental (généralement la fréquence industrielle, 50 ou 60 Hz)

$$n = \frac{f_n}{f_1} \quad (\text{I.1})$$

### I.5.2 Le taux de distorsion harmoniques

La perturbation harmonique est caractérisée par le taux de distorsion harmonique (THD) défini en tension ou en courant.

$$\text{THD \%} = 100 \times \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2(t)}}{I_{\text{fondamentale}}} \quad (\text{I.2})$$

### I.5.3 Le facteur de puissance

En présence des harmoniques, la puissance apparente  $S$  est composée de trois parties : active  $P$ , réactive  $Q$  et déformante  $D$ . Son expression est donnée par l'équation suivante :

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

Pour faire intervenir la participation des harmoniques dans la puissance apparente, nous définissons la puissance déformante  $D$  :

$$D = 3V_1 \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (\text{I.4})$$

la valeur efficace (RMS ou eff) :

$$I_{eff} = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} I_n^2(t)} \quad (\text{I.5})$$

Et le facteur de puissance par :

$$F = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (\text{I.6})$$

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

## I.6 Les effets des harmoniques

Les effets des harmoniques les plus connus et les plus spectaculaires sont la destruction des condensateurs ou des disjoncteurs sous l'effet des forts courants harmoniques amplifiés par des résonances.

Un autre phénomène, de plus en plus rencontré, est l'échauffement des transformateurs et des conducteurs de neutre sous l'effet des courants harmoniques de rang 3. [5]

### a. Les effets instantanés

Ce sont les effets immédiats sur le bon fonctionnement d'un équipement. Par exemple, dans le cas des appareils électroniques, il peut s'agir d'une altération de l'image pour les écrans de télévision ou une altération du son s'il s'agit d'une chaîne HI-FI ou d'un téléphone. La précision des appareils de mesure est également affectée par la présence d'harmoniques. [1]

### b. Les effets à terme

En prendre comme un exemple en explique : l'échauffement des câbles et des équipements, les pertes des câbles traversés par des courants harmoniques sont majorées, entraînant une élévation de température. Parmi les causes de pertes supplémentaires, l'élévation de la résistance apparente de l'âme avec la fréquence. [1]

Nature du matériel électrique	Effet de la «pollution harmonique »
Machines tournantes Moteurs triphasés, alternateurs	Echauffements supplémentaires (effet Joule) dans les enroulements statoriques. Couples oscillatoires. Augmentation du bruit.
Transformateurs	Pertes supplémentaires dans le fer (par courants de Foucault) et dans les enroulements (par effet Joule). Risque de saturation en présence d'harmoniques pairs.
Câbles	Augmentation des pertes surtout dans le câble de neutre où s'ajoutent les harmoniques de rang 3 et multiples de 3. Pertes diélectriques supplémentaires.
Electronique de puissance (ponts redresseurs à thyristor, transistors, etc.)	Troubles fonctionnels liés la forme d'onde (commutation, synchronisation).
Condensateurs de puissance	Pertes diélectriques supplémentaires aboutissant à un vieillissement prématuré des condensateurs
Lampes à décharge	Risque de vacillement

Dispositifs de protection (Fusibles. Disjoncteurs magnétothermiques...)	Fonctionnement intempestif
Ordinateur	Dysfonctionnement lié aux couples pulsatoires des moteurs d'entraînement des supports magnétiques
compteur d'énergie	Erreurs de mesure
Téléviseurs	Déformation d'image

**Tableau I. 2** Effet des harmoniques sur quelques matériels

## I.7 Solutions de dépollution du réseau électrique

Afin de compenser toutes les perturbations, deux méthodes de solution de dépollution, traditionnelle et moderne sont présentés. Le filtrage est une méthode de réduction des missions harmoniques au sein d'un site industriel, où la distorsion harmonique a graduellement augmenté ou comme solution globale pour un nouveau site, donc le filtre est un absorbeur de courants harmoniques. [1]

On distingue les techniques suivantes:

- a) les filtres passifs.
- b) les filtres actifs.
- c) les filtres hybrides.

### I.7.1 Solutions traditionnelles

Afin de dépolluer les réseaux électriques, plusieurs solutions ont été proposées, dont le but est de limiter la propagation et l'effet des harmoniques dans les réseaux électriques. [5]

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

### Filtre résonant

Il est constitué par la mise en série d'une inductance, d'une résistance, et d'un condensateur. La figure (I.7) montre clairement le montage de ce dernier ainsi que leurs impédances en fonction de la fréquence [6]

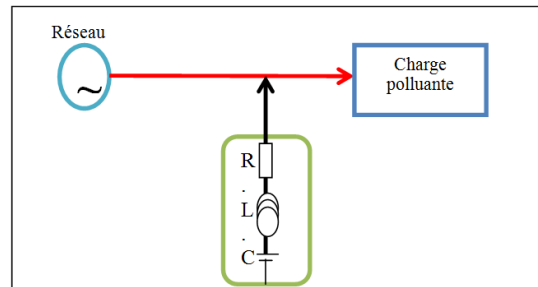


Figure I. 7 Structure du filtre résonant

### Filtre amorti

Le filtre passe-haut compense les harmoniques supérieurs ou égaux à sa fréquence propre. Il peut se connecter en parallèle avec d'autres filtres résonnants. [6]

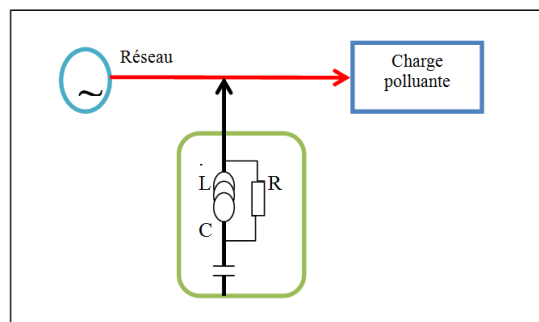


Figure I. 8 Montage du filtre amorti

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

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

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

## I.7.2 Solutions modernes

Deux raisons principales ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtrage moderne et efficace appelée filtre actif. La première raison est due aux inconvénients inhérents des solutions traditionnelles de dépollution qui ne répondent plus à l'évolution des charges et des réseaux électriques. La seconde raison fait suite à l'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs,

comme les thyristors GTO et les transistors IGBT. Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à compenser les perturbations responsables de la dégradation des performances des équipements et installations électriques.

Nous citerons trois topologies possibles de filtres actifs :

-Le filtre actif parallèle (FAP) : conçu pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive,

-Le filtre actif série (FAS) : conçu pour compenser toutes les perturbations de tension comme les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension,

-La combinaison parallèle-série actifs : solution universelle pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension. [7]

### a. Filtrage Actif

Le filtrage actif constitue aujourd'hui une solution plus sophistiquée que le filtrage passif, bénéficiant des technologies les plus performantes et constamment améliorée par les constructeurs.

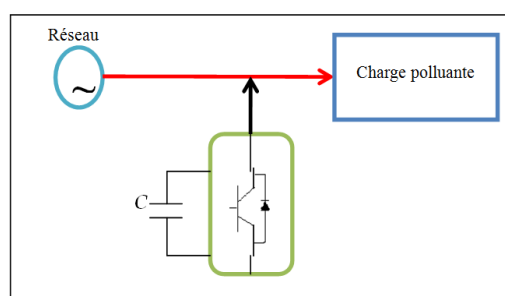
Le principe de fonctionnement du filtre actif réside dans le fait que celui-ci produit des courants qui s'opposent aux courants harmoniques créés par les charges non linéaires, tendant ainsi à rétablir un courant appelé du réseau quasi sinusoïdal.

Ces filtres actifs sont encore appelés compensateurs actifs.

Ils sont utilisés en parallèle ou en série d'une installation nécessitant un traitement harmonique. Dans ce qui suit, nous donnons les structures les plus utilisés dans la littérature, à savoir les filtres parallèle série, combiné parallèle-série et les structures hybrides actifs -passifs. [1]

### b. Filtre actif parallèle (FAP)

Appelé aussi compensateur shunt, il est connecté en parallèle sur le réseau de distribution (figure 1.6). Il est le plus souvent commandé comme un générateur de courant. Il restitue dans le réseau électrique les courants harmoniques  $i_{inj}$  égaux à ceux absorbés par la charge non linéaire mais en opposition de phase, de telle sorte que le courant fourni par le réseau  $i_s$  soit sinusoïdal et en phase avec la tension simple correspondante. Son indépendance vis-à-vis de la source et de la charge lui assure auto-adaptabilité, fiabilité et performance. [7]



**Figure I. 9** Filtre actif parallèle.

### c. Filtre actif série (FAS)

Le filtre actif série engendre des tension harmoniques  $V_h$  dont la somme avec la tension réseau  $V_s$  est une onde sinusoïdale (figure I.10). Il est destiné à protéger les installations sensibles aux perturbations provenant du réseau telles que les harmoniques en tension, les surtensions.

En revanche, le filtrage série ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge. [3]

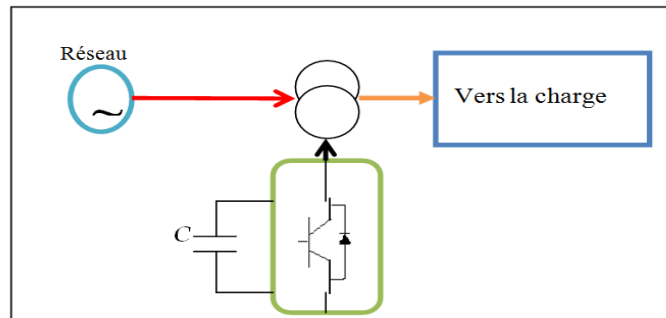


Figure I. 10 Filtre actif série.

### d. La combinaison parallèle-série actifs (UPQC)

Cette combinaison parallèle-série actifs, aussi appelée Unified Power Quality Conditioner (UPQC), résulte de l'association des deux filtres actifs parallèle et série, comme le montre la Figure (I.11). Profitant des avantages des deux filtres actifs, l'UPQC assure un courant et une tension sinusoïdaux du réseau électrique à partir d'un courant et d'une tension perturbés de celui-ci. [1]

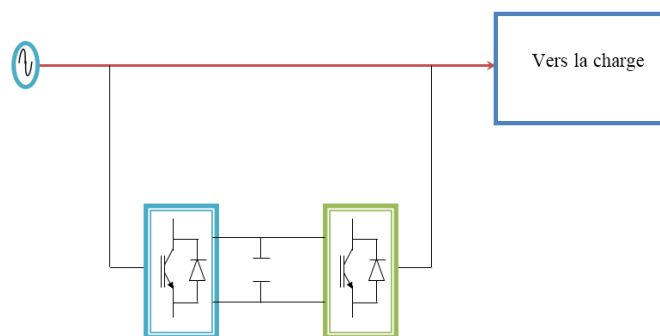


Figure I. 11 Filtre combiné parallèle-série (UPQC).

Il existe plusieurs autres groupes mixtes de filtres actifs avec cette fois des filtres passifs:

- Le filtre actif série connecter en série avec des filtres passifs parallèles.
- Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles.
- Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.

## I.8. Conclusion

Les charges non linéaires sont de plus en plus présentes comme récepteurs consommateurs dans les réseaux de distribution industrielle, Elles produisent une pollution électrique harmonique qui nécessite généralement un dispositif d'élimination de ces perturbations et compensation de l'énergie réactive qu'ils consomment. Puis on a abordé les principales perturbations harmoniques et les moyens techniques permettant de les limiter dont il existe plusieurs, les solutions classiques présentent de nombreuses contraintes pour répondre à un besoin actif de dépollution, elles sont souvent pénalisées en termes d'encombrement, de résonance et d'une mauvaise adaptation face à l'évolution du réseau et aux charges polluant

# **Chapitre II**

## **Principe du filtre actif parallèle**

## II.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous étudions la structure générale d'un FAP triphasé permettant de compenser les harmoniques de courant d'un réseau électrique triphasé à trois fils. Tout d'abord, nous introduirons les trois blocs principaux de la partie puissance, à savoir l'onduleur triphasé à structure tension, l'élément de stockage d'énergie et le filtre de sortie. Dans cette même chapitre, nous présentons les différentes topologies de FAP. à savoir l'identification des courants de référence, la poursuite des courants de référence et la régulation de la tension continue[3].

## II.2. Principe de filtre actif

### II.2.1 Filtre actif

Dans le cas idéal le rôle du filtre actif consiste à éliminer tous les harmoniques produits par la charge non linéaire en fournissant à tout instant des harmoniques égaux en amplitude et en opposition de phase à ceux produits par la charge, et ceci afin que le courant dans la ligne reste purement sinusoïdal et égal au fondamental du courant de charge [8].

### II.2.2 Objectif du filtre actif

Un filtre actif est un dispositif qui exploite au moins un convertisseur statique pour satisfaire la fonction de dépollution harmonique. Les besoins en termes de dépollution harmonique sont divers, parce qu'on espère toujours garantir:

- La non pollution d'un réseau propre alimentant une charge sensible.
- Le bon fonctionnement d'une charge sensible dans un environnement pollué.

## II.3. Le filtre actif parallèle

### II.3.1 Principe de fonctionnement

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau, comme le montre la Figure (II.1), est le plus souvent commandé comme un générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant côté réseau est alors sinusoïdal. Ainsi l'objectif du filtre actif parallèle consiste à empêcher les courants perturbateurs (harmoniques, réactifs et déséquilibrés), produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif [4].

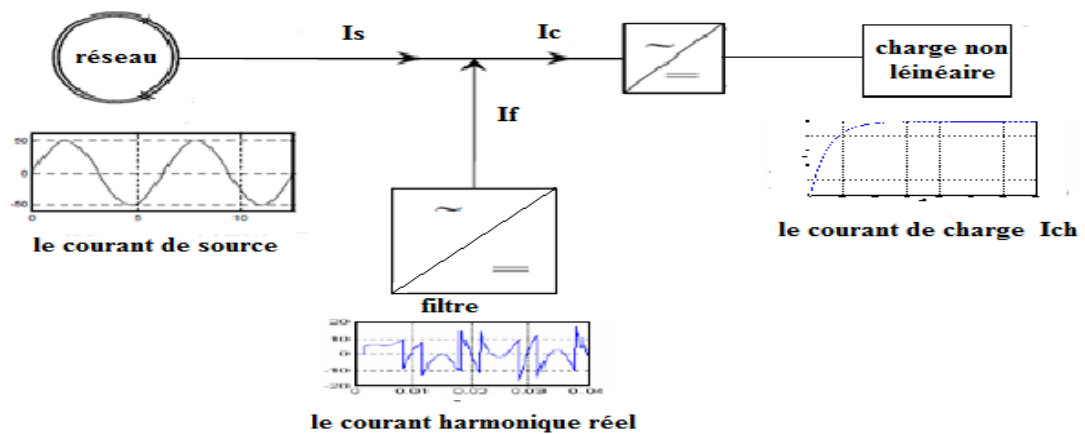


Figure II. 1 Principe du filtrage actif parallèle

### II.3.2 Structure générale d'un filtre actif parallèle

La figure (II.2) montre la structure d'un filtre actif composé en deux parties:

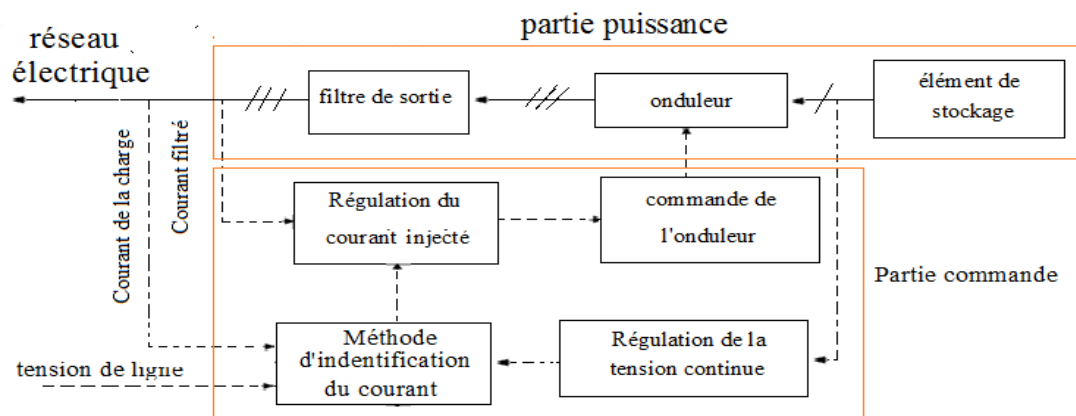


Figure II. 2 Structure générale d'un filtre actif parallèle

La partie puissance qui est constituée:

- D'un onduleur de tension.
- D'un circuit de stockage d'énergie, souvent capacitif.
- D'un filtre de sortie.

La partie commande qui est constituée:

- D'un circuit d'identification des courants perturbés.
- D'un système de commande de l'onduleur de tension.
- De la régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie.
- De la régulation du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension.

### II.3.3 Applications des filtres actifs parallèles

La principale charge polluante, le redresseur à diodes ou à thyristors, est très utilisée que cela soit pour alimenter des charges continues à partir du réseau ou comme un élément d'interfaçage au réseau dans une conversion à étage intermédiaire continu. De plus en plus de dispositifs de ce type se connectent au réseau électrique. De ce fait, les filtres actifs parallèles sont un champ d'utilisation naturel dans les applications de réseau, notamment dans les réseaux avec plusieurs charges polluantes et dans les réseaux à courant continu en haute tension.

Les filtres actifs sont également utilisés dans des applications industrielles, afin de dépolluer une zone avec plusieurs charges non linéaires (redresseurs, certains éclairages, etc.). En fin, le filtrage actif est également employé dans les applications tertiaires car les filtres actifs peuvent être intéressants dans les bâtiments commerciaux, hôpitaux, etc. dans lesquels il y a de nombreuses charges

polluantes comme des ordinateurs, éclairage économique. Ces filtres actifs compensent les courants harmoniques, les courants réactifs et les déséquilibres des charges.

Les applications réseau, industrielles, tertiaires, domestiques et en télécommunications apparaissent comme des environnements particulièrement pollués par les harmoniques. Les filtres permettent une compensation globale des harmoniques, souvent jusqu'à l'harmonique 50. Ces filtres actifs, en plus de réduire les courants harmoniques, améliorent le facteur de puissance et équilibrent les charges triphasées. L'utilisation de ces filtres produit une réduction des coûts d'exploitation et une prolongation de la durée de vie de l'installation [9].

### II.3.4 Classement des filtres actifs parallèles

Il existe une grande variété de types de filtres actifs parallèles. Ils sont classés de différentes manières selon le nombre de phases, la technologie de l'onduleur et la topologie :

- Filtres actifs monophasés ou triphasés ;
- Filtres actifs avec ou sans neutre raccordé ;
- Filtres actifs basés sur l'onduleur de tension ou sur le commutateur de courant.

Même si les filtres actifs monophasés ont été largement étudiés dans la littérature, dans les applications industrielles, ce sont les filtres actifs triphasés qui sont les plus répandus (pour des applications de type variateurs ou redresseurs à dépolluer) du fait que les filtres monophasés sont normalement limités aux applications en basse puissance (les redresseurs des sources d'alimentation en continu), sauf dans le cas de la traction électrique. La deuxième classification se fait autour de la topologie utilisée, avec ou sans neutre raccordé. Les filtres actifs avec neutre raccordé ont été développés afin de pouvoir injecter et compenser les composantes homopolaires. Dans la littérature la plupart des filtres sont connectés sans neutre raccordé. Toutefois, on trouve plusieurs filtres avec neutre raccordé : certains avec un onduleur à trois bras et d'autres avec un onduleur à quatre bras ; en ce qui concerne la technologie de l'onduleur, les filtres actifs sont soit basés sur l'onduleur de tension avec un condensateur du côté continu et un filtre de raccordement inductif du côté réseau, soit sur un commutateur de courant avec une inductance du côté continu et un filtre de raccordement capacitif du côté réseau. Actuellement, même si l'on trouve des articles basés sur le commutateur de courant, l'onduleur de tension est généralement préféré à cause de son meilleur rendement, de son moindre coût et de son volume plus réduit (si l'on compare le condensateur et l'inductance du côté continu). Par ailleurs, les modules à IGBTs disponibles actuellement sur le marché sont bien adaptés aux onduleurs de tension car en général une diode en antiparallèle est rajoutée pour chaque IGBT. Le commutateur de courant a quant à lui besoin de mettre en série avec chaque IGBT une diode anti-retour. De plus, un aspect vient renforcer provisoirement le choix : le commutateur de courant ne peut pas être utilisé avec des topologies multi-niveaux classiques. En conséquence presque tous les filtres actifs qui sont sur le marché sont composés d'onduleurs de tension [9].

## II.4. Structure de l'onduleur à trois niveaux

L'idée de base de l'onduleur NPC est l'obtention d'une tension de sortie à trois niveaux par la superposition de deux interrupteurs élémentaires alimentés chacun par une source de tension continue distincte.

L'onduleur triphasé à trois niveaux utilisé est constitué de trois bras et de deux sources de tension continue. Chaque bras comporte quatre interrupteurs en série et deux diodes médianes. Chaque interrupteur est composé d'un transistor et une diode montée en tête bêche,

Le point milieu de chaque bras est relié à une alimentation continue, de force électromotrice (E). A l'aide d'un diviseur de tension capacitif formé par les condensateurs de filtrage C1 et C2 de même capacité, on obtient deux sources secondaires de tension continue délivrant chacune une demi tension ( $E/2$ ). Étant connectés entre eux en un point neutre noté o. Ces derniers sont identiques de manière à éviter le déséquilibre de charge ( $C1=C2$  c'est-à-dire  $U_{c1}=U_{c2}$ ).

Le point o est connecté avec les deux diodes médianes (DDK1, DDK2), [10]. La figure (II.3) fournit une représentation schématique de cet onduleur.

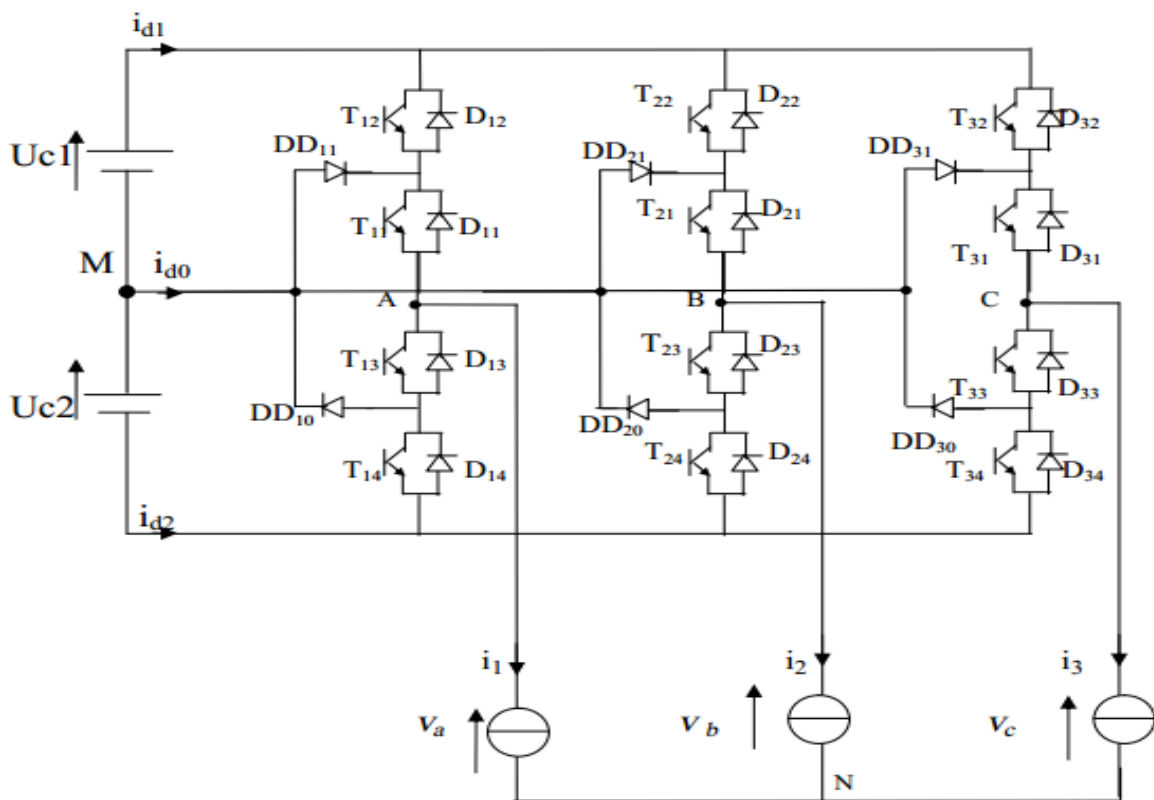


Figure II. 3 Schéma d'un onduleur NPC à 3 niveaux

## II.5. Identification des courants harmoniques de référence

### II.5.1 Méthodes du domaine fréquentiel

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

Les inconvénients les plus importants de ces méthodes sont des résultats moyens en régime transitoire et un volume de calcul et une allocation de mémoire très considérables [1].

### II.5.2 Méthode du domaine temporel

Les méthodes du domaine temporel permettent une réponse plus rapide et requièrent moins d'opérations que les méthodes précédentes. Le principe de ce type de méthodes est séparation du fondamental ou de certains harmoniques du reste des harmoniques par filtrage. Les méthodes les plus importantes sont [1]:

- La théorie P-Q de la puissance instantanée,
- Algorithme du Repère de Référence Synchronisé (SRF),
- Algorithme de la détection synchronisée (SDA),
- Algorithme Fryze-Bucholz Depenbanck (FBD),
- La méthode sinusoïdale Généralisée de Fryze (SGF),
- La méthode basée sur le courant actif,
- La méthode tri-monophasée,
- La méthode basée sur la régulation de la tension continue.

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

Tableau II. 1 Comparaison entre les méthodes d'identification des harmoniques.

### II.5.3 Stratégie de l'identification:

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

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

La première méthode est la plus utilisée pour le filtre actif parallèle pour compenser les courants perturbateurs causés par les charges polluantes [4]. Cette méthode de détection sera employer dans cette étude.

### II.5.4 Généralités sur les puissances instantanées

En présence des harmoniques, la puissance apparente est composée de trois parties : active (**P**), réactive (**Q**) et déformante (**D**) comme le montre la relation (II.1). [11]

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

Cette méthode exploite la transformation  $\alpha$ - $\beta$  pour obtenir les puissances réelles et imaginaires. Notons par ( $V_\alpha$ ,  $V_\beta$ ) et ( $I_\alpha$ ,  $I_\beta$ ) les composantes orthogonales du repère  $\alpha$ - $\beta$  associées respectivement aux tensions de raccordement du filtre actif parallèle ( $V_s$ ) et aux courants absorbés par les charges polluantes ( $I_s$ ). La transformation  $\alpha$ - $\beta$ -0 triphasée permet d'écrire la relation des tensions suivante [11].

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

Et la relation des courants ci-dessous

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

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

$$\left\{ \begin{array}{l} P(t) = V_{a1} I_{a1} + V_{b2} I_{b2} + V_{c3} I_{c3} = P(t) + P_0(t) \\ P(t) = V_{\alpha} I_{\alpha} + V_{\beta} I_{\beta} \\ P_0(t) = V_0 I_0 \end{array} \right. \quad (\text{II.4})$$

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

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

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

$$q(t) = 1/\sqrt{3} [(V_{a1}-V_{b2})I_{c3} + (V_{b2}-V_{c3})I_{a1} + (V_{c3}-V_{a1})I_{b2}] = V_{\alpha} I_{\beta} - V_{\beta} I_{\alpha} \quad (\text{II.5})$$

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

nous avons la relation matricielle suivante:

$$\begin{bmatrix} P \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{\alpha} & V_{\beta} \\ -V_{\beta} & V_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

Dans le cas général, chacune des puissances  $p$  et  $q$  comporte une partie continue et une partie alternative, ce qui nous permet d'écrire l'expression ci-dessous : [1]

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

- $\bar{P}$  Une puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant et de la tension.
- $\bar{q}$  Une puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant et de la tension.
- $\tilde{P}$  et  $\tilde{q}$  des puissances alternatives liées à la somme des composantes perturbatrices du courant et de la tension. [1]

### II.5.4.1 Séparation des puissances perturbatrices

Après avoir identifié les pulsations des puissances instantanées, le filtre de puissance chargé d'isoler les puissances active et réactive conventionnelles peut être dimensionné. Pour avoir la composante alternative, on utilise un filtre passe haut. [11]

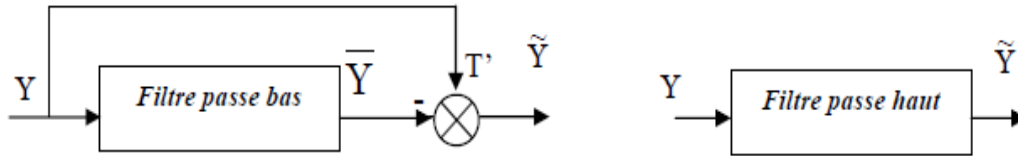


Figure II. 4 schéma représentant le principe de séparation ( $Y= p$  ou  $q$ )

### II.5.4.2 Calcul des courants perturbateurs

En inversant la relation (II.6), nous pouvons recalculer les courants dans le repère ( $\alpha$ - $\beta$ ) comme le montre l'équation (II.8) [11].

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

En considérant les équations (II.7) et (II.8), nous pouvons séparer le courant dans le repère ( $\alpha$ - $\beta$ ) en trois composantes, active et réactive à la fréquence fondamentale et les harmoniques. Ceci conduit à: [1]

$$\begin{bmatrix} i\alpha \\ i\beta \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v\alpha & -v\beta \\ v\beta & v\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ 0 \end{bmatrix}}_{\text{Courant actif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v\alpha & -v\beta \\ v\beta & v\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ q \end{bmatrix}}_{\text{courant réactif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v\alpha & -v\beta \\ v\beta & v\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix}}_{\text{courants harmoniques}} \quad (\text{II.9})$$

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

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

On appliquant la transformation inverse de Concordia on trouve les courants produits par charge non linéaire comme suit : [11]

$$\begin{bmatrix} i_{1h} \\ i_{2h} \\ i_{3h} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} i_{\alpha h} \\ i_{\beta h} \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

On trouve la relation globale des courants harmoniques

$$\begin{bmatrix} i_{1h} \\ i_{2h} \\ i_{3h} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \frac{1}{V^2_{\alpha} + V^2_{\beta}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{\alpha} & -V_{\beta} \\ V_{\beta} & V_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

### II.5.5 Algorithme d'identification

Le schéma de la figure (II.5) illustre les différentes étapes permettant l'obtention des composantes harmoniques du courant d'une charge non linéaire.

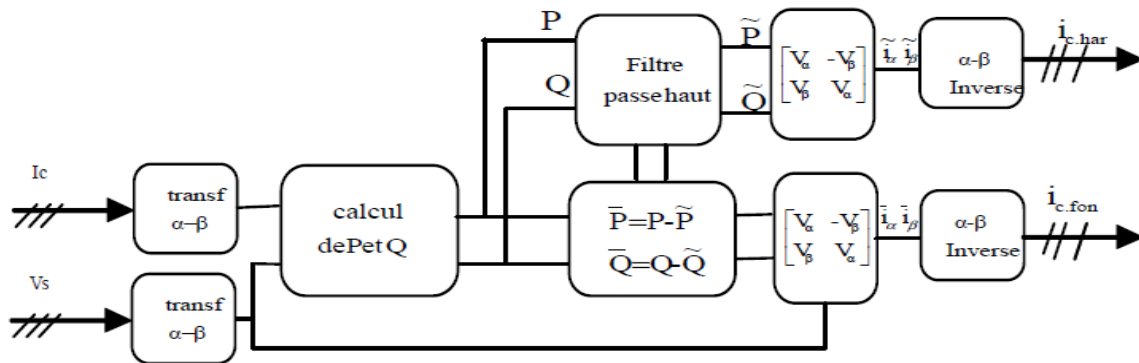


Figure II. 5 algorithme d'identification des harmoniques.

## II.6. Commande de l'onduleur

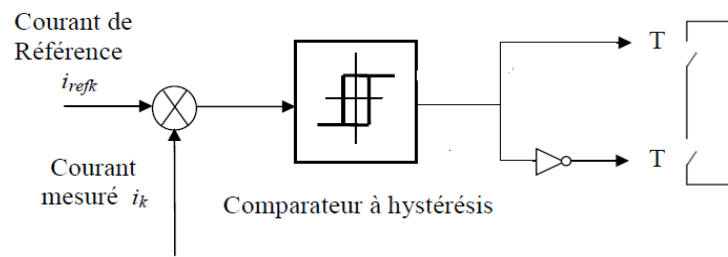
Pour maintenir le courant à la sortie du filtre actif autour de sa référence calculée par les trois techniques de commande peuvent être utilisées :

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

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

### II.6.1. Commande des courants par hystérésis

Cette commande est très adaptée pour les organes ayant une action à deux positions comme c'est le cas ici, l'IGBT peut être soit ouvert ou bloqué, cette commande consiste à changer la polarisation de la tension de sortie de l'onduleur de telle sorte à maintenir le courant dans une bande centrée autour de la référence, la dimension de ce filtre se résume à fixer la largeur de cette bande. Une règle pratique consiste à la prendre à 5% du courant nominal. Cependant elle ne garantit pas d'une manière systématique le respect de la fréquence de commutation maximale des semi-conducteurs. [11]



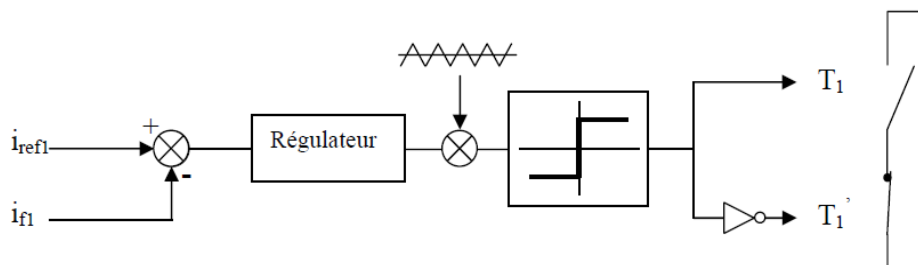
**Figure II. 6** Principe de la commande des courants par hystérésis

Malgré sa simplicité de mise en œuvre, sa robustesse et sa bonne dynamique, cette commande présente certains inconvénients à savoir :

- La fréquence de commutation est variable.
- La somme des trois courants n'est pas forcément nulle, ce qui crée un déséquilibre des courants qui dépend de la bande d'hystérésis. [11]

## II.6.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)

Afin de contourner les problèmes précédents, nous introduisons une deuxième famille de commande de l'onduleur: la commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI). La technique de commande par MLI résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation en fonctionnant avec une fréquence fixe facile à filtrer en aval de l'onduleur. La plus simple et la plus connue des modulations de largeur d'impulsion est sans doute la MLI à échantillonnage naturel, dite MLI intersective. Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur (modulatrice) à partir de l'écart entre le courant mesuré et sa référence. Cette dernière est ensuite comparée avec un signal triangulaire (porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs. Le schéma de principe est donné par la Figure (II.7). [11]



**Figure II. 7** Principe de commande des courants par MLI

Les signaux logiques C qui en résultent donnent l'ordre de commutation des interrupteurs du filtre (Figure II.8)

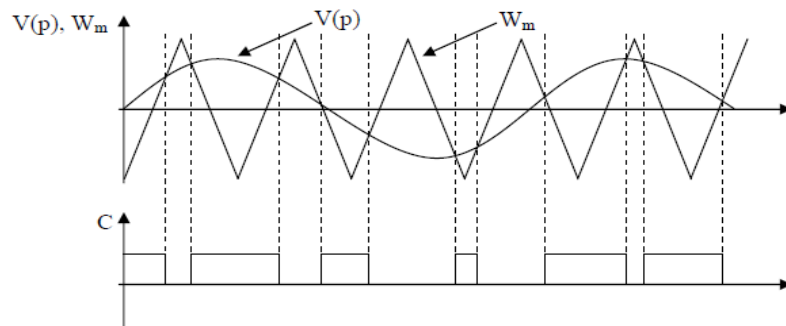


Figure II. 8 Répartition des commutations sur un bras d'un onduleur

## II.6.3 La logique floue

### II.6.3.1 Principe et définitions

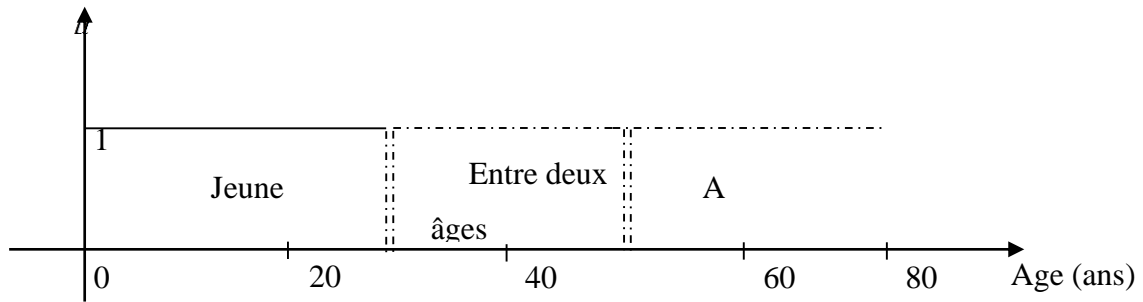
La logique floue repose sur la théorie des ensembles flous développée par Zadeh. A coté d'un formalisme mathématique fort développé, nous préférons aborder la présentation de manière intuitive.[12]

Le terme « logique floue » a deux aspects :

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

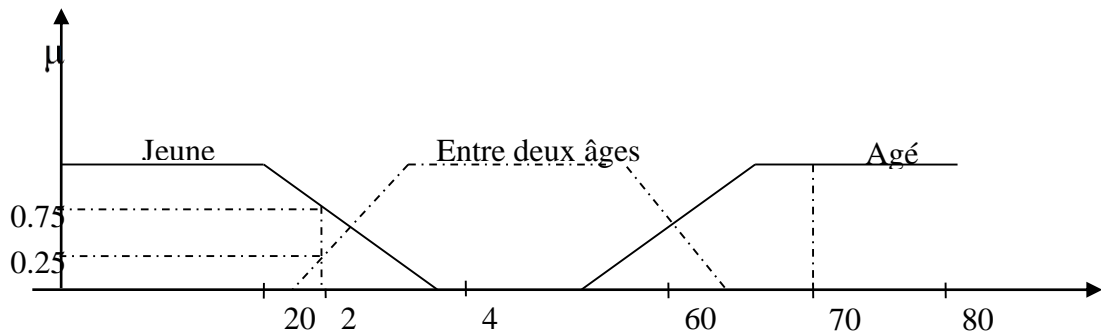
Pour le cas de la logique classique (logique de boucle) qui admet deux valeurs 0 ou 1, la classification pourrait se faire comme dans la figure (II.9). Toutes les personnes âgées de moins de 30 ans appartiennent à l'ensemble jeune et toutes les personnes âgées de plus 50 ans sont considérées comme appartenir à l'ensemble « âgé ».

Cependant une telle logique de classification n'est même pas logique car la question qui se pose: pourquoi une personne âgée de 50 ans doit être considérée comme appartenant à l'ensemble « âgé »? En réalité un tel passage se fait progressivement et individuellement. En outre lors de la classification par logique classique on ne prend pas en considération des personnes situées dans la zone « entre deux âges » [13].



**Figure II. 9** Classification des personnes en trois ensembles selon la logique classique

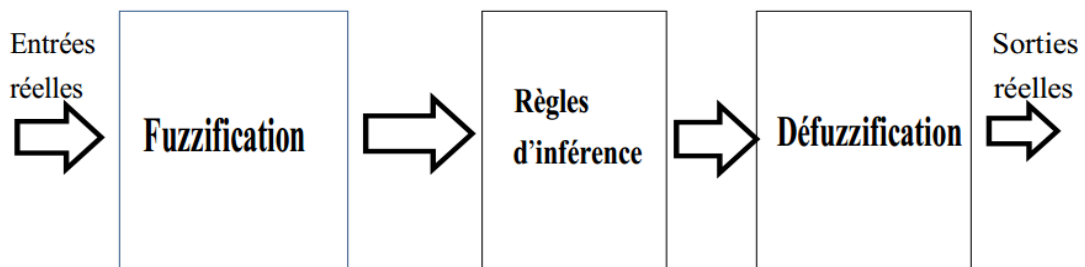
La logique floue, dont la fonction d'appartenance peut prendre n'importe quelle valeur entre 0 et 1 permet de tenir compte de cette réalité. Il est donc possible de trouver une autre classification pour l'exemple précédant à l'aide de la logique floue. Les limites ne varient pas soudainement mais progressivement comme le montre la figure (II.10). [13]



**Figure II. 10** Classification des personnes en trois ensembles selon la logique floue

### II.6.3.2 Structure d'un système flou

Un système flou peut être interprété selon deux points de vue : mathématique ou logique. D'un point de vue mathématique, un système flou est une fonction non linéaire reliant un vecteur de données d'entrée à un vecteur de sortie et, de point de vue logique, un système flou est un système de prise de décisions, à base de connaissances particulières composé de trois modules principaux, à savoir : la fuzzification, les règles d'inférence et la défuzzification. [14]



**Figure II. 11** Structure d'un système flou

### II.6.3.3 Commande par hystérésis à bande floue

Cette technique de modulation consiste également à réduire les écarts entre les courants de références et les courants générés par le filtre actif et cela à fréquence constante. Les variables de l'équation peuvent être facilement implantées avec la logique floue tout en améliorant les performances du filtre actif. Dans cette étude, on prend comme variable de sortie la bande hystérésis et comme variable d'entrée, la dérivée du courant de référence  $di^*/dt$  et de la tension du réseau  $V_s(t)$ . On notera que pour la variable de sortie les fonctions d'appartenance correspondant aux sous-ensembles flous sont: TTP: Très Petit Positif, PP: Petit Positif, PM: Moyen Positif, PG: grand positif, TPG: Très Grand Positif. Chaque variable d'entée est transformée en grandeur linguistique à cinq sous-ensemble floue PG: Grand Positif, PM: Moyen Positif, EZ: Environ Zéro, NM Négatif Moyen, NG: Négatif Grand comme le montre la figure (II.12).

Les règles de commande sont résumées dans la matrice d'inférence en tableau (III.2) [11]

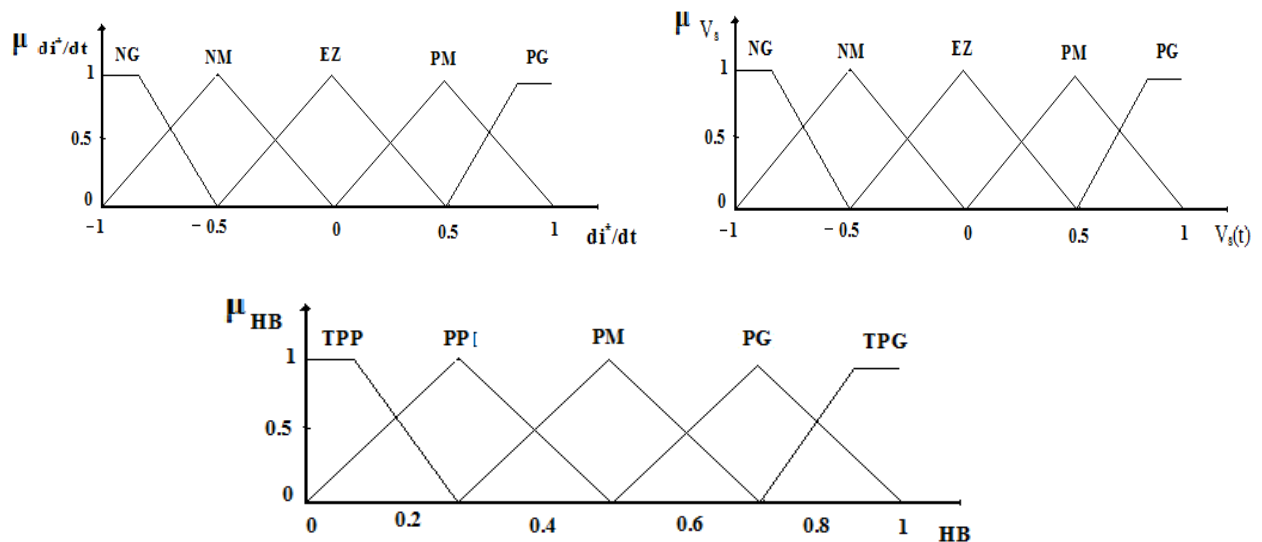


Figure II. 12 Les fonction d'appartenance des variable

$I_r^*/dt$	<b>NG</b>	<b>NM</b>	<b>EZ</b>	<b>PM</b>	<b>PG</b>
$V_s(t)$	<b>PP</b>	<b>PP</b>	<b>PM</b>	<b>PP</b>	<b>PP</b>
<b>NG</b>	<b>PP</b>	<b>PM</b>	<b>PG</b>	<b>PM</b>	<b>PP</b>
<b>NM</b>	<b>TPP</b>	<b>PM</b>	<b>TPG</b>	<b>PM</b>	<b>TPP</b>
<b>EZ</b>	<b>PP</b>	<b>PM</b>	<b>PG</b>	<b>PM</b>	<b>PP</b>
<b>PM</b>	<b>PP</b>	<b>PP</b>	<b>PM</b>	<b>PP</b>	<b>PP</b>
<b>PG</b>	<b>PP</b>	<b>PP</b>	<b>PM</b>	<b>PP</b>	<b>PP</b>

Tableau III. 1 Règles de la commande floue

## II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le principe du filtre actif parallèle comme une solution de dépollution des réseaux électriques des courants perturbateurs comme le courant harmonique.

La méthode d'identification des puissances instantanées a été choisie pour offrir la possibilité d'identifier un, plusieurs ou tous les courants perturbateurs du réseau électrique. Le chapitre suivant sera consacré à l'étude de Etude de la Structure et des Stratégies de Commande des Filtrés Actifs Parallèles trois niveaux.

# **Chapitre III**

## Commande du filtre actif parallèle à trois niveaux

### III.1. Introduction

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

### III.2 Schéma global de l'association réseau-charge-onduleur avant et après compensation

Le fonctionnement global du système filtre actif parallèle appliqué pour la compensation des courants harmoniques générés par une charge non linéaire qui est dans notre cas un redresseur hexaphasé non commandé est donné par la figure (III.1)

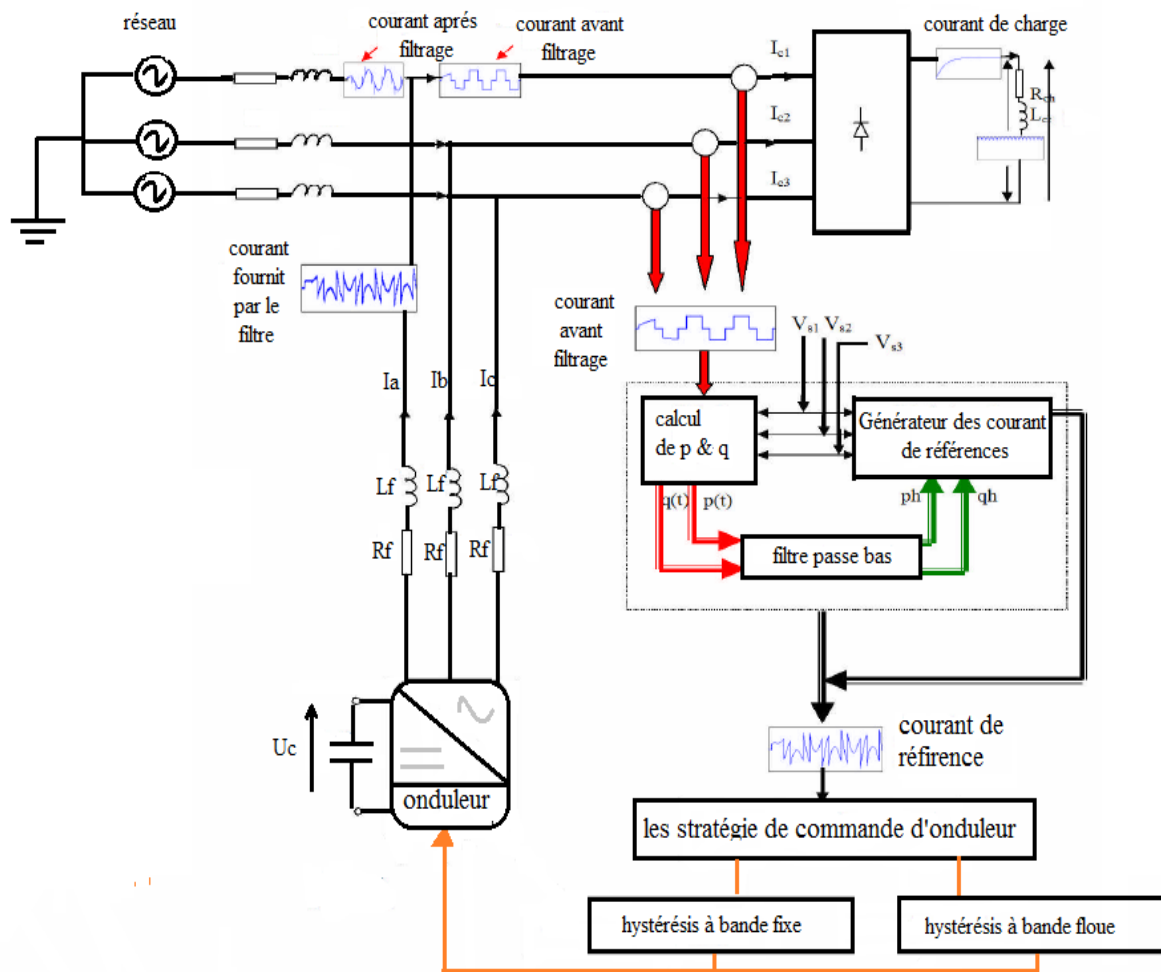


Figure III. 1 Schéma global de l'association réseau-charge-onduleur avant et après compensation

### III.3 Résultats de la simulation

#### III.3.1 Stratégie de commande hystérésis

➤ Pour une bande  $h=0.1$  A

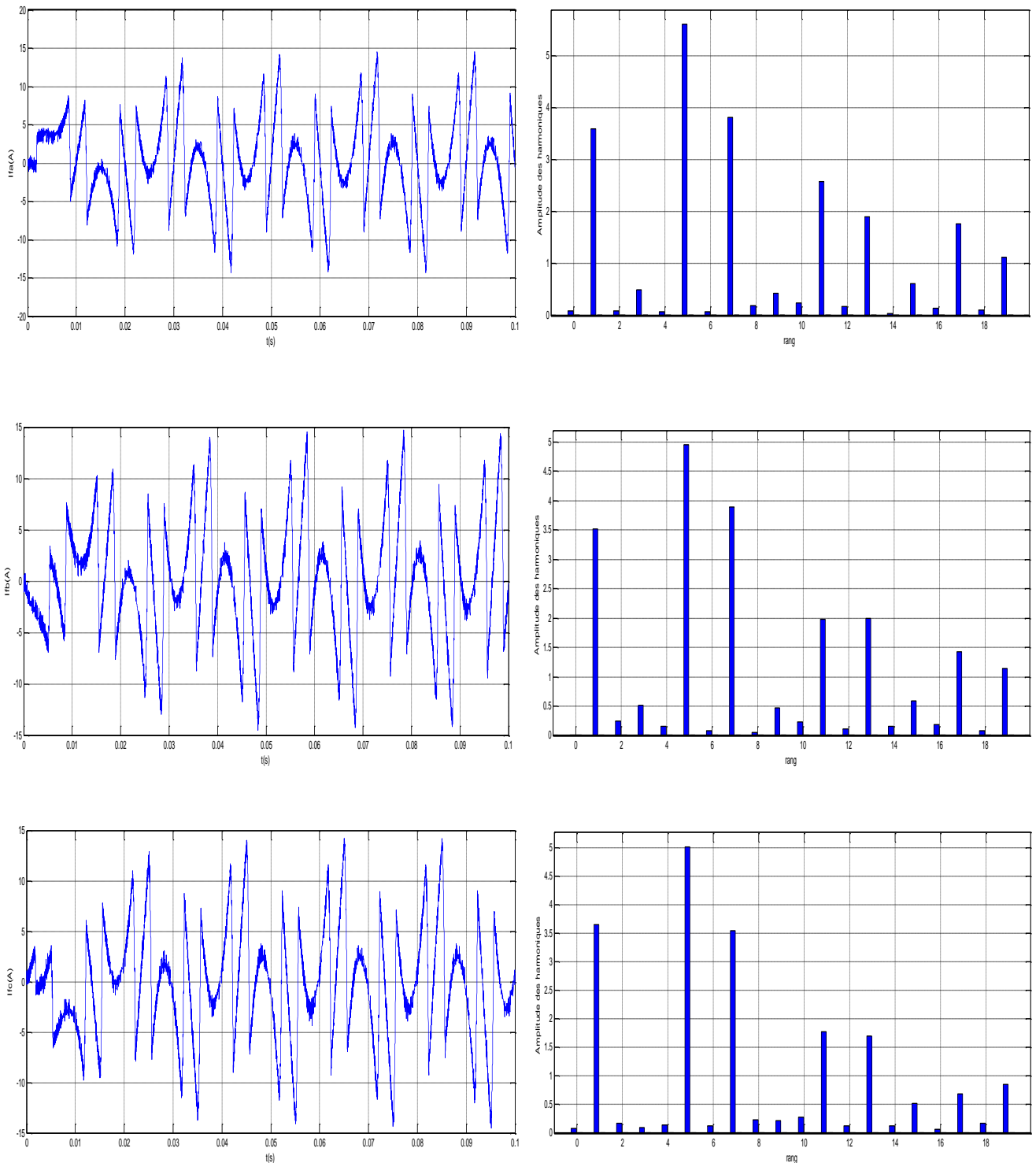
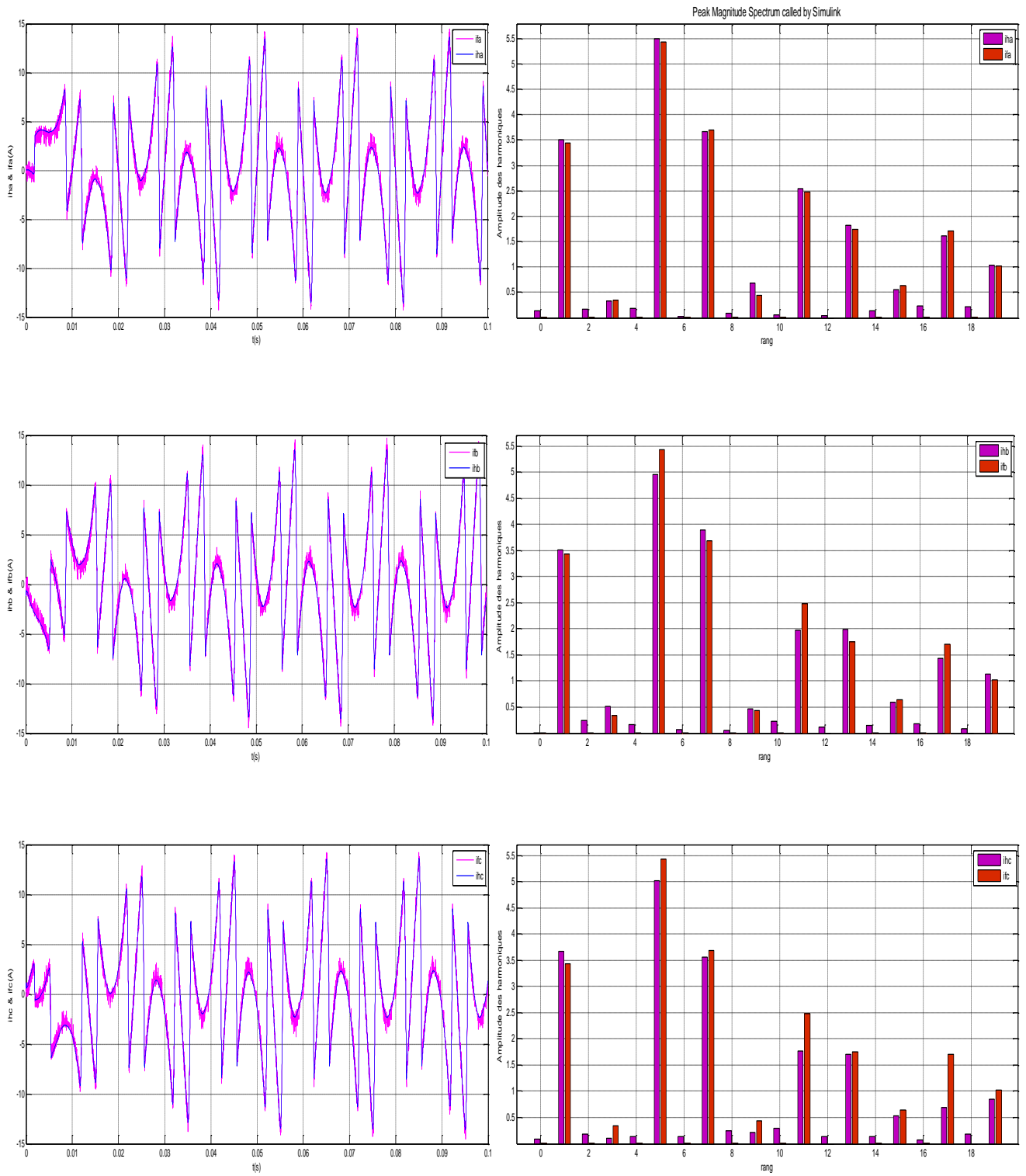
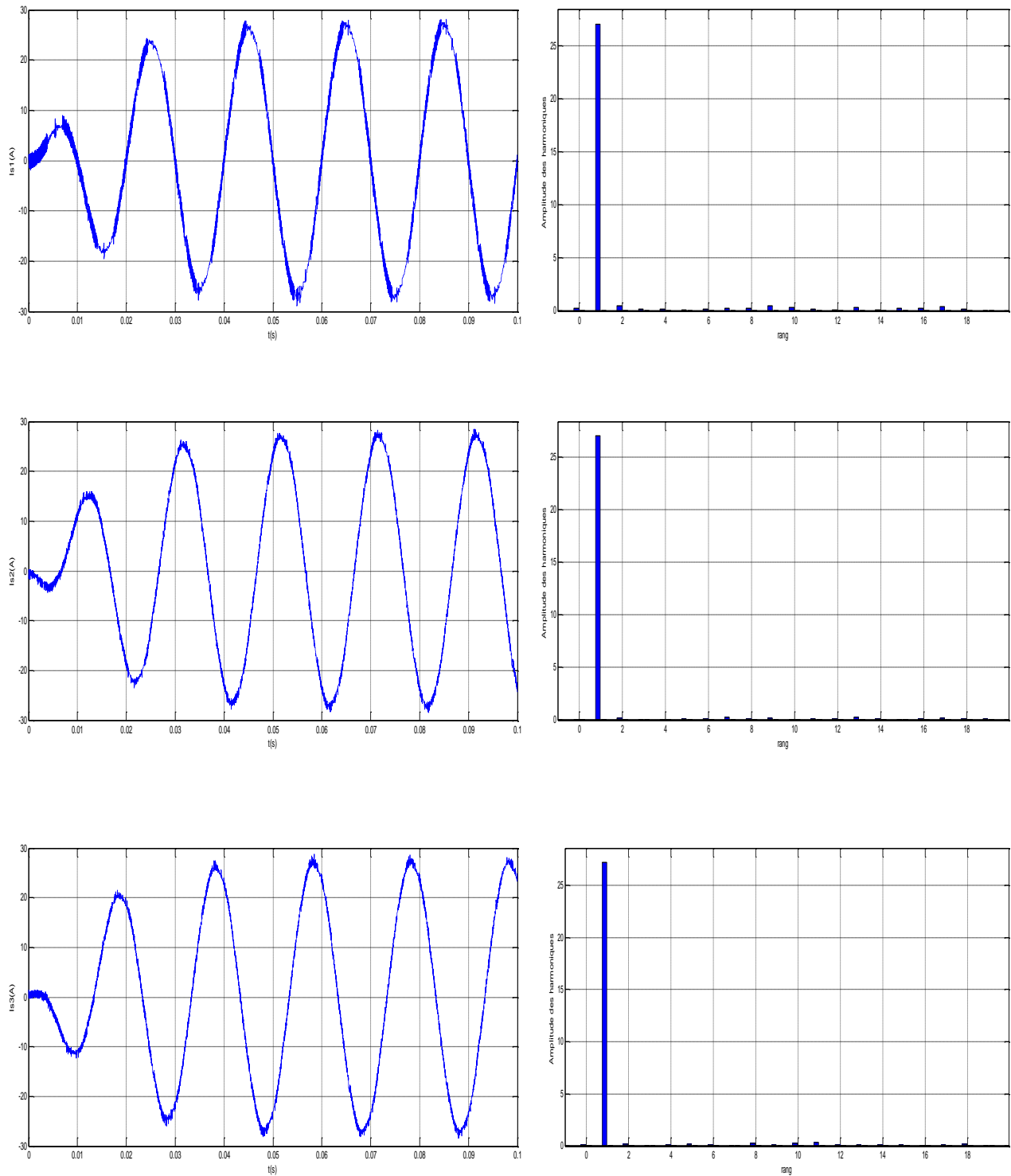


Figure III. 2 Courants injectés par l'onduleur et leurs spectres fréquentiels pour

La commande à hystérésis ( $\Delta h = 0.1$  A).

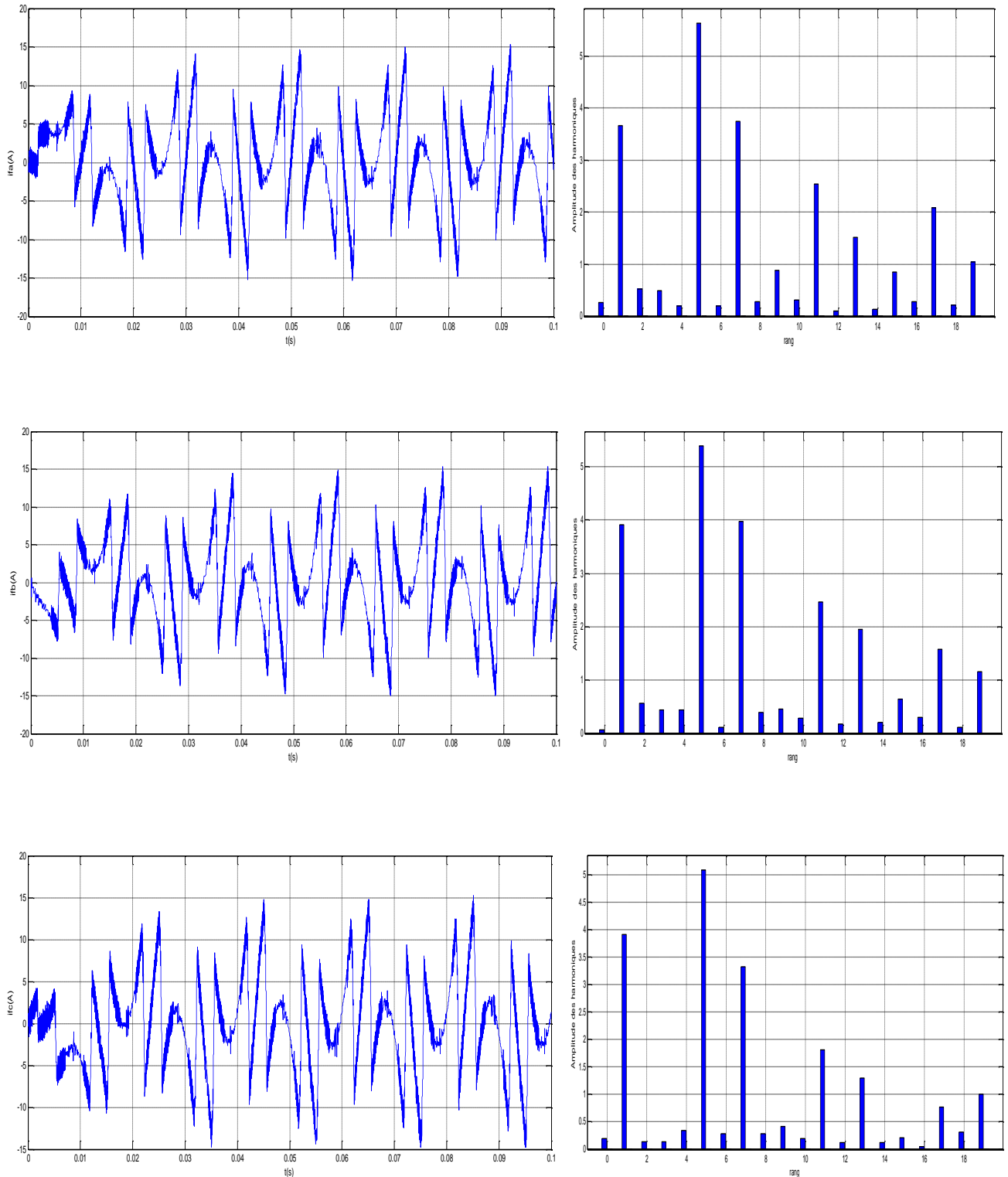


**Figure III. 3** Courants de référence, injectés et leurs spectres pour la commande à hystérésis ( $\Delta h = 0.1$  A)

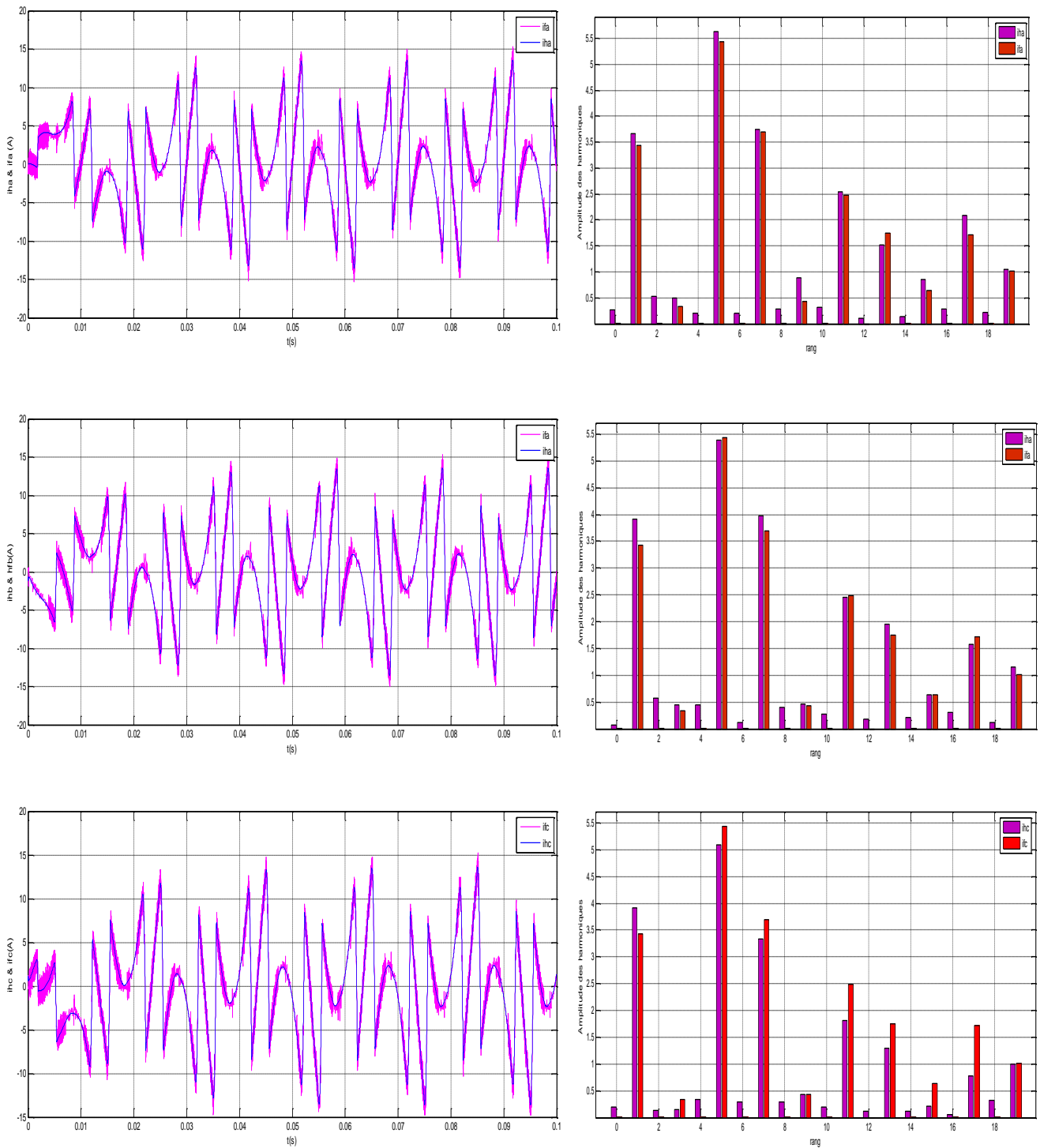


**Figure III. 4** Courants de source après filtrage et leurs spectres fréquentiels pour la Commande à hystérésis ( $\Delta h = 0.1$  A).

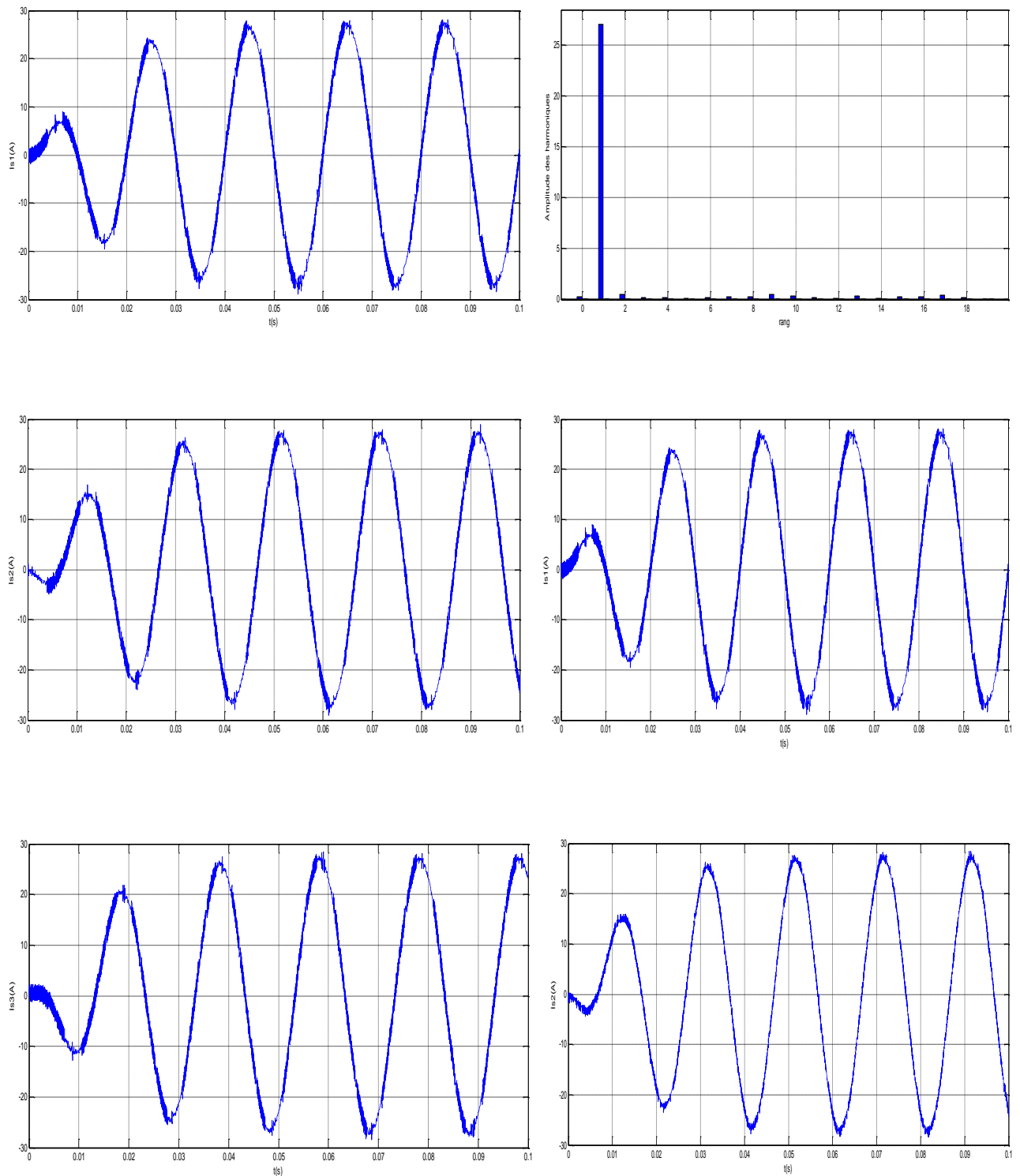
➤ Pour une bande  $h=1$  A :



**Figure III. 5** Courants injectés par l'onduleur et leurs spectres fréquentiels pour la commande à hystérésis ( $\Delta h = 1$  A)



**Figure III. 6** Courants de référence, injectés et leurs spectres pour la commande à hystérésis ( $\Delta h = 1$  A)



**Figure III. 7** Courants de source après filtrage et leurs spectres fréquentiels pour la Commande à hystérésis ( $\Delta h= 1$  A).

### III.3.2 Interprétation

Les figures précédentes montrent:

- L'amélioration de la forme des courants de source après filtrage.
- La diminution de la bande d'hystérésis entraîne une amélioration de la qualité des Courants : (THDI = 2.54% pour  $\Delta h = 0.1$  A et THDI = 4.50% pour le cas  $\Delta h = 1$  A).
- On a utilisé une inductance après le point de raccordement du filtre actif pour éliminer la présence des pics au niveau des courants de source.

### III.3.3 Résultats de la simulation pour la commande hystérésis à bande floue

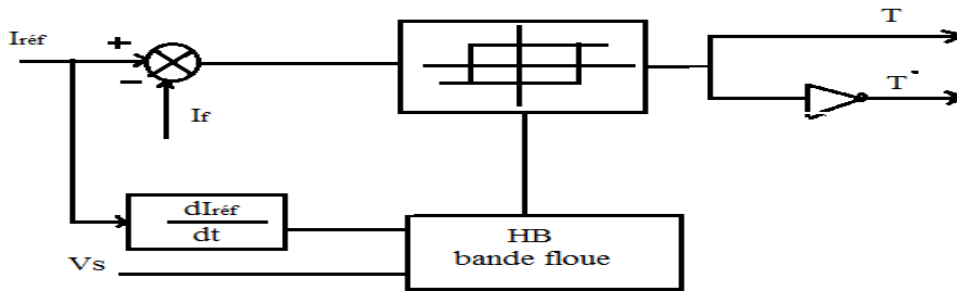


Figure III. 8 commande hystérésis à bande floue

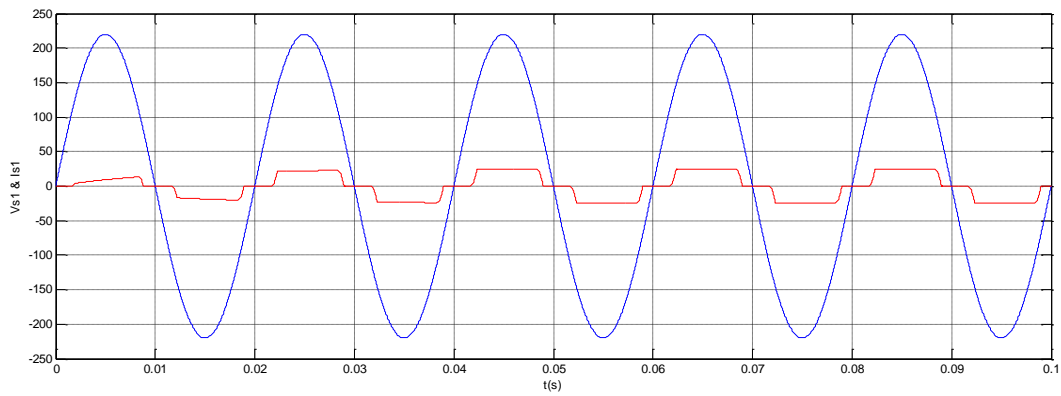


Figure III. 9 la tension et le courant avant le filtrage

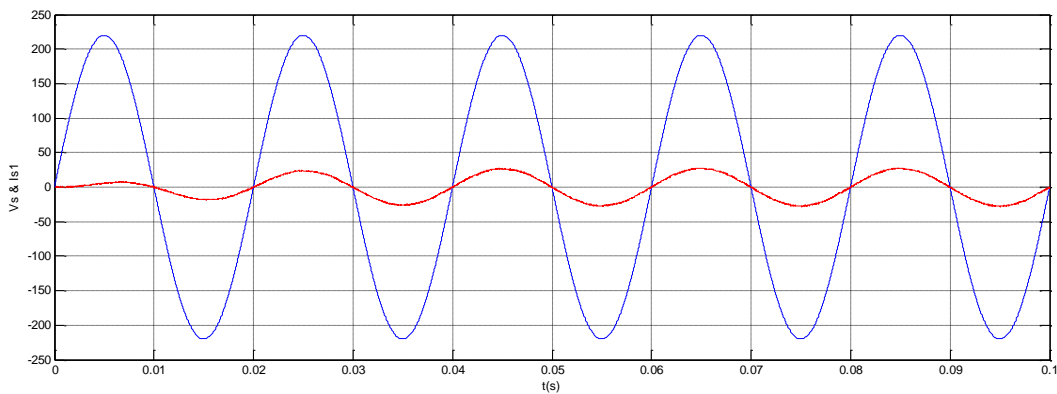
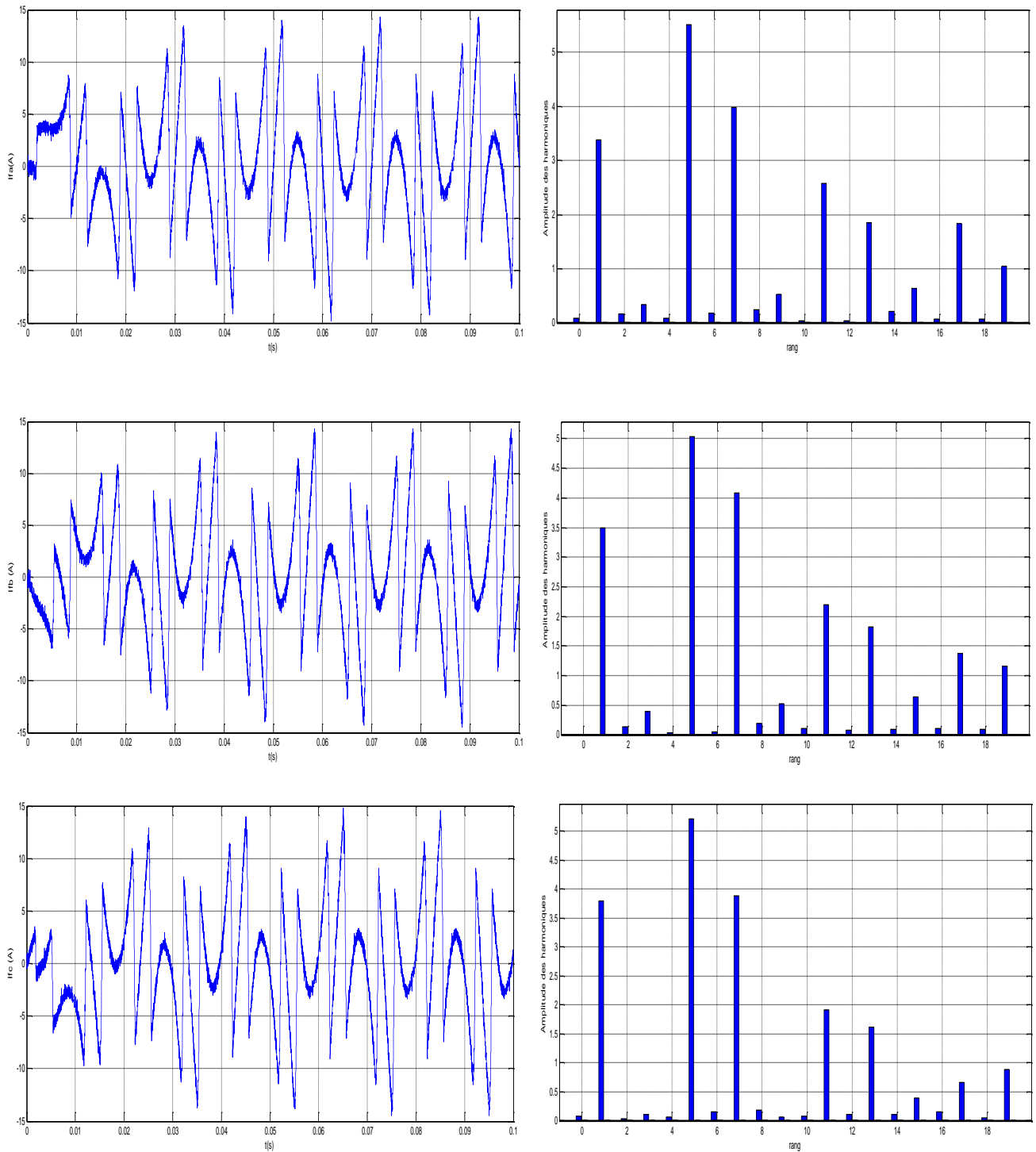
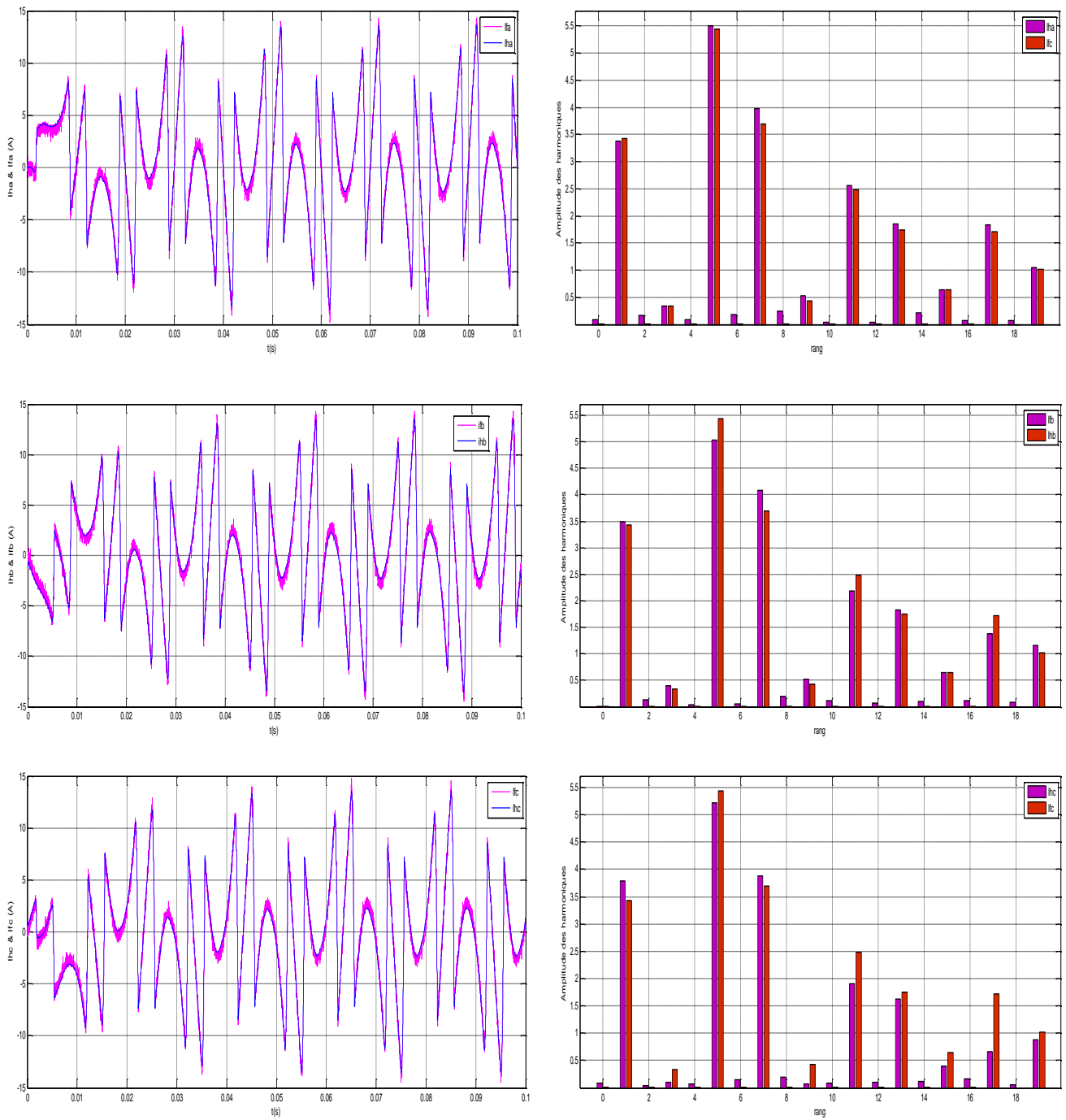


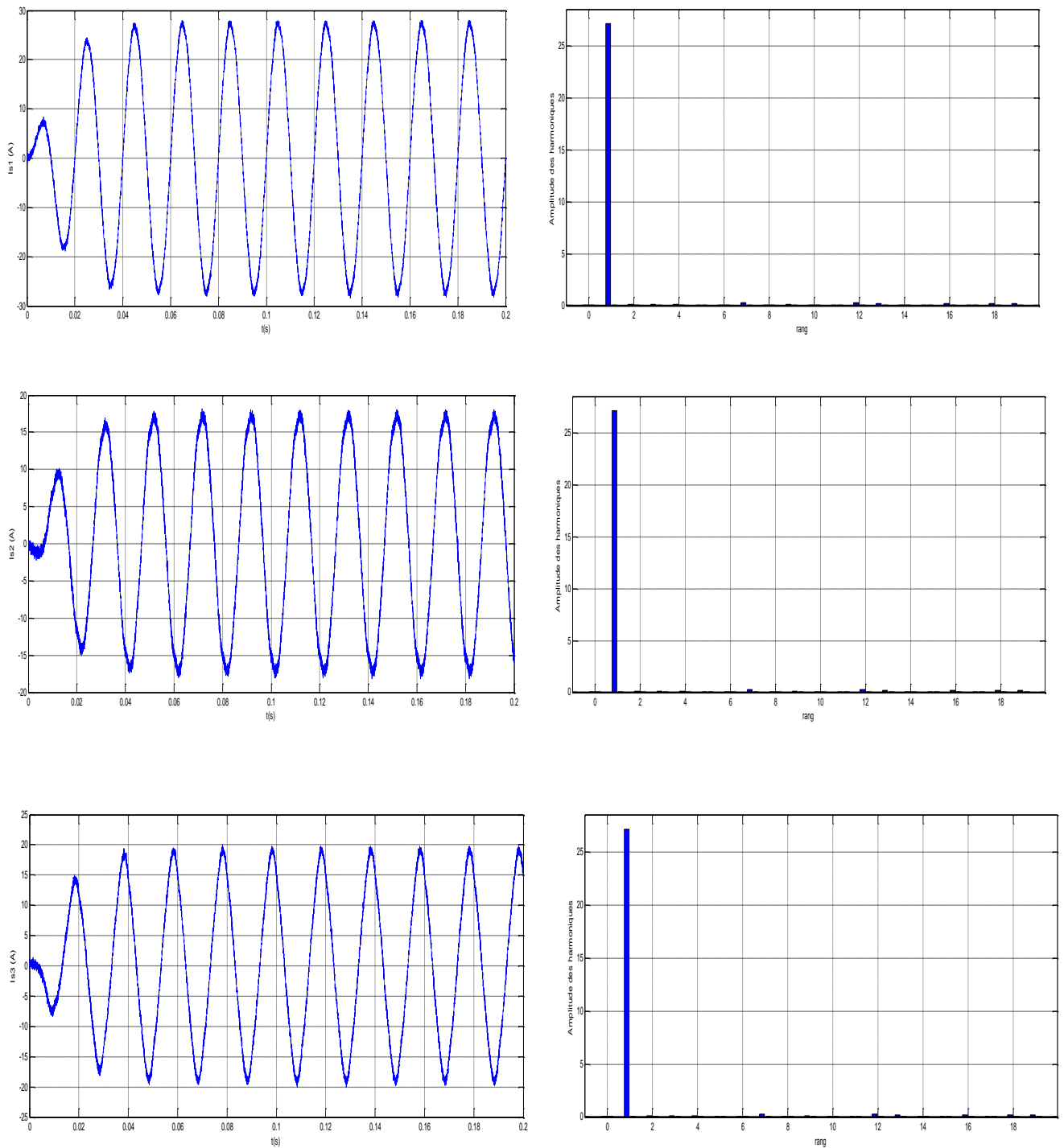
Figure III. 10 la tension et le courant après le filtrage



**Figure III. 11** Courants injectés par l'onduleur et leurs spectres fréquentiels pour la commande hystérésis à bande floue



**Figure III. 12** Courants de référence, injectés et leurs spectres pour la commande hystérésis à bande floue



**Figure III. 13** Courants de source après filtrage et leurs spectres fréquentiels pour la Commande hystérésis à bande floue

### III.3.4 Interprétation

Les figures précédentes montrent :

- L'amélioration de la forme des courants de source après filtrage.
- La diminution de la bande d'hystérésis entraîne une amélioration de la qualité des courants  
THD=2.12 %
- Une amélioration de la qualité des courants de source pour la stratégie hystérésis à bande floue par rapport à la stratégie hystérésis à bande fixe.
- On a utilisé une inductance après le point de raccordement du filtre actif pour éliminer la présence des pics au niveau des courants de source.

### III.3.5 Commande à MLI

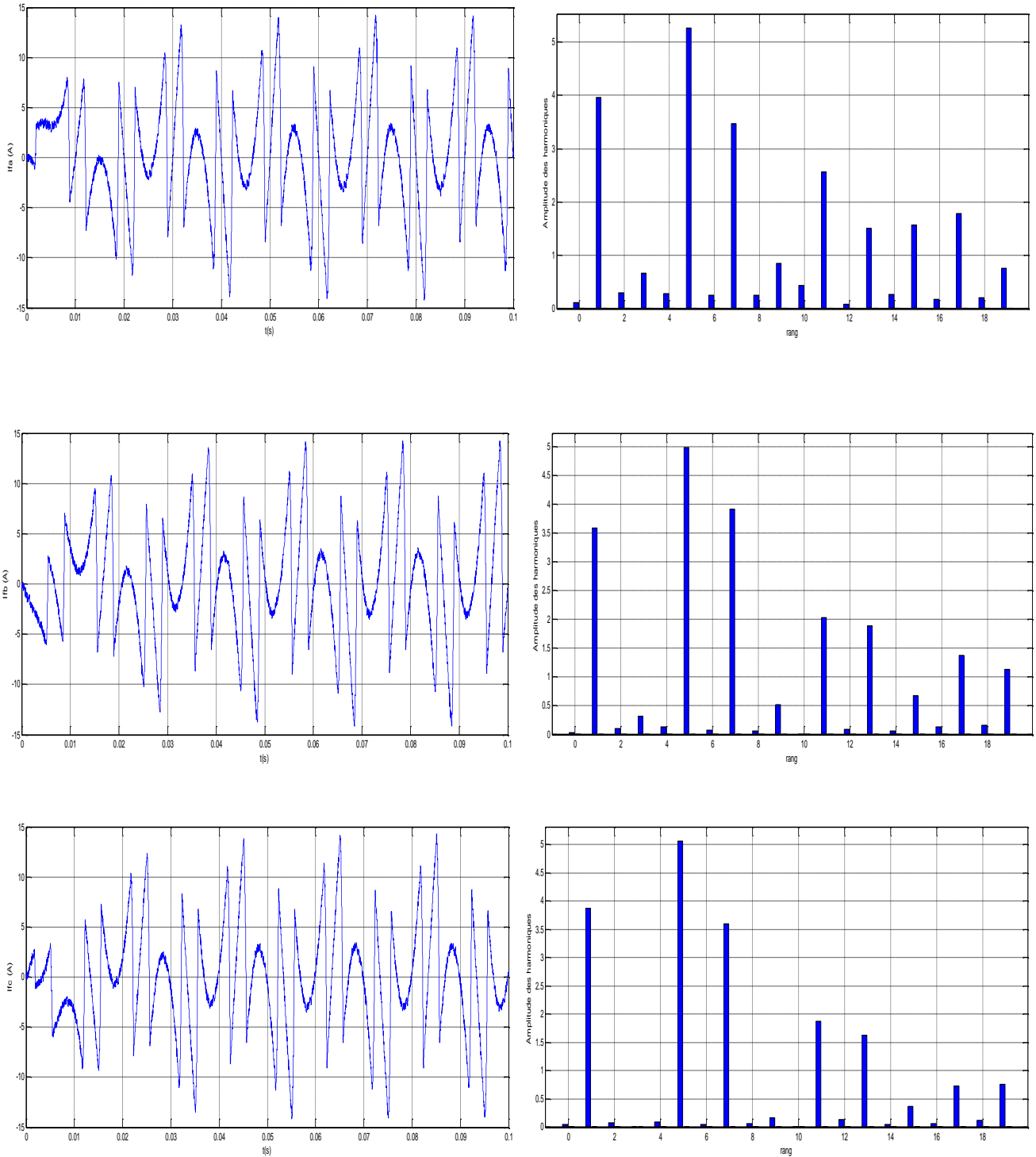


Figure III. 14 Courants injectés par l'onduleur et leurs spectres fréquentiels pour la commande à MLI

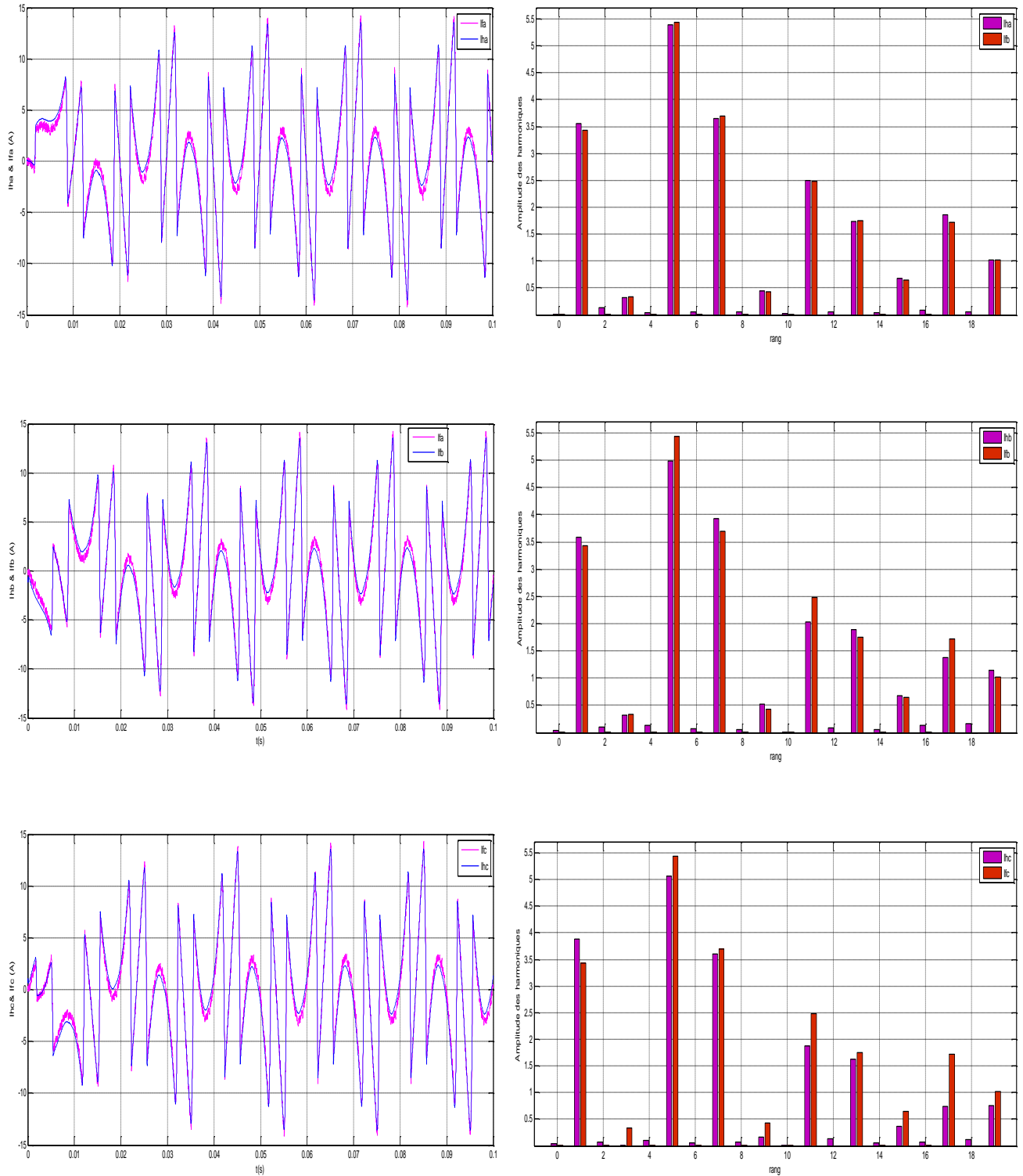


Figure III. 15 Courants de références, injectés et leurs spectres fréquentiels pour la commande à MLI

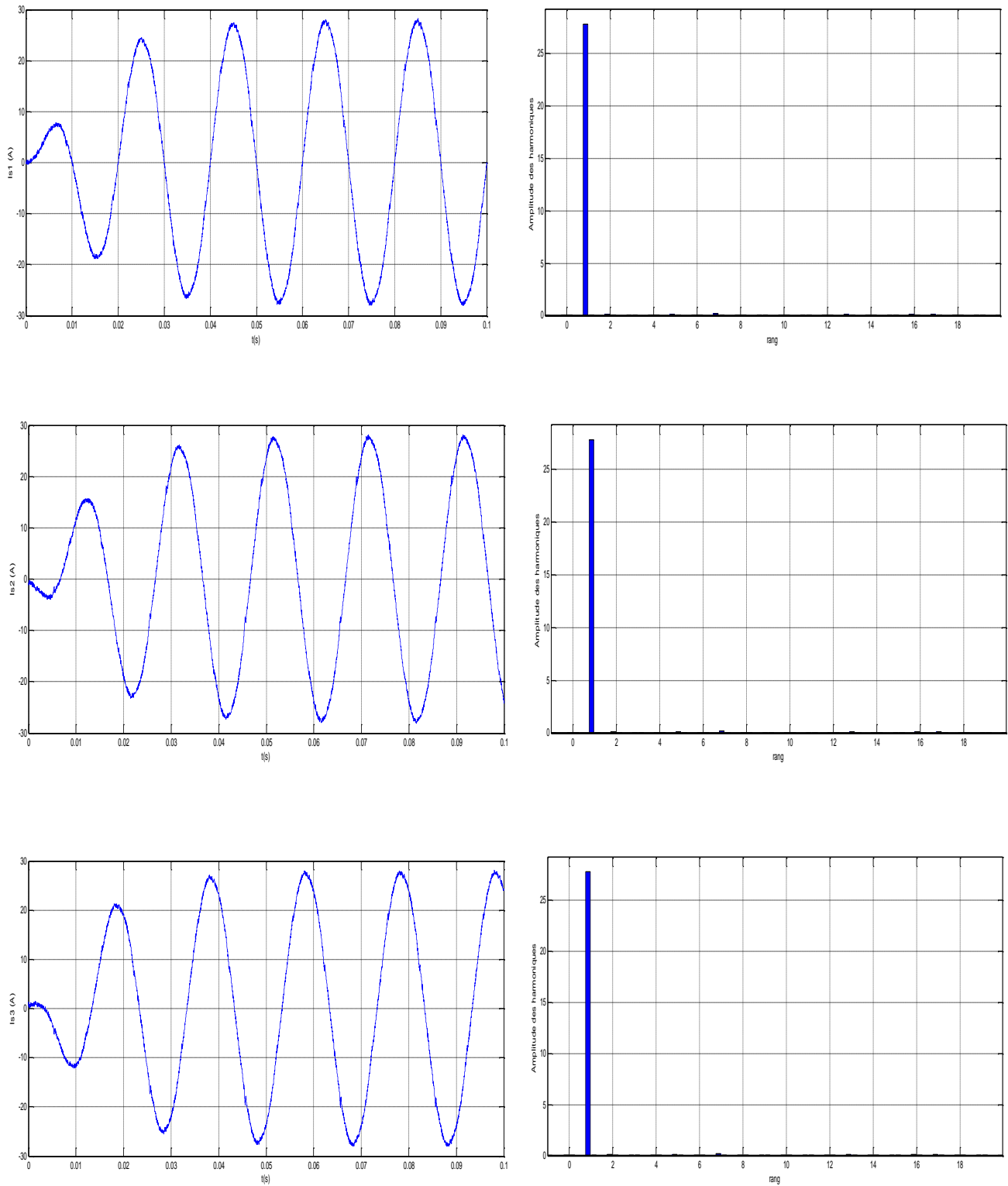


Figure III. 16 Courants de source après filtrage et leurs spectres fréquentiels pour la commande à MLI

### III.3.6 Interprétation

Les figures ci-dessus montrent :

- L'amélioration de la forme des courants de source après filtrage.

Courants : (THDI = 1.71%)

- Une amélioration de la qualité des courants de source pour la stratégie à MLI
- La commande MLI donne des résultats satisfaisants et légèrement meilleurs que celle de la méthode hystérésis et hystérésis à bande floue

### III.3 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre le schéma global de l'association réseau-Onduleur Charge avant et après compensation, ainsi que les résultats de simulation et les interprétations obtenues avec les différentes stratégies de commande de l'onduleur à savoir la commande à hystérésis et hystérésis à bande floue et la commande à MLI. On constate que dans les trois cas de commande les courants de lignes délivrés par la source sont sinusoïdaux avec quelques petites composantes à hautes fréquences.

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

# Conclusion générale

## Conclusion générale

Dans ce projet de fin d'étude, on a étudié une stratégie de dépollution des réseaux électriques, appelée filtrage actif parallèle qui a vu son développement avec l'évolution des organes de l'électronique de puissance. Ces derniers nous permettant de concevoir des dispositifs appelés onduleur de puissance, permettant l'injection des courants harmoniques dans le réseau, par conséquence, la source fournira des courant sinusoïdaux en phase avec leurs tensions. D'autre part la méthode d'identification des puissances instantanées utilisée a été choisie pour identifier le plus grand nombre d'harmoniques pour pouvoir les éliminer.

Il existe toujours en parallèle des techniques classiques qui sont utilisées pour diminuer les effets des harmoniques par contre les techniques modernes ont pour but d'éliminer ces perturbations complètement.

La commande hystérésis à bande floue et la commande MLI a fourni des courants coté réseau moins riches en harmoniques par rapport à ceux obtenus par la commande hystérésis à bande fixe et cela a été montré à travers le THD obtenu.

En fin, le filtre actif parallèle nous a donné des résultats satisfaisants par son adaptabilité au changement accompagnions le réseau pour le rendre plus stable avec un facteur de puissance unitaire.

Comme perspectives pour les futures promotions on peut citer:

- La réalisation pratique du travail réalisé en simulation.
- l'association du filtre actif parallèle avec un filtre passif pour réduire le cout de l'installation.
- l'utilisation d'autres technique de commande de l'intelligence artificielles dans la commande du filtre actif.

# **Références bibliographiques**

## Références bibliographiques

**[1] ABDELATIF M<sup>ed</sup> Elhadi.**

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

**[2] DJAFFAR OULD ABDESLAM.**

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

**[3] BOUGUERRA Samir & BOURENNANE Ibrahim.**

« Filtrage actif parallèle des réseaux électriques avec compensation de l'énergie réactive » mémoire d'ingénieur. Université de M'sila, 2007.

**[4] BADACHE Zohir & SACI Abdeslam.**

« Etude par simulation d'un filtre actif parallèle », mémoire d'ingénieur, Université de Msila, 2006.

**[5] CHEBABHI Rabie & BOUDRAF Mustapha.**

« Modélisation et commande des différentes topologies des filtres actifs parallèles » mémoire d'ingénieur d'état. Université de M'sila, 2011.

**[6] BAKHI Hamza**

« Commande d'un filtre actif triphasé shunt par logique floue » mémoire de Master. Université de M'sila, 2015.

**[7] DJEGHLOUD Hind.**

« Filtrage actif de puissance », Thèse de Doctorat, Université de Constantine ,2007.

**[8] OULD ABDESLAM Djaffar.**

«Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension». Thèse de Doctorat de l'université de Haute-Alsace, 2005 .

**[9] YAHIAOUI Ahmed Lamine**

« Détection de défaut des convertisseurs de puissance : Application au filtre actif parallèle » mémoire de Master. Université de M'sila, 2014.

**[10] ZERROUKI youcef**

« Amélioration de la qualité d'énergie électrique en utilisant un onduleur de tension multi-niveaux » mémoire de Master. Université de M'sila, 2015.

**[11] Mohamed Alaa Eddin Alali.**

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

**[12] BAGHLI Lotfi.**

« Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques », Thèse de Doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy-I, 2009.

**[13] Hammamid Chaouki.**

« Commande par logique floue de la machine synchrone à aimants permanents », mémoire d'ingénieur d'état. Université de M'sila, 2006.

**[14] Houria GHERAIRI et Hafsa DEHMANI.**

« "Etude comparative entre trois commandes, neuro – floue, réseaux de neurones et réseaux d'ondelette», mémoire de master en Automatique, Université Kasdi Merbeh Ouargla ,2011.

## **Résumé:**

Ce mémoire présente un dispositif de filtrage actif parallèle basé sur un onduleur autonome à trois niveaux à structure NPC commandé par la stratégie Hystérésis en courant et par MLI et logique floue, un schéma synoptique des trois méthodes est présenté ainsi qu'un asservissement des trois méthodes étudiées pour montrer les performances de chaque commande. Les résultats de simulation de la cascade source redresseur-filtre actif parallèle sont présentés pour montrer les performances de ce filtre.

**Mots clés :** Filtre actif parallèle. Onduleur à trois niveaux. Commande à hystérésis Commande à MLI. Logique floue.

## **ملخص**

تقدم هذه المذكرة جهاز ترشيح نشط موازي يعتمد على عاكس مستقل ذي ثلاثة مستويات مع هيكل NPC يتم التحكم فيه عن طرق استراتيجية Hystérésis وMLI والمنطق الضبابي، حيث يتم التوضيح بمخطط إجمالي للطرق الثلاث وكذلك إخضاع الطرق المدروسة لإظهار أداء كل تحكم يتم عرض نتائج المحاكاة للمرشح النشط المتوازي من مقوم المصدر المتتالي من أجل اثبات فعالية هذا المرشح

**كلمات مفتاحية:** جهاز ترشيح نشط موازي. عاكس مستقل ذي ثلاثة مستويات. تحكم بالمنطق الضبابي.