

République Algérienne Démocratique Et Populaire

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE

LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen

Faculté de Technologie



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE POUR L'OBTENTION DU

DIPLOME DE MASTER

Filière : *Electrotechnique*

Spécialité : *Réseaux Electriques Et Réseaux Electriques Intelligents*

Préparé au Département de Génie Electrique et Electronique

Présenté par

***Karim KHELIFI & Mohamed TIENTI***

Intitulé du Mémoire

## **Etude comparative de techniques d'extraction de courants de référence pour un filtre actif parallèle à quatre bras**

Soutenu publiquement le 17 Juin 2017 devant les membres de jury composé de :

S. M. MELIANI	Président	MCA	U.A.B - Tlemcen
M. A. BRIKCI NIGASSA	Encadrant	MAA	U.A.B - Tlemcen
M. C. BENHABIB	Examineur	MCB	U.A.B - Tlemcen
A. GOURINE	Examineur	MCB	U.A.B – Tlemcen

Année Universitaire : 2016 – 2017

## *Remerciements*

*Tout d'abord, nous remercions notre Dieu le tout puissant de nous avoir donné la force d'atteindre notre objectif et accomplir notre travail.*

*Nous remercions vivement et particulièrement notre encadreur Monsieur **M. A. BRIKCI NIGASSA**, Maitre-assistant pour sa disponibilité, son aide, ses conseils, sa patience et ses encouragements qui nous ont aidés à bien mener ce travail.*

*Nos vifs remerciements s'adressent également à Monsieur **S. M. MELIANI**, Maitre de conférences, a bien accepté présider notre jury de mémoire.*

*Nous remercions aussi nos examinateurs, Monsieur **M. C. BENHABIB**, Maitre de conférences et Monsieur **A. GOURINE** Maitre de conférences pour bien vouloir être examinateurs de notre travail.*

*Nos sincères remerciements vont à tous les personnes qu'on n'a pas citées et qui nous ont aidés de près ou de loin pour réaliser ce travail.*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce fruit de mes longues années d'études tout d'abord :*

*A mes très chers parents pour leurs bienveillances, leurs conseils,  
leurs encouragements, et leurs soutiens morales et financiers durant  
toutes ces années d'études.*

*Je vous dis merci pour tout ce que vous m'avez fait, que Dieu vous  
protège, vous garde la bonne santé, vous laisse toujours présents  
devant mes yeux, et vous réserve une belle vie.*

*A tous les membres de ma famille, mes sœurs, mon petit frère  
« Chakib » et ma nièce « Nihel ».*

*A tous mes amis et mes collègues avec qui j'ai partagé de très bons  
moments tout le long de ces années.*

*A tous les enseignants et les collègues de la promotion de la 2<sup>ème</sup>  
année Master RERE9 2016/2017.*

*Karim*

# *Dédicaces*

*Ce travail est la récolte de longues années d'études, je le dédie :*

*A mon très chers papa pour ses conseils, ses encouragements, et son soutien morale et financier permanents.*

*A la femme qui illumine ma vie, maman, qui a été toujours derrière moi pour que j'ai pu arriver a ce succès.*

*Je vous remercie pour tout vos efforts fournis pour moi, que Dieu vous garde, vous protège, et vous bénisse la vie.*

*A toute la famille « MENA »*

*A tous mes amis et mes collègues avec qui j'ai partagé de très bons moments tout le long de ces années.*

*A tous les enseignants et les collègues de la promotion de la 2<sup>ème</sup> année Master RERE 2016/2017.*

*Mohamed*

# Liste des figures

Figure I -1 :	Transformateur déphaseur pour l'élimination des 5 <sup>ème</sup> et 7 <sup>ème</sup> harmoniques .....	6
Figure I-2 :	Principe d'un filtre Actif Parallèle .....	8
Figure I-3 :	Principe d'un filtre Actif Série .....	8
Figure I-4 :	Principe d'un conditionneur de puissance .....	9
Figure I-5 :	Classification des filtres hybrides .....	10
Figure II-1 :	Principe du filtre actif parallèle .....	17
Figure II-2 :	Constitution de l'onduleur triphasé à quatre bras .....	18
Figure II-3 :	Type de la source d'alimentation .....	21
Figure II-4 :	Type de la charge .....	21
Figure II-5 :	Bande d'hystérésis et signal de commande d'un interrupteur .....	22
Figure II-6 :	Commande des courants de filtre par hystérésis .....	23
Figure II-7 :	Principe de la commande d'un filtre actif de puissance parallèle par la méthode directe dite théorie p-q-r .....	25
Figure II-8 :	Principe de la commande d'un filtre actif de puissance par la méthode des puissances instantanées p-q-0 .....	28
Figure II-9 :	Principe du FMV .....	32
Figure II-10 :	Principe de la commande par la méthode des puissances instantanées à l'aide des FMVs .....	33
Figure III-1 :	Schéma du réseau électrique triphasé à quatre fils alimentant trois charges monophasé non linéaire .....	38
Figure III-2 :	Courant de charge triphasé .....	39
Figure III-3 :	Courant du neutre .....	39
Figure III-4 :	Courant de charge de la phase 1 .....	39
Figure III-5 :	FFT du courant de source de la première phase .....	40
Figure III-6 :	Modèle de simulation du système étudié .....	40
Figure III-7 :	Caractéristique courant de la 1 <sup>ère</sup> phase .....	41
Figure III-8 :	FFT du courant de charge .....	42
Figure III-9 :	FFT du courant de source .....	42
Figure III-10 :	Courant du neutre avant et après filtrage .....	42
Figure III-11:	Caractéristique courant de la 1 <sup>ère</sup> phase .....	43
Figure III-12 :	FFT du courant de charge .....	44
Figure III-13 :	FFT du courant de source .....	44
Figure III-14:	Courant du neutre avant et après filtrage .....	44
Figure III-15:	Caractéristique courant de la 1 <sup>ère</sup> phase .....	45
Figure III-16:	FFT du courant de source .....	46
Figure III-17:	FFT du courant de charge .....	46
Figure III-18:	Courant du neutre avant et après filtrage .....	46
Figure III-19:	Caractéristiques de courant de la 1 <sup>ère</sup> phase .....	47
Figure III-20:	FFT du courant de charge .....	48
Figure III-21:	FFT du courant de source .....	48
Figure III-22:	Caractéristiques courant de la 2 <sup>ème</sup> phase.....	49
Figure III-23:	FFT du courant de charge .....	50
Figure III-24:	FFT du courant de source .....	50
Figure III-25:	Caractéristiques courant de la 3 <sup>ème</sup> phase .....	51
Figure III-26 :	FFT du courant de charge .....	52

Figure III-27 :	FFT du courant de source .....	52
Figure III-28 :	Courant du neutre avant et après filtrage .....	52
Figure III-29 :	Caractéristiques de courant de la 1 <sup>ère</sup> phase .....	53
Figure III-30 :	FFT du courant de charge .....	54
Figure III-31 :	FFT du courant de source .....	54
Figure III-32 :	Caractéristiques courant de la 2 <sup>ème</sup> phase .....	55
Figure III-33 :	FFT du courant de charge .....	56
Figure III-34 :	FFT du courant de source .....	56
Figure III-35 :	Caractéristiques courant de la 3 <sup>ème</sup> phase .....	57
Figure III-36 :	FFT du courant de charge .....	58
Figure III-37 :	FFT du courant de source .....	58
Figure III-38 :	Courant du neutre avant et après filtrage .....	58
Figure III-39 :	Caractéristiques de courant de la 1 <sup>ère</sup> phase .....	59
Figure III-40 :	FFT du courant de charge .....	60
Figure III-41 :	FFT du courant de source .....	60
Figure III-42 :	Caractéristiques courant de la 2 <sup>ème</sup> phase .....	61
Figure III-43 :	FFT du courant de charge .....	62
Figure III-44 :	FFT du courant de source .....	62
Figure III-45 :	Caractéristiques courant de la 3 <sup>ème</sup> phase .....	63
Figure III-46 :	FFT du courant de charge .....	64
Figure III-47 :	FFT du courant de source .....	64
Figure III-48 :	Courant du neutre avant et après filtrage .....	64
Figure III-49 :	Modèle de simulation du système avec défaut monophasé .....	65
Figure III-50 :	Caractéristiques de courant de la 1 <sup>ère</sup> phase .....	66
Figure III-51 :	FFT du courant de charge .....	67
Figure III-52 :	FFT du courant de source .....	67
Figure III-53 :	Caractéristiques courant de la phase 2 .....	68
Figure III-54 :	FFT du courant de charge .....	69
Figure III-55 :	FFT du courant de source .....	69
Figure III-56 :	Caractéristiques courants de la 3 <sup>ème</sup> phase .....	70
Figure III-57 :	FFT du courant de source .....	70
Figure III-58 :	Courant du neutre avant et après filtrage .....	71
Figure III-59 :	Caractéristiques de courant de la 1 <sup>ère</sup> phase .....	72
Figure III-60 :	FFT du courant de charge .....	72
Figure III-61 :	FFT du courant de source .....	72
Figure III-62 :	Caractéristiques courant de la phase 2 .....	73
Figure III-63 :	FFT du courant de charge .....	74
Figure III-64 :	FFT du courant de source .....	74
Figure III-65 :	Caractéristiques courants de la 3 <sup>ème</sup> phase .....	74
Figure III-66 :	FFT du courant de source .....	75
Figure III-67 :	Courant du neutre avant et après filtrage .....	75
Figure III-68 :	Caractéristiques de courant de la 1 <sup>ère</sup> phase .....	76
Figure III-69 :	FFT du courant de charge .....	76
Figure III-70 :	FFT du courant de source .....	76
Figure III-71 :	Caractéristiques courant de la phase 2 .....	77
Figure III-72 :	FFT du courant de charge .....	78

Figure III-73 :	FFT du courant de source .....	78
Figure III-74 :	Caractéristiques courants de la 3 <sup>ème</sup> phase .....	78
Figure III-75 :	FFT du courant de source .....	79
Figure III-76 :	Courant du neutre avant et après filtrage .....	79

## Liste des tableaux

Tableau I-1 :	Classification de la CEI des équipements dont la consommation ne dépassant pas 16 A .....	12
Tableau I-2 :	Limites des tensions harmoniques selon IEEE-519 .....	13
Tableau II-1:	Avantages et inconvénients du FAP à quatre bras .....	17
Tableau II-2:	Les états de commutation de l'onduleur .....	19
Tableau II-3:	les modes de compensation de la commande p-q-r .....	27
Tableau II-4:	Les modes de compensation de la commande p-q-o .....	31
Tableau III-1:	Paramètres de simulation pour le système équilibré .....	38
Tableau III-2 :	Paramètres de simulation du filtre .....	41
Tableau III-3 :	Paramètres de simulation dans le cas de déséquilibre de charge ...	47
Tableau III-4 :	Paramètres de simulation dans le cas de défaut monophasé .....	65
Tableau III-5 :	THD des trois techniques appliquées au système équilibré .....	80
Tableau III-6 :	THD des trois techniques appliquées sur notre système déséquilibré en charges .....	81
Tableau III-7 :	THD des trois techniques appliquées sur notre système en cas de défaut monophasé .....	81

# Liste des symboles

$i_{s123}$	Courant de source triphasé
$i_{c123}$	Courant de charge triphasé
$i_{f123}$	Courant injecté par le filtre triphasé
$l_{c123}$	L'inductance de ligne triphasée
$r_{c123}$	Résistance de ligne triphasé
$l_{f123}$	L'inductance de filtre de découplage triphasé
$r_{f123}$	Résistance de filtre de découplage triphasé
$l_{s123}$	L'inductance de source triphasée
$r_{s123}$	Résistance de source triphasé
$l_d$	L'inductance de la charge
$r_d$	Résistance de la charge
$i_n$	Courant de neutre
$V_{s123}$	Tension de source triphasée
$V_n$	Tension de neutre
$C$	Capacité du condensateur
$V_{dc}$	Tension aux bornes du condensateur
$i_f^*$	Courant de référence
$i_f$	Courant produit par l'onduleur
<b>FAS</b>	Filtre actif série
<b>FAP</b>	Filtre actif parallèle
<b>IGBT</b>	InsolatedGateBipolar Transistor
<b>UPQC</b>	Conditionneur universel d'énergie électrique
<b>FPB</b>	Filtre passe bas



<b><i>THD</i></b>	Taux de distorsion harmonique
<b><i>FMV</i></b>	Filtre multi variable
<b><i>W</i></b>	La pulsation
<b><i>f</i></b>	La fréquence
<b><i>p</i></b>	Puissance active
<b><i>q</i></b>	Puissance réactive

# Table de matières

## Introduction générale

### Chapitre I : Les perturbations dans les réseaux électriques

I-1	Introduction .....	3
I-2	Les perturbations dans les réseaux électriques .....	3
I-3	Les perturbations de types tension .....	4
I-4	Les perturbations de types courant .....	4
I-5	Techniques de dépollution des réseaux électriques .....	4
I-5-1	Techniques conventionnelles .....	4
I-5-1-1	Surdimensionnement du neutre .....	4
I-5-1-2	Transformateurs spéciaux .....	4
I-5-1-3	Dépollution du courant .....	6
I-5-2	Techniques modernes .....	7
I-5-2-1	Filtre actif parallèle .....	7
I-5-2-2	Filtre actif série .....	8
I-5-2-3	Combinaison parallèle-série de filtres actifs .....	8
I-5-2-4	Filtre hybride .....	9
I-6	Réglementations et normes .....	10
I-6-1	Taux de distorsion harmonique (THD) .....	10
I-6-2	THD en courant et en tension .....	11
I-6-3	Normes CEI .....	11
I-6-4	Normes IEEE .....	13
I-7	Conclusion .....	13

### Chapitre II : Stratégies de commande appliquées au FAP à quatre bras

II -1	Introduction .....	16
II -2	Principe du filtre actif parallèle à quatre bras .....	16
II-2-1	Avantages et inconvénients de filtre actif de puissance parallèle relié à un réseau électrique à quatre fils .....	17

II-3	Étude du filtre actif parallèle à quatre bras .....	17
II-3-1	la partie puissance du FAP .....	18
II-3-1-1	Description de l'onduleur triphasé à quatre bras .....	18
II-3-1-2	Filtre de découplage .....	20
II-3-1-3	Stockage de l'énergie .....	20
II-4	Présentation du système étudié .....	20
II-4-1	Type de la source d'alimentation .....	21
II-4-2	Type de la charge .....	21
II-5	Étude de la partie commande .....	22
II-5-1	Commande de l'onduleur par hystérésis .....	22
II-5-2	Détermination des courants de référence .....	24
II-5-3	Identification des courants de références.....	24
II-5-3-1	Méthode directe dite théorie p-q-r .....	24
II-5-3-2	Méthode des puissances instantanées réelles, imaginaires et homopolaire dite p-q-o .....	28
II-5-3-3	Identification par la méthode des puissances instantanées avec FMVs .....	31
II-6	Conclusion .....	35

### **Chapitre III : Résultats de simulations**

III -1	Introduction .....	38
III-2	Présentation du système sans filtre actif de puissance .....	38
III-3	Système avec filtre actif de puissance parallèle à quatre bras .....	40
III-3-1	Régime équilibré .....	40
III-3-2	Régime déséquilibré .....	47
III-3-2-1	Déséquilibre de charges .....	47
III-3-2-2	Défaut monophasé .....	65
III-4	Interprétation des résultats .....	81
III-5	Conclusion .....	81

### **Conclusion générale**

### **Annexe**

### **Bibliographie**

## **Introduction Générale**

Ces dernières années, l'utilisation croissante des dispositifs d'électronique de puissance dans les systèmes électriques a entraîné de plus en plus de problèmes de perturbations des réseaux électriques. Ce phénomène touche essentiellement les secteurs industriels, tertiaires et domestiques. Ce qui engendre des courants harmoniques qui a des effets nocifs. [10]

Pour diminuer ou supprimer ces perturbations et ainsi améliorer la qualité de l'énergie distribuée, plusieurs solutions existent :

- la réduction de l'impédance de court-circuit,
- la modification du convertisseur statique polluant,
- les dispositifs de filtrage.

Parmi ces solutions citer pour garantir une meilleure qualité de l'énergie, le filtrage actif de puissance a été choisi comme solution de dépollution harmonique, et en particulier le filtrage actif de puissance parallèle. Au cours de ses dernières années, plusieurs travaux ont été réalisés avec expérimentation appliqués pour la plupart aux systèmes triphasés à trois fils, or il se trouve que dans les réseaux basse tension, le neutre existe, ce qui fait apparaître des composantes homopolaires, il en résulte la circulation de courant harmonique dans le neutre, notamment à cause des charges non linéaires monophasées.

Dans ce contexte, l'objectif de notre travail sera l'étude de la commande d'un filtre actif parallèle à quatre bras connecté à un réseau électrique à quatre fils.

Notre mémoire de fin d'étude est divisé en trois chapitres :

Le **premier chapitre**, consacré à la présentation de différentes perturbations, en courant et en tension, des réseaux électriques connectés à des charges polluantes. Ces perturbations sont les harmoniques, le déséquilibre, les creux de tension, leurs

conséquences, ainsi que la présentation de certaines normes internationales imposées aux utilisateurs.

**Le deuxième chapitre** contiendra la présentation du principe de fonctionnement d'un filtre actif parallèle ainsi que ses topologies pour le cas d'un filtre actif de puissance à quatre bras.

Une description des trois méthodes d'extraction des courants de références sera présentée.

**Le troisième et dernier chapitre** couvrira la présentation des résultats des simulations obtenus pour les différentes stratégies de commande que ce soit en mode équilibré ou déséquilibré. Il s'en suivra une étude comparative pour les deux modes.

# **Chapitre I**

## **Les perturbations dans les réseaux électriques**

## **I.1 Introduction**

Les systèmes de transport de l'énergie électrique doivent répondre à des exigences vis-à-vis de la qualité et de la fiabilité de l'énergie qu'ils délivrent. Depuis quelques années, les mesures de puissance et de la qualité du réseau électrique prennent beaucoup d'importance. Ceci est dû à l'utilisation croissante, dans l'industrie et les réseaux tertiaire de systèmes commandés à base d'électronique de puissance provoquant ainsi de plus en plus des perturbations dans les réseaux électriques.

Ces perturbations se superposent à l'onde fondamentale, modifiant ainsi l'onde de tension et/ou de courant ce qui se traduit par une dégradation du facteur de puissance et/ou par la génération de courants et de tensions alternatives de fréquence différente de celle du fondamental.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les caractéristiques des perturbations électriques, les origines des harmoniques, leurs conséquences, et les solutions utilisées pour dépolluer les réseaux électriques, et enfin présenter des normes internationales imposées aux utilisateurs.

## **I.2 Perturbations dans les réseaux électriques [2] [10]**

L'énergie électrique est délivrée dans les réseaux électriques avec une tension triphasée alternative caractérisée par une amplitude et fréquence constante avec une tolérance. La qualité de la tension peut être affectée, soit par des perturbations aléatoires à caractère accidentel, soit par des perturbations de courtes durées. Ces défauts peuvent se présenter sous forme de différentes formes :

- Fluctuations de la fréquence ;
- Variations de l'amplitude ;
- Modification de la forme d'onde de la tension ;
- Dissymétrie du système triphasé ;
- Harmonique et inter-harmonique.

### **I.3 Perturbations de type tension**

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. [2]

Ces types de perturbation ont des effets très néfastes sur les équipements électriques. Ces effets peuvent aller d'un simple échauffement, à l'arrêt des machines tournantes jusqu'à la destruction totale de ces équipements.

### **I.4 Perturbations de type courant [2]**

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. Ces charges se comportent approximativement comme des sources d'harmoniques. L'amplitude de ces courants ne dépend que de la charge, elle est d'autant plus élevée que la charge est importante.

## **I.5 Techniques de dépollution des réseaux électriques**

### **I.5.1 Techniques conventionnelles**

#### **I.5.1.1 Surdimensionnement du neutre [12]**

Dans un système équilibré, les composantes homopolaires au niveau du neutre sont nulles. Ceci n'est plus le cas pour les systèmes intégrant des charges non linéaires. Les courants homopolaires des harmoniques s'additionnent dans le conducteur de neutre. Afin d'éviter l'usure prématurée du conducteur de neutre, il serait utile de surdimensionner ce dernier. Cette solution consiste à doubler, voire même tripler les conducteurs de neutre.

#### **I.5.1.2 Transformateurs spéciaux [12]**

**- Transformateur de mise à la terre :** Afin d'éviter le passage des courants harmoniques par le conducteur de neutre, l'ajout d'un transformateur de mise à la terre créant un neutre artificiel est une solution efficace. Ce type de transformateur fournit



un chemin de faible impédance pour les courants harmoniques qui sont déviés dans son propre neutre. C'est donc dire, que seul le neutre du transformateur doit être en mesure de supporter ces courants.

- **Transformateur de type K :** Les transformateurs qui doivent supporter des courants déformés sont sujets à des pertes additionnelles élevées. Si ces conditions de fonctionnement perdurent, il y a possibilité de défaillance des transformateurs. Les organismes de normalisation ont reconnu ce phénomène et ont récemment introduit un facteur K qui permet de quantifier l'effet d'une charge sur un transformateur. Ce facteur K se définit comme suit :

$$K = \sum_{n=1}^{\infty} I^2 \cdot n^2$$

où:

n : Rang de l'harmonique.

I : Rapport entre le courant efficace à la fréquence n et le courant efficace total.

Une charge linéaire a un facteur K unitaire tandis qu'une charge non linéaire peut avoir un facteur K qui dépasse 20. De la même manière, on assigne un facteur K unitaire à un transformateur servant à alimenter une charge linéaire tandis qu'après essai, on assigne des facteurs K aux transformateurs spécialement conçus pour alimenter des charges non linéaires. Le facteur K du transformateur doit être supérieur au facteur K de la charge.

- **Transformateurs déphaseurs :** Une autre solution pour la réduction des courants harmoniques est l'utilisation de transformateurs déphaseurs. L'utilisation du transformateur triangle-triangle et du transformateur triangle-étoile pour alimenter les deux charges non linéaires identiques a pour effet d'éliminer les courants de 5<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> harmoniques produites par ces charges. L'élimination de ces courants harmoniques est due au déphasage de 30° entre les connexions des deux transformateurs. Si les

charges non linéaires sont identiques, les courants de 5<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> harmoniques sont éliminés au point commun de raccordement. Dans le cas contraire, un résidu de ces courants harmoniques sera toujours présent sur le réseau.

Il est à noter que d'autres connexions de transformateurs déphaseurs peuvent être employées pour éliminer des harmoniques de rangs plus élevés.

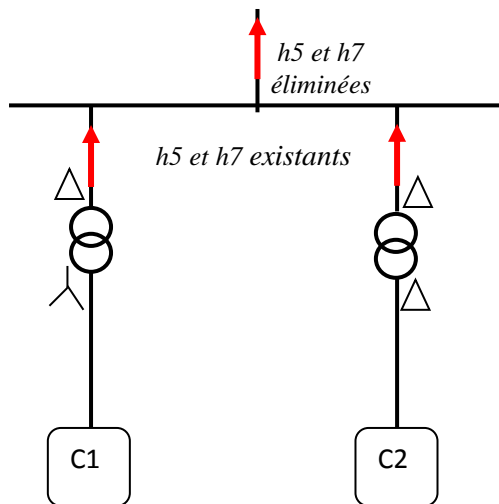


Figure I -1 : Transformateur déphaseur pour l'élimination des 5<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> harmoniques.

#### I.5.1.3 Dépollution du courant [4]

**a. Compensation de la puissance réactive :** Le placement des batteries de condensateurs en parallèle avec le réseau est l'une des techniques les plus utilisées pour augmenter le facteur de puissance.

**b. Compensation des courants harmoniques :** Plusieurs solutions existent pour limiter la propagation et l'effet des harmoniques dans les systèmes électriques :

- Augmentation de la puissance de court-circuit du réseau et l'utilisation des convertisseurs peu polluants qui ont pour effet de réduire la distorsion harmonique.
- Utilisation de dispositifs de filtrage pour réduire la propagation des harmoniques produite par des charges non linéaires.

**c. Dépollution des tensions :** Pour dépolluer le réseau électrique des perturbations dues aux tensions harmoniques et/ou déséquilibrées, il suffit de limiter la circulation des courants perturbateurs (harmonique et/ou déséquilibre) en utilisant des solutions présentées dans le cas des perturbations de courant.

### **I-5-2 Techniques modernes [3]**

Ces solutions sont proposées comme des solutions efficaces de dépollution des réseaux électriques afin de traiter les inconvénients inhérents aux solutions traditionnelles comme les filtres passifs. Parmi toutes les solutions modernes, on trouve deux types de structures classiquement utilisées :

- Le filtre actif (série, parallèle ou bien encore associant les deux) ;
- Le filtre actif hybride (série, parallèle).

Le but de ces filtres actifs est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant ou la tension redevienne sinusoïdal. Le filtre actif est connecté au réseau soit en série (FAS), soit en parallèle (FAP) suivant qu'il est conçu respectivement pour compenser les tensions ou les courants harmoniques, soit associé à des filtres passifs.

Pour fournir aux consommateurs une énergie électrique de qualité, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, les filtres actifs sont proposés comme des solutions de dépollution des réseaux électriques. Dans la suite, différentes topologies de filtres actifs usuels seront présentées.

#### **I.5.2.1 Filtre actif parallèle [4][10]**

Il est appelé aussi compensateur shunt, le FAP se connecte en parallèle sur le réseau de distribution, et est habituellement commandé comme un générateur de courant. Il injecte en temps réel les composantes harmoniques inverses des courants harmoniques générés par les charges non linéaires connectées au réseau mais en opposition de phase, de telle sorte que le courant fourni par le réseau soit sinusoïdale et en phase avec la tension simple correspondante. Par conséquent, Il améliore le taux de distorsion en courant et en tension.

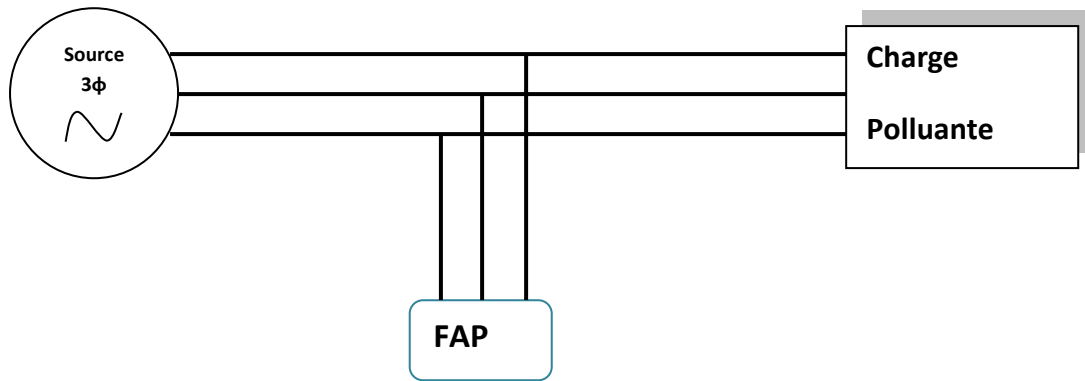


Figure I-2 : Principe d'un filtre Actif Parallèle

### I.5.2.2 Filtre actif série [12]

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

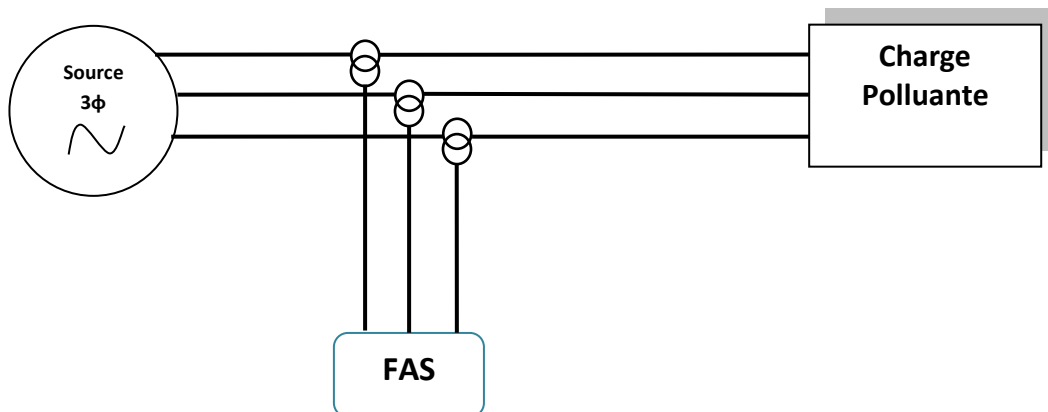


Figure I-3 : Principe d'un filtre Actif Série

### I.5.2.3 Combinaison parallèle-série de filtres actifs [3]

C'est l'association de deux filtres actifs parallèle et série, également appelée «Unified Power Quality Conditioner » (UPQC), conditionneur de puissance. Cette structure bénéficie des avantages des deux types de filtres actifs série et parallèle.

Ainsi, elle permet de garantir simultanément un courant sinusoïdal et une tension du réseau électrique également sinusoïdale.

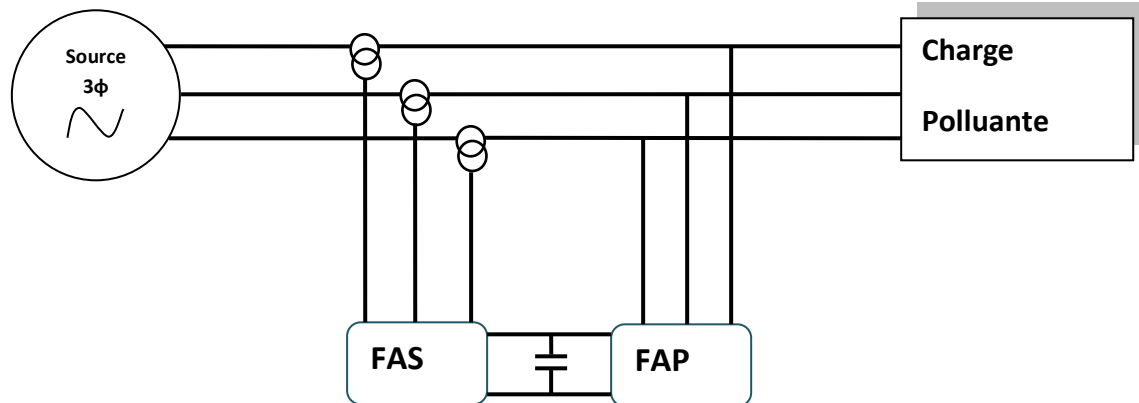


Figure I-4 : Principe d'un conditionneur de puissance

#### I.5.2.4 Filtre hybride [2] [3] [10]

Les inconvénients des filtres passifs et des filtres actifs (coût élevé en raison du dimensionnement des composants de puissance) ont conduit à l'élaboration d'une nouvelle topologie de filtre actif. Il s'agit du filtre hybride qui est en réalité l'association de filtres actifs de faibles puissances à des filtres passifs.

Le filtre hybride est une topologie de filtre qui combine les avantages des filtres passifs et des filtres actifs. Pour cette raison, il est considéré comme l'une des meilleures solutions pour filtrer les harmoniques de courant des réseaux de distribution. Une des principales raisons de l'utilisation du filtre actif hybride est liée au développement des semi-conducteurs de puissance tels que les transistors de puissance de types MOSFET ou IGBT. De plus, du point de vue économique, le filtre hybride présente un atout majeur : il permet de réduire le coût du filtre actif, qui est actuellement l'obstacle majeur à la généralisation de l'utilisation de filtres actifs.

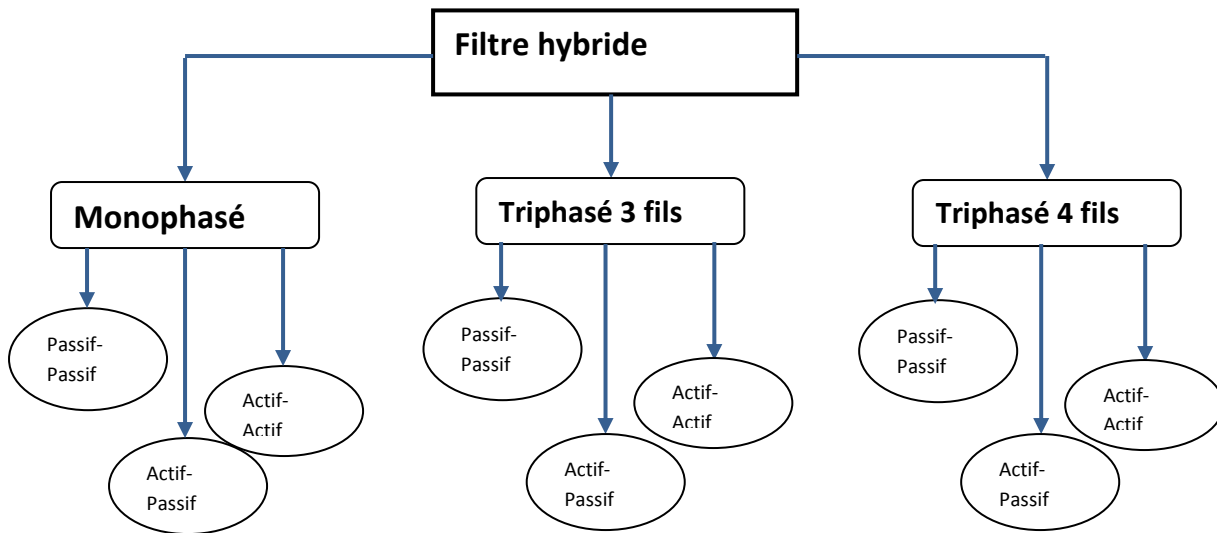


Figure I-5 : Classification des filtres hybrides

## I.6 Réglementations et normes

Les consommateurs ainsi que les distributeurs de l'énergie électrique sont conscients de l'importance d'une réglementation standard unique pour les problèmes de la pollution harmonique. Une telle réglementation universelle n'existe pas encore, cependant des organismes comme IEC (Commission Électrotechnique Internationale) en Europe et IEEE en Amérique, élaborent des normes efficaces qui peuvent être regroupées en trois catégories : [5]

- 1- Niveaux de compatibilité harmonique en amont du point commun de raccordement ;
- 2- Limites sur l'émission harmonique des équipements ;
- 3- Guide pour la mesure des harmoniques.

### I.6.1 Taux de distorsions harmoniques (THD)

Le Taux de Distorsion Harmonique (THD) représente le rapport entre la valeur efficace des harmoniques et la valeur efficace du fondamentale. Différentes grandeurs sont définies pour chiffrer les perturbations harmoniques, les plus utilisées sont le facteur de puissance et le THD. C'est une notion très utilisée pour définir l'importance du contenu harmonique d'un signal alternatif. [3]

$$\text{THD} = \sqrt{\sum Ch^2 / C1^2} \quad (\text{I.1})$$

Avec :

$Ch$  : La composante harmonique du rang  $h$ .

$Cl$  : La composante fondamentale.

### **I.6.2 THD en courant et en tension**

Il existe deux sortes de THD : en tension ou en courant. [2]

Lorsqu'il s'agit des harmoniques de courant, l'expression devient :

$$THD = \sqrt{\sum Ih^2 / I^2} \quad (I.2)$$

Avec :

$Ih$ : valeur efficace du Courant harmonique du rang  $h$

$I$  : valeur efficace du Courant fondamental

Lorsqu'il s'agit des harmoniques de tension, l'expression devient :

$$THD = \sqrt{\sum Vh^2 / V^2} \quad (I.3)$$

Avec :

$Vh$  : Valeur efficace du Tension harmonique du rang  $h$

$V$  : la valeur efficace du Tension fondamental

En présence d'harmoniques, l'expression du facteur de puissance (PF) devient :

$$PF = \frac{\cos \phi}{\sqrt{1+THD^2}} \quad (I.4)$$

### **I.6.3 La norme CEI**

Afin de faciliter la connaissance des normes pour chaque domaine, les normes CEI qui couvrent tous les domaines de l'électrotechnique sont numérotées et référencées comme par exemple CEI 61000 sur la compatibilité électromagnétique et CEI 60063 qui définit les séries de valeurs normalisées pour les résistances et condensateurs,...etc. [3] [2]

Les normes internationales publiées par la CEI dans les domaines de l'électricité et de l'électronique ont pour objectifs de : [3] [2]

- faciliter les échanges dans le monde en supprimant les barrières techniques ;
- assurer la qualité des produits ;
- garantir l'interopérabilité des produits et des systèmes ;
- contribuer à la sécurité lors de l'utilisation des produits ;
- contribuer à la protection de l'environnement et à la qualité de vie.

Les membres de la Commission Electrotechnique Internationale ont regroupé ces équipements, selon différents critères, en quatre classes. Ces classes ainsi que leurs THDs limites sont présentés dans les tableaux suivants : [2]

**Tableau I-1 : Classification de la CEI des équipements dont la consommation ne dépassant pas 16 A [2]**

Classe A	Equipements triphasés équilibrés Appareils électroménagers, excluant le matériel de la classe D Outils excluant les outils portatifs Gradateurs pour lampes à incandescence Equipements audio Autres équipements qui n'appartiennent pas à B, C ou D
Classe B	Appareils portable Matériel de soudage électrique qui n'est pas du matériel professionnel
Classe C	Equipements d'éclairage
Classe D	Ordinateurs et moniteurs d'ordinateur, TVs

### **Remarque**

Seuls les équipements qui consomment une puissance entre 75 et 600W appartiennent à la classe D.

D'autre part, les principales normes en matière de pollution harmonique basse tension sont définies au niveau international par la norme CEI 61000, à titre d'exemple : [5]

- CEI 61000-2-2
- CEI 61000-2-4
- CEI 61000-3-2
- CEI 61000-3-4



- CEI 61000-4-13

#### **I.6.4 La norme IEEE**

La norme IEEE est spécifique pour les Etats-Unis, IEEE-519 à titre d'exemple, définit des limites pour les tensions et courants harmoniques au point commun de raccordement (Pcc) pour assurer le bon fonctionnement des récepteurs dans d'autres sites. Les taux individuels maximaux des tensions harmoniques ainsi que le THD à ne pas dépasser sont donnés dans le tableau suivant: [5]

*Tableau I-2 : Limites des tensions harmoniques selon IEEE-519 [5]*

Tension au jeu de barre	Composante harmonique individuelle maximale (%)	THD maximal (%)
69 kV et moins	3.0	5.0
115 kV à 161 kV	1.5	2.5
Plus de 161kV	1.0	1.5

D'autre part, pour assurer la compatibilité entre les installations sensibles alimentées par le réseau, il faut imposer des limites d'émission et donner des niveaux d'immunité suffisants.

#### **I.7 Conclusion**

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté les différentes sources de perturbation affectant la forme d'onde des tensions du réseau électrique qui peuvent détériorer les équipements électriques qui y sont connectés. Suite à quoi, nous avons présenté les différentes remèdes et solutions de dépollutions des réseaux électriques, qu'elles soient classiques ou modernes.

Se conformer aux normes imposées par les différentes commissions et organisations mondiales est nécessaire pour améliorer la qualité de l'énergie électrique et la sécurisation des opérateurs et équipements.

Notre objectif étant fixé sur la dépollution de perturbation du type courant provoqué par différentes charges non-linéaire et seule la solution de filtrage active parallèle de puissance sera analysée dans ce mémoire.

# **Chapitre II**

## **Stratégies de commande appliquées au FAP à quatre bras**

## **II.1 Introduction**

Comme il a été mentionné précédemment, l'objectif de ce travail est de réduire les perturbations dans les réseaux électriques au niveau de la source, à cet effet, nous nous proposons, parmi les solutions présentées auparavant, de travailler sur le filtrage actif parallèle.

Dans ce chapitre, nous présenterons le principe de fonctionnement du filtre actif parallèle à quatre bras, ainsi que ses avantages et inconvénients, ensuite nous étudierons sa structure générale, laquelle a été divisé en deux : la partie puissance et la partie contrôle-commande. Nous détaillerons d'abord la partie puissance, puis nous présenterons le système qu'on désire étudier. Enfin, dans la partie contrôle-commande, nous aborderons l'identification des courants perturbés, donc, nous présenterons les méthodes qu'on a appliquées pour extraire les courants de référence du filtre actif parallèle à quatre bras.

## **II.2 Principe du filtre actif parallèle à quatre bras [2][5]**

Le filtre actif parallèle est commandé comme un générateur de courant, il génère des courants harmoniques, en opposition de phase avec les courants harmoniques produites par la charge ce qui permet d'avoir des courants sinusoïdaux côté source.

En général, le filtre actif parallèle est utilisé pour la dépollution des réseaux Basse Tension et Moyenne Tension. Son impédance totale vis-à-vis de la source et de la charge lui confère une bonne auto-adaptabilité avec des performances appréciables.

Actuellement, les filtres actifs parallèles sont essentiellement installés par les consommateurs industriels. Nous spécifions deux types de filtres actifs parallèles, le filtre actif à structure tension et le filtre actif à structure courant. Nous nous intéressons dans notre étude uniquement au filtrage actif parallèle à structure tension.

De plus nous nous intéressons aux topologies de filtre actif parallèle à quatre bras qui sont relié aux réseaux électriques quatre fils.

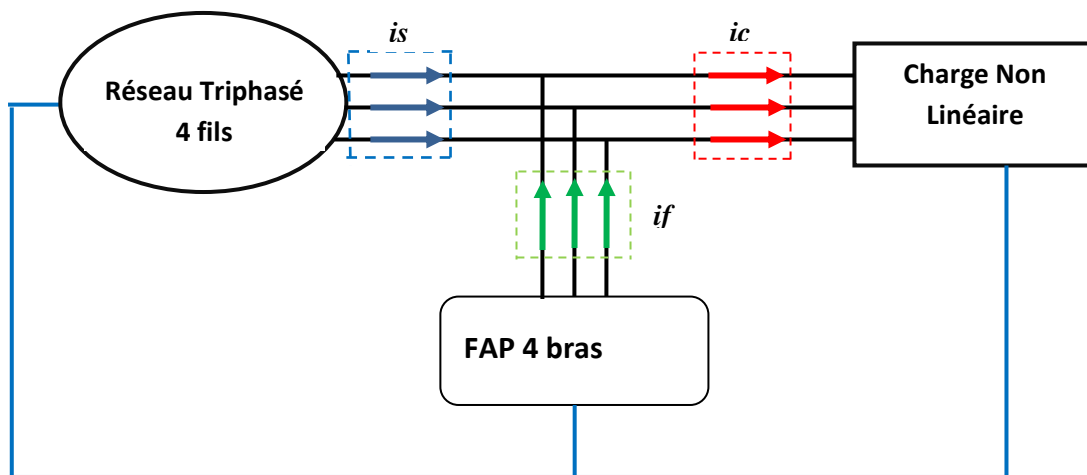


Figure II.1 : Principe du filtre actif parallèle

### II.2.1 Avantages et inconvénients de filtre actif de puissance parallèle relié à un réseau électrique à quatre fils

Le tableau suivant présente quelques avantages et inconvénients d'un filtre actif parallèle connecté à un réseau électrique à quatre fils : [4]

Tableau II.1 :  
Avantages et inconvénients du FAP à quatre bras

Avantages	Meilleure contrôlabilité de courant Faible condensateur côté bus continu Plus de degré de liberté
Inconvénients	16 composants semi-conducteurs Plus de pertes par conduction et par commutation

### II.3 Étude du filtre actif parallèle à quatre bras [4][10]

Un filtre actif de puissance est essentiellement constitué de deux parties :

- Partie puissance.
- Partie commande – contrôle.

Le circuit de puissance du filtre actif à quarte bras est constitué par un onduleur de tension triphasé à quatre bras, dont chaque bras est constitué d'IGBT et le quatrième bras est relié au neutre, et est connecté en parallèle sur le réseau par un filtre de découplage. La capacité  $C$  côté continue de l'onduleur se comporte comme une source de tension continue. La tension  $V$  aux bornes du condensateur doit être positive et maintenue constante par la commande. Ainsi, on distingue trois éléments dans la partie puissance :

- un onduleur de tension.
- un filtre de découplage.
- Système de stockage d'énergie

### II.3.1 la partie puissance du FAP

#### II.3.1.1 Description de l'onduleur triphasé à quatre bras

Dans notre étude, nous utilisons un onduleur de tension comprenant quatre bras constitué de huit interrupteurs réversibles en courant (IGBT) en antiparallèle avec une diode. Comme l'illustre la figure ci-après :

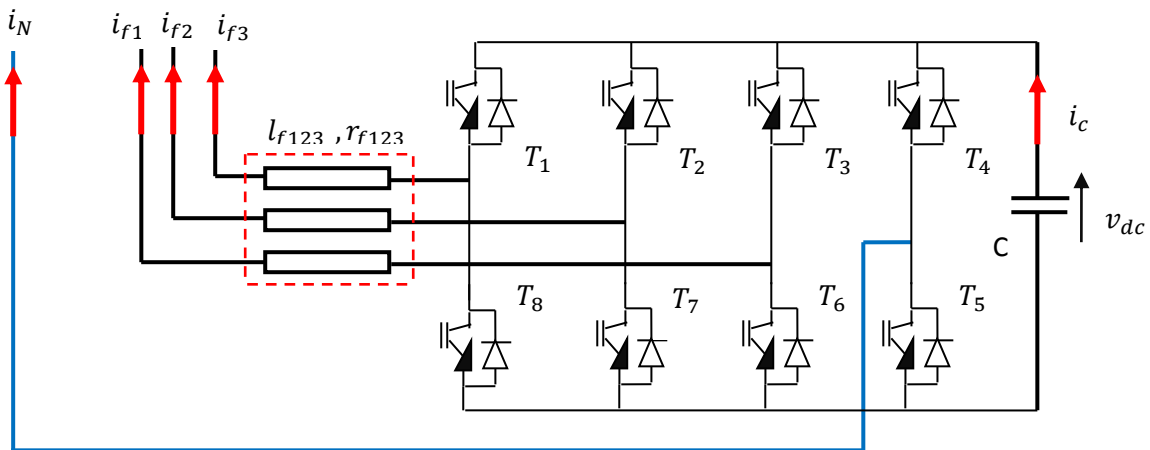


Figure II.2 : Constitution de l'onduleur triphasé à quatre bras

Les états de commutation pour ce type d'onduleur sont présentés dans le tableau II-4 et sont obtenus grâce aux expressions suivantes :

$$v_{f1} = (T_1 - T_4)v_{dc} \quad (\text{II.5})$$

$$v_{f2} = (T_2 - T_4)v_{dc} \quad (\text{II.6})$$

$$v_{f3} = (T_3 - T_4)v_{dc} \quad (\text{II.7})$$

$$i_{dc} = T_1 \times i_1 + T_2 \times i_2 + T_3 \times i_3 - T_4 \times i_N \quad (\text{II.8})$$

**Tableau II.2 : Les états de commutation de l'onduleur**

<b>K</b>	<b>s<sub>4</sub></b>	<b>s<sub>3</sub></b>	<b>s<sub>2</sub></b>	<b>s<sub>1</sub></b>	<b>v<sub>f3</sub></b>	<b>v<sub>f2</sub></b>	<b>v<sub>f1</sub></b>
<b>0</b>	0	0	0	0	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>1</b>	0	0	0	1	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>V<sub>dc</sub></b>
<b>2</b>	0	0	1	0	<b>0</b>	<b>V<sub>dc</sub></b>	<b>0</b>
<b>3</b>	0	0	1	1	<b>0</b>	<b>V<sub>dc</sub></b>	<b>V<sub>dc</sub></b>
<b>4</b>	0	1	0	0	<b>V<sub>dc</sub></b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>5</b>	0	1	0	1	<b>V<sub>dc</sub></b>	<b>0</b>	<b>V<sub>dc</sub></b>
<b>6</b>	0	1	1	0	<b>V<sub>dc</sub></b>	<b>V<sub>dc</sub></b>	<b>0</b>
<b>7</b>	0	1	1	1	<b>V<sub>dc</sub></b>	<b>V<sub>dc</sub></b>	<b>V<sub>dc</sub></b>
<b>8</b>	1	0	0	0	<b>-V<sub>dc</sub></b>	<b>-V<sub>dc</sub></b>	<b>-V<sub>dc</sub></b>
<b>9</b>	1	0	0	1	<b>-V<sub>dc</sub></b>	<b>-V<sub>dc</sub></b>	<b>0</b>
<b>10</b>	1	0	1	0	<b>-V<sub>dc</sub></b>	<b>0</b>	<b>-V<sub>dc</sub></b>
<b>11</b>	1	0	1	1	<b>-V<sub>dc</sub></b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>12</b>	1	1	0	0	<b>0</b>	<b>-V<sub>dc</sub></b>	<b>-V<sub>dc</sub></b>
<b>13</b>	1	1	0	1	<b>0</b>	<b>-V<sub>dc</sub></b>	<b>0</b>
<b>14</b>	1	1	1	0	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>-V<sub>dc</sub></b>
<b>15</b>	1	1	1	1	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

### II.3.1.2 Filtre de découplage

Le but du filtre de découplage est de permettre la connexion de l'onduleur de tension au réseau électrique qui est très souvent considéré comme une source de courant qui génère des courants harmoniques à partir de la différence des tensions entre la sortie du pont onduleur et le réseau . Ce filtre réduit la propagation sur le réseau électrique des composantes harmoniques dues aux commutations. Nous avons utilisé un filtre entre l'onduleur et le réseau électrique qui se compose d'une inductance  $l_c$  et de résistance interne  $r_c$ .

### II.3.1.3 Stockage de l'énergie [12]

Le stockage de l'énergie du côté continu se fait souvent par un système de stockage capacitif représenté par le condensateur qui joue le rôle d'une source de tension continue. Dans les applications de compensation d'harmoniques, une tension  $V_{dc}$  élevée améliore la dynamique du filtre actif, par ailleurs, le critère commun pour le choix de la capacité  $C_{dc}$  est en générale la limitation des ondulations de la tension continue. Ces ondulations sont d'autant plus élevées que les harmoniques à compenser sont de basses fréquences et d'amplitudes importante. Un dimensionnement adéquat de la capacité peut-être établi à partir d'un courant type que doit générer le filtre actif, ceci n'est pas toujours facile à réaliser car on ne connaît pas souvent tous les harmoniques qu'on doit compenser, ainsi une méthode de dimensionnement consiste à calculer la capacité à partir du courant harmonique du rang le plus faible  $I_h$ . [12]

$$C_{dc} = \frac{I_h}{\tau \cdot V_{dc} \cdot \omega_h} \quad (II.9)$$

Avec  $\tau$  : Taux d'ondulation admissible généralement de l'ordre de 5% de  $V_{dc}$   
 $\omega_h$ : Pulsation du rang h.

## II.4 Présentation du système

Le système qu'on désire utiliser est une source de tension triphasée à quatre fils, trois charges non linéaires monophasées, et d'un filtre actif parallèles à quatre bras avec sa commande.



### II.4.1 Type de la source d'alimentation

La source de tension que nous allons utiliser est un système triphasé à quatre fils (trois phases + neutre) ayant une inductance  $l_s$  et une résistance  $r_s$  comme le montre la figure suivante :

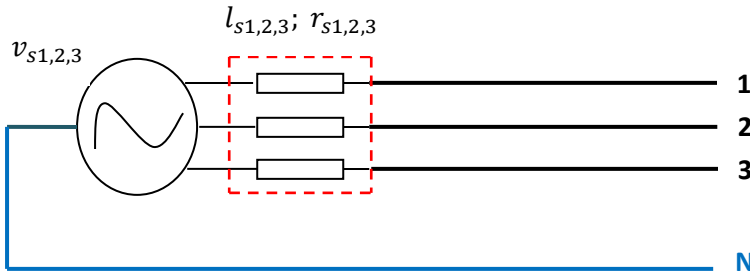


Figure II-3 : Type de la source d'alimentation

### II.4.2 Type de la charge

La charge utilisée dans notre système est une charge non linéaire constituée de trois charges monophasées de type pont redresseur monophasé à diode débitant chacune d'elles sur une charge  $l, r$ , comme illustre la figure ci-dessous.

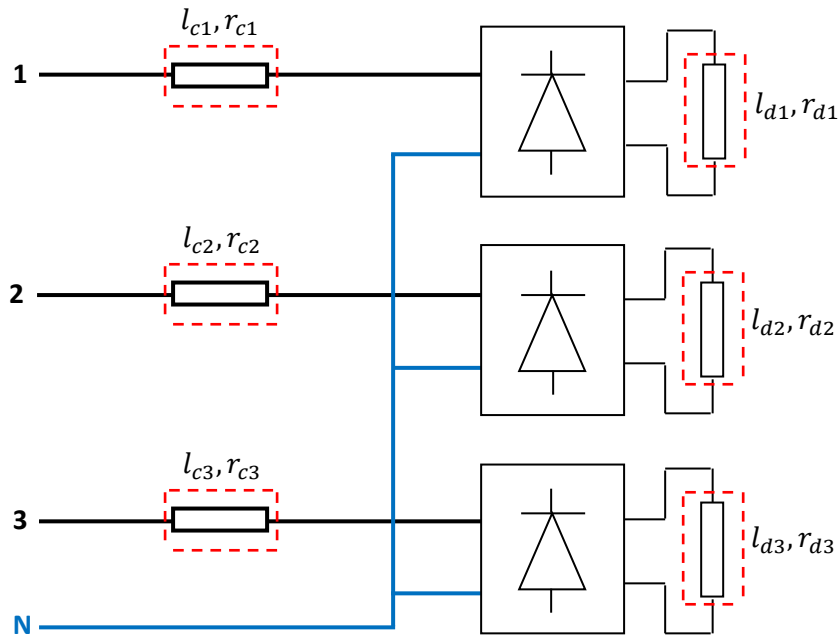


Figure II.4 : Type de la charge

La charge non linéaire produit des harmoniques de courant et les transmet sur le réseau. Nous aurons ainsi au point de raccordement de la charge au réseau une pollution harmonique.

## II.5 Étude de la partie commande

### II.5.1 Commande de l'onduleur par hystérésis

C'est une commande non-linéaire à fréquence de commutation variable permettant de fixer les ondulations de courants. Cette stratégie de commande assure un contrôle satisfaisant du courant sans exiger une connaissance poussée du modèle du système à contrôler ou de ses paramètres. Elle est très couramment utilisée.

La commande par hystérésis permet la commutation des interrupteurs du filtre actif lorsque l'erreur entre le signal (courant ou tension) et sa consigne excède une amplitude prédéfinie. Cette amplitude est communément appelée fourchette ou bande d'hystérésis. Cette technique ne demande qu'un comparateur à hystérésis par phase.

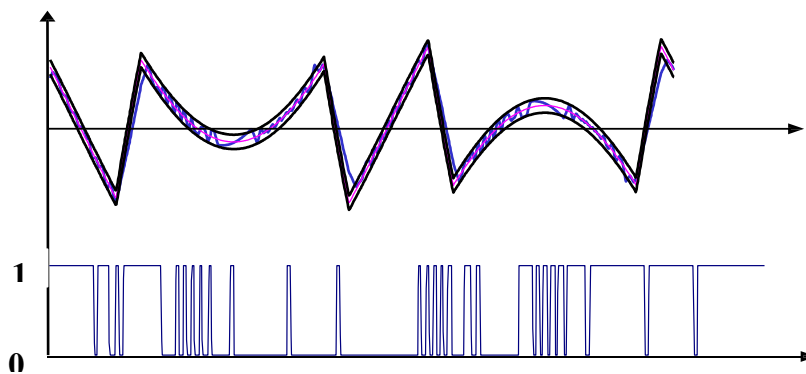


Figure II.5 : Bande d'hystérésis et signal de commande d'un interrupteur

Le comparateur à hystérésis fonctionne selon le principe suivant :

L'interrupteur s'ouvre si l'erreur devient inférieure à  $-H/2$ , il se ferme si cette dernière est supérieure à  $+H/2$ , où  $H$  représente la fourchette (ou largeur) d'hystérésis. Si l'erreur est maintenant comprise entre  $-H/2$  et  $+H/2$  (c.-à-d. qu'elle varie à l'intérieur de la fourchette d'hystérésis), l'interrupteur ne commute pas. Par exemple, dans le cas d'un filtre actif parallèle, si l'erreur du courant généré se situe à l'intérieur de la bande,

pas de réaction enregistrée de la part de la commande ; si l'erreur est trop élevée, la commande est positive et entraîne l'interrupteur à la fermeture. Par conséquent, la tension générée est supérieure ou égale à zéro, condition nécessaire pour l'accroissement du courant. Analogiquement, lorsque le courant de sortie est trop élevé, ceci incite l'interrupteur à l'ouverture, donc la tension sera inférieure ou égale à zéro et ainsi le courant va décroître. L'interaction entre les trois phases de l'onduleur constituant le filtre actif est un inconvénient. En effet, si la commande est positive dans l'une des phases dans l'objectif d'accroître le courant, la tension s'accroît également sur cette phase, tandis qu'elle diminue dans les deux autres phases. La commande par hystérésis est excellente dans la mesure où elle assure une bonne réponse de l'onduleur vis-à-vis des changements rapides des courants de référence, puisque les comparateurs à hystérésis ont une inertie et un retard négligeables.

Le schéma synoptique de la commande des courants du filtre actif par des régulateurs à hystérésis est donné par la figure ci-dessous :

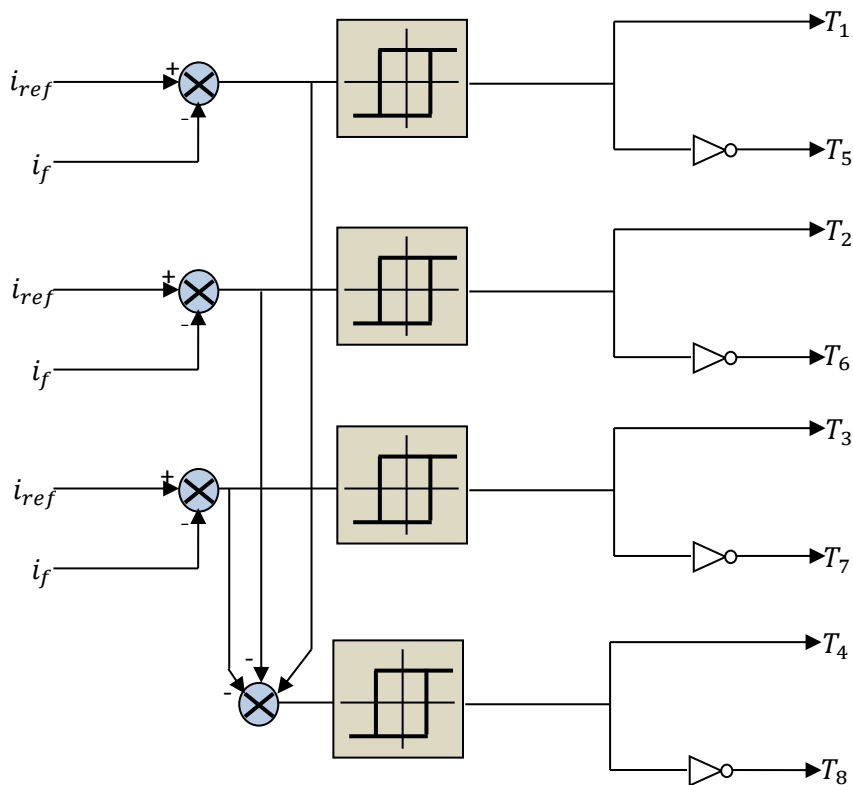


Figure II.6 : Commande des courants de filtre par hystérésis.

En revanche, les commutations évoluent librement à l'intérieur de la bande d'hystérésis. On ne peut pas maîtriser correctement le spectre haute fréquence dû aux fréquences de commutation.

### **II.5.2 Détermination des courants de référence**

La charge polluante absorbe un courant constitué d'une composante fondamentale et de composantes harmoniques. Le but du filtrage actif parallèle est la génération de courants harmoniques de même amplitude mais en opposition de phase avec ceux générés par la charge. Ainsi, le courant fourni par le réseau sera sinusoïdal. Il est nécessaire d'identifier avec précision les courants harmoniques de la charge polluante. Le choix de la méthode utilisée pour isoler la composante harmonique du courant de charge est un facteur déterminant quant aux performances obtenues par le filtre actif (précision, dynamique, ...).[10]

### **II.5.3 Identification des courants de références**

Plusieurs algorithmes d'identification des grandeurs harmoniques de référence et de nombreuses techniques de commande et de régulation ont été développés depuis la mise en place des premiers filtres actifs afin de générer les signaux de référence servant à la commande du filtre actif, nous avons opté pour les lois de commande suivantes :

- Méthode directe dite théorie p-q-r.
- Méthode des puissances instantanées réelles, imaginaires et homopolaires modifié p-q-o.
- Méthode des puissances instantanées avec des FMVs.

#### **II.5.3.1 Méthode directe dite théorie p-q-r [4]**

Cette méthode introduite par Kim, réalise une double transformation, à savoir une première transformation des tensions simples et des courants de ligne des axes a-b-c suivant les axes  $\alpha$ - $\beta$ -0, puis une seconde transformation des axes  $\alpha$ - $\beta$ -0 aux axes p-q-r.

Son principe est énoncé comme suit : Soient les tensions simples  $v_{s1}(t), v_{s2}(t), v_{s3}(t)$  et les courants de charges  $i_{c1}(t), i_{c2}(t), i_{c3}(t)$  d'un système triphasé avec homopolaire.

La figure (II.12) illustre l'identification des courants de référence lors de la compensation simultanée des courants harmoniques et l'énergie réactive par la méthode directe dite théorie p-q-r.

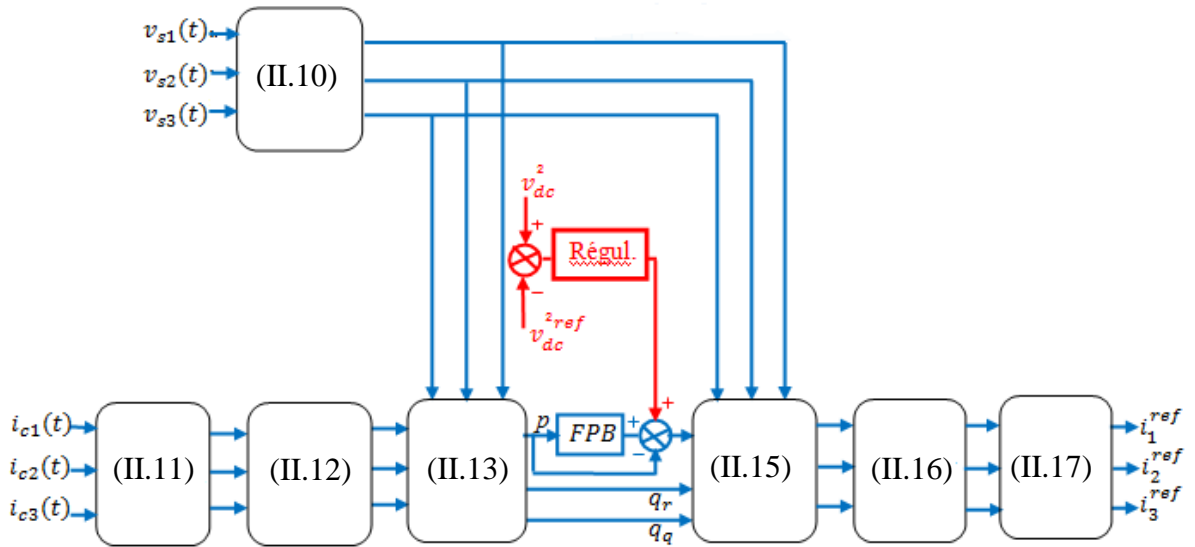


Figure II.7 : Principe de la commande d'un filtre actif de puissance parallèle par la méthode directe dite théorie p-q-r.

Les équations qu'on devra introduire dans chaque block de transformation sont décrites par la suite :

En utilisant la transformation de Concordia nous obtenons les deux relations suivantes :

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha} \\ v_{\beta} \\ v_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s1} \\ v_{s2} \\ v_{s3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c1} \\ i_{c2} \\ i_{c3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

La transformation suivante appelée p-q-r, nous donnera :

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{V_\alpha}{V_{\alpha\beta 0}} & \frac{V_\beta}{V_{\alpha\beta 0}} & \frac{V_0}{V_{\alpha\beta 0}} \\ -\frac{V_\beta}{V_{\alpha\beta}} & \frac{V_\alpha}{V_{\alpha\beta}} & 0 \\ -\frac{V_\alpha V_0}{V_{\alpha\beta} V_{\alpha\beta 0}} & -\frac{V_\beta V_0}{V_{\alpha\beta} V_{\alpha\beta 0}} & \frac{V_{\alpha\beta}}{V_{\alpha\beta 0}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

Avec

$$V_{\alpha\beta} = \sqrt{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \text{ et } V_{\alpha\beta 0} = \sqrt{V_\alpha^2 + V_\beta^2 + V_0^2}$$

Les puissances actives et réactives instantanées sont données par l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q_r \\ q_q \end{bmatrix} = V_{\alpha\beta 0} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

Cela nous donne les courants dans le repère p-q-r exprimés par :

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{\alpha\beta 0}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q_r \\ q_q \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

Suivant la fonction que nous donnons au filtre actif de puissance, nous pouvons compenser soit les harmoniques de courant et l'énergie réactive ou uniquement l'un des deux.

Le tableau suivant résume les modes des compensations possibles :

**Tableau II.3 : les modes de compensation de la commande p-q-r**

	Compensation des harmoniques de courant	Compensation des harmoniques de courant et de l'énergie réactive
Paramètres de contrôle	$p_f = \tilde{p}$ et $q_{fr} = \tilde{q}_r$ $q_{fq} = \tilde{q}_q$	$p_f = \tilde{p}$ et $q_{fr} = q_r$ $q_{fq} = q_q$

Si nous voulons compenser simultanément les harmoniques de courant et l'énergie réactive, l'équation (II.10) deviendra :

$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_p^{ref} \\ \tilde{i}_q^{ref} \\ \tilde{i}_r^{ref} \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{\alpha\beta 0}} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ q_r \\ q_q \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

Ce qui donne dans les axes  $\alpha$  - $\beta$ -0 :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha^{ref} \\ i_\beta^{ref} \\ i_0^{ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{V_\alpha}{V_{\alpha\beta 0}} & -\frac{V_\beta}{V_{\alpha\beta}} & -\frac{V_\alpha V_0}{V_{\alpha\beta} V_{\alpha\beta 0}} \\ \frac{V_\beta}{V_{\alpha\beta 0}} & \frac{V_\alpha}{V_{\alpha\beta}} & -\frac{V_\beta V_0}{V_{\alpha\beta} V_{\alpha\beta 0}} \\ \frac{V_0}{V_{\alpha\beta 0}} & \mathbf{0} & \frac{V_{\alpha\beta}}{V_{\alpha\beta 0}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_p^{ref} \\ \tilde{i}_q^{ref} \\ \tilde{i}_r^{ref} \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

Ainsi, après le choix des paramètres de commande, il est aisé de remonter aux courants de référence par la transformation inverse de Concordia :

$$\begin{bmatrix} i_{f1}^{ref} \\ i_{f2}^{ref} \\ i_{f3}^{ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{f\alpha}^{ref} \\ i_{f\beta}^{ref} \\ i_{f0}^{ref} \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

### II.5.3.2 La méthode des puissances instantanées réelles, imaginaires et homopolaires modifié p-q-o [5]

Cette technique exploite la transformation de Concordia appliquée aux tensions simples de source et aux courants de lignes dans le but d'obtenir les puissances réelles, imaginaires et homopolaires instantanées. Il est nécessaire pour l'élimination de la composante continue en transformant la composante fondamentale en une composante continue et les composantes harmoniques en composantes oscillatoires. Le principe de la commande est le suivant :

Soient les tensions simples  $v_{s1}(t), v_{s2}(t), v_{s3}(t)$  et les courants de ligne  $i_{c1}(t), i_{c2}(t), i_{c3}(t)$  d'un système triphasé avec homopolaire.

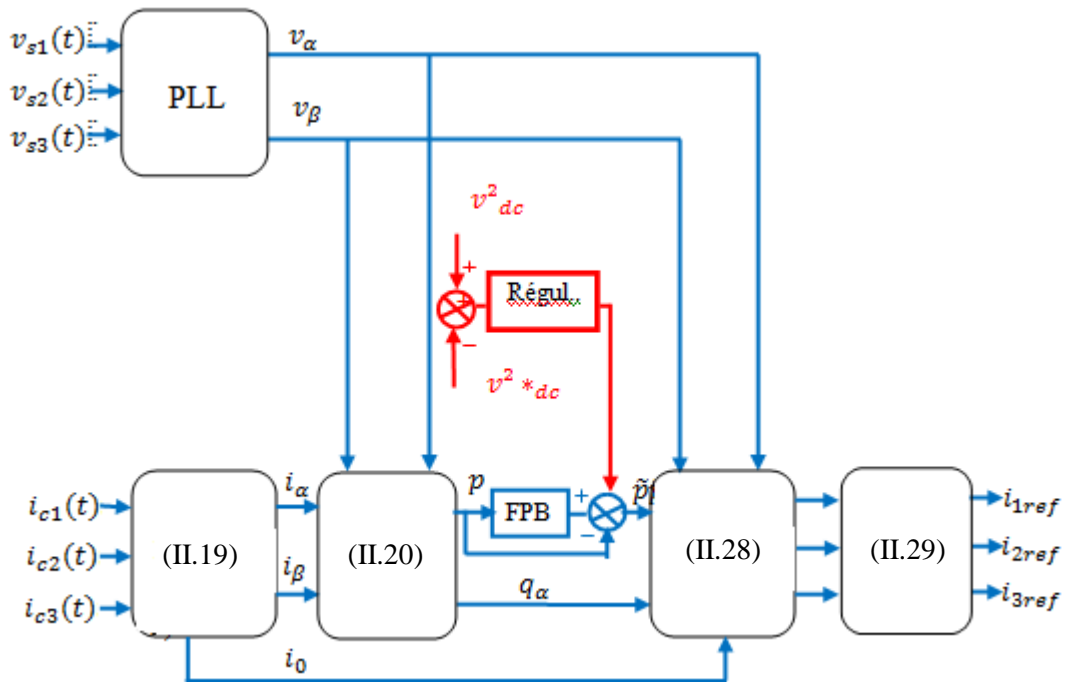


Figure II.8 : Principe de la commande d'un filtre actif de puissance par la méthode des puissances instantanées p-q-o



Chaque block dans le schéma contient une équation des transformations suivantes :

La transformation de Concordia permet de ramener ce système triphasé des axes 1-2-3 aux axes  $\alpha$ - $\beta$ -0 comme le montre les équations suivantes :

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ \mathbf{0} & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s1} \\ v_{s2} \\ v_{s3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ \mathbf{0} & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c1} \\ i_{c2} \\ i_{c3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

De cela nous obtenons les puissances réelle, imaginaire et homopolaire :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ p_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta & \mathbf{0} \\ -v_\beta & v_\alpha & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & v_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

Ces puissances peuvent alors être exprimées comme la somme d'une composante continue et d'une composante alternative, comme suit :

$$\begin{cases} p & \bar{p} & \tilde{p} \\ q & \bar{q} & \tilde{q} \\ p_0 & \bar{p}_0 & \tilde{p}_0 \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

Avec  $\bar{p}$  et  $\bar{p}_0$  et  $\bar{q}$  les composantes continues.

Et  $\tilde{p}$  et  $\tilde{p}_0$  et  $\tilde{q}$  les composantes harmoniques.

Les expressions des courants de charge suivant les axes  $\alpha$ - $\beta$ -0 sont déduits à partir de l'équation (II.20) :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{v_0(v_\alpha^2 + v_\beta^2)} \begin{bmatrix} v_\alpha v_0 & -v_\beta v_0 & 0 \\ v_\beta v_0 & v_\alpha v_0 & 0 \\ 0 & 0 & v_\alpha^2 + v_\beta^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ p_0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

En utilisant une PLL qui génère des tensions équilibrées dans les axes  $\alpha$ - $\beta$  sans homopolaire et synchrones à la tension fondamentale du réseau, nous obtenons :

$$v_\alpha = \sqrt{3}v_s \sin \theta \quad (\text{II.23})$$

$$v_\beta = -\sqrt{3}v_s \cos \theta \quad (\text{II.24})$$

A partir des équations (II.19), (II.23) et (II.24), nous obtenons les expressions des puissances réelles et imaginaires :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

Les expressions des courants dans le plan  $\alpha$ - $\beta$  en fonction des puissances instantanées sont alors données par :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{(v_\alpha^2 + v_\beta^2)} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{II.26})$$

En intégrant l'équation (II.19), l'équation (II.26) deviendra comme suit :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{(v_\alpha^2 + v_\beta^2)} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta & 0 \\ v_\beta & v_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & v_\alpha^2 + v_\beta^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.27})$$

Suivant la fonction que nous donnons au filtre actif de puissance, nous pouvons compenser soit les harmoniques de courant et l'énergie réactive ou uniquement l'un des deux. Le tableau suivant présente les modes de compensation possible.

**Tableau II.4 : Les modes de compensation de la commande p-q-o**

	Compensation des harmoniques de courant	Compensation de l'énergie réactive	Compensation des harmoniques et l'énergie réactive
Paramètre de contrôle	$p_f = \tilde{p}$ $q_f = \tilde{q}$	$p_f = 0$ $q_f = \bar{q}$	$p_f = \tilde{p}$ $q_f = q$

Nous voulons compenser à la fois les harmoniques de courant et l'énergie réactive, l'équation(II.27) deviendra :

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha}^{ref} \\ i_{\beta}^{ref} \\ i_0^{ref} \end{bmatrix} = \frac{1}{(v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2)} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & -v_{\beta} & 0 \\ v_{\beta} & v_{\alpha} & 0 \\ 0 & 0 & v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ q \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (II.28)$$

Enfin , les courants de référence sont obtenu facilement par la transformation inverse de Concordia :

$$\begin{bmatrix} i_{f1}^{ref} \\ i_{f2}^{ref} \\ i_{f3}^{ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{f\alpha}^{ref} \\ i_{f\beta}^{ref} \\ i_{f0}^{ref} \end{bmatrix} \quad (II.29)$$

### II.5.3.3 Identification par la méthode des puissances instantanées avec FMVs [3]

Cette méthode utilise le même principe de la méthode des puissances instantanées classique, qui exploite la transformation de Concordia appliqué à la fois aux tensions simples et courants de ligne, afin de calculer les puissances instantanées réelle, imaginaire et homopolaire.

Mais les filtres d'extractions (Passe Bas Ou Passe Haut) dans la méthode classique permettent d'obtenir une élimination plus ou moins satisfaisante. [3] Pour ces raisons, nous nous proposons d'utilisé un nouveau type de filtre d'extraction nommé Filtre Multi Variable (FMV), son principe de base s'appuie sur les travaux de Song Hong-Scok [2], et est basé sur l'extraction de la composante fondamentale des signaux, directement suivant les axes  $\alpha$ ,  $\beta$  comme cela est présenté à la figure ci-dessous :

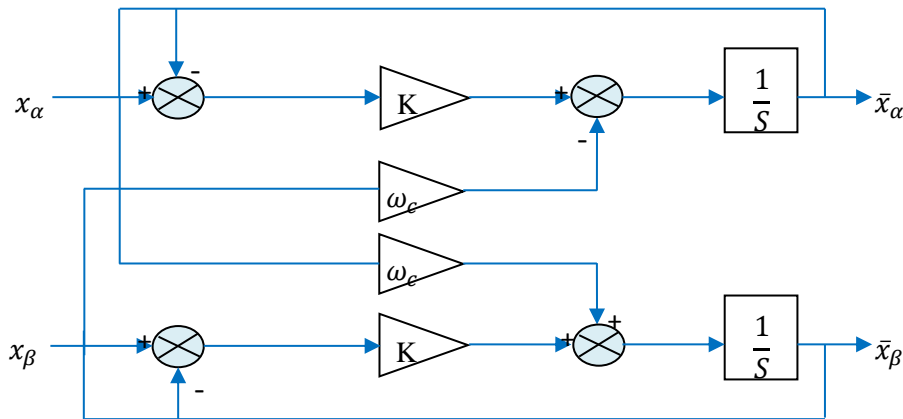


Figure II.9 : Principe du FMV.

Selon les axes  $\alpha$ - $\beta$ , les expressions liant les composantes en sortie du FMV aux composantes d'entrée sont les suivantes :

$$\bar{x}_\alpha = \left( \frac{K}{s} [x_\alpha(s) - \bar{x}_\alpha(s)] - \frac{\omega_c}{s} \times \bar{x}_\beta(s) \right) \quad (\text{II.30})$$

$$\bar{x}_\beta = \left( \frac{K}{s} [x_\beta(s) - \bar{x}_\beta(s)] + \frac{\omega_c}{s} \times \bar{x}_\alpha(s) \right) \quad (\text{II.31})$$

Où:

$x_{\alpha,\beta}$ : le signal d'entrée selon les axes  $\alpha, \beta$  de nature tension ou courant

$\bar{x}_{\alpha,\beta}$ : la composante fondamentale du signal d'entrée

$K$ : constante à fixer

$\omega_c = 2\pi f$ : la pulsation fondamentale du réseau

Ce filtre FMV sera systématiquement mis en œuvre dans la commande étudiée.

La figure suivante présente le schéma de principe pour l'identification des courants de référence par la méthode des puissances instantanées en employant des FMVs.

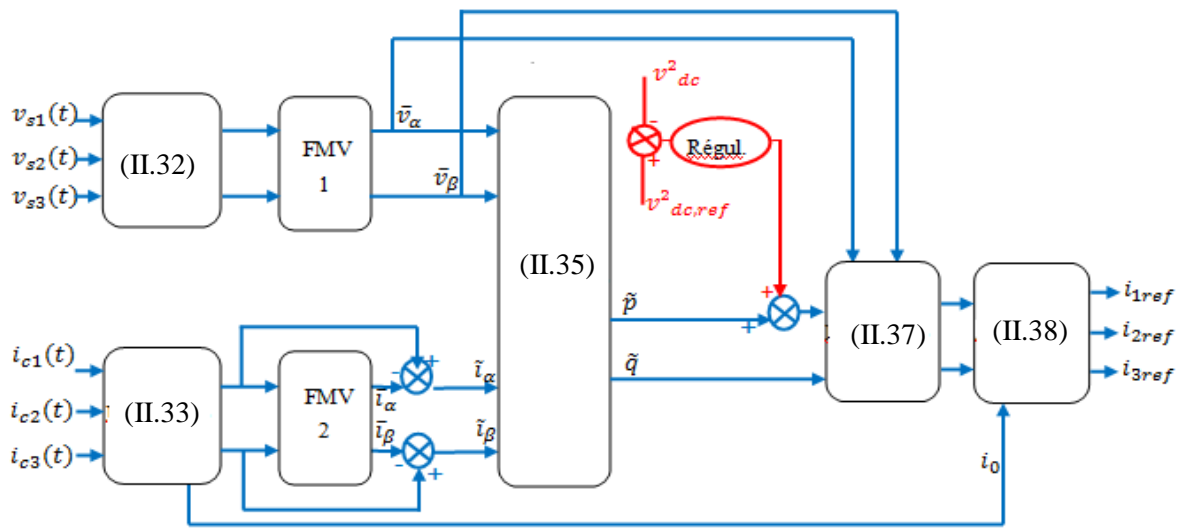


Figure II.10 : Principe de la commande par la méthode des puissances instantanées à l'aide des FMVs.

Soit le système triphasé caractérisé par ses tensions simples  $v_{s1}(t), v_{s2}(t), v_{s3}(t)$  et ses courants de ligne  $i_{c1}(t), i_{c2}(t), i_{c3}(t)$ .

La transformation de Concordia permet de ramener ce système à un système diphasé de tensions et de courants :

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha} \\ v_{\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ \mathbf{0} & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s1} \\ v_{s2} \\ v_{s3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.32})$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c1} \\ i_{c2} \\ i_{c3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.33})$$

Le premier FMV, utilisé au niveau des tensions diphasées, et permet de filtrer efficacement les composantes harmoniques des tensions d'alimentation.[3]

Quant aux courants diphasés suivant les axes  $\alpha$  et  $\beta$ , ils peuvent être définis comme la somme d'une composante fondamentale et d'une composante oscillatoire :

$$\begin{cases} i_\alpha = \bar{i}_\alpha + \tilde{i}_\alpha \\ i_\beta = \bar{i}_\beta + \tilde{i}_\beta \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

Le rôle du FMV est d'extraire les composantes fondamentales des courants de charges à la pulsation  $\omega_c$  directement selon les axes  $\alpha$ - $\beta$ . Ensuite, les composantes oscillatoires de courant selon les axes  $\alpha$ - $\beta$ , notées ici  $\tilde{i}_\alpha$  et  $\tilde{i}_\beta$ , sont obtenues en soustrayant sur chaque axe, la sortie du FMV à son entrée.

Après isolation des composantes fondamentales en tension notées  $\bar{v}_{\alpha\beta}$ , et des courants oscillatoires  $\tilde{i}_{\alpha\beta}$ , nous pouvons alors déduire le calcul des composantes alternatives des puissances réelles (p) et imaginaire (q) instantanées par la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{v}_\alpha & \bar{v}_\beta \\ -\bar{v}_\beta & \bar{v}_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_\alpha \\ \tilde{i}_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II.35})$$

Avec :

$\tilde{p}, \tilde{q}$  : Les composantes oscillées de p et q.

Nous prenons :

$$\tilde{i}_\alpha = i_{\alpha ref} \text{ et } \tilde{i}_\beta = i_{\beta ref} \text{ et } i_0 = i_{0 ref}$$

Donc, les composantes harmoniques du courant sont définies pas l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_\alpha \\ \tilde{i}_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{v}_\alpha & \bar{v}_\beta \\ -\bar{v}_\beta & \bar{v}_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.36})$$

Avec :

$$\begin{bmatrix} \bar{v}_\alpha & \bar{v}_\beta \\ -\bar{v}_\beta & \bar{v}_\alpha \end{bmatrix}^{-1} = \frac{1}{\bar{v}_\alpha^2 + \bar{v}_\beta^2} \begin{bmatrix} \bar{v}_\alpha & -\bar{v}_\beta \\ \bar{v}_\beta & \bar{v}_\alpha \end{bmatrix} \quad (\text{II.37})$$

La transformation inverse de Concordia nous donne les courants de référence harmonique :

$$\begin{bmatrix} i_{f1}^{ref} \\ i_{f2}^{ref} \\ i_{f3}^{ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{0} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha^{ref} \\ i_\beta^{ref} \\ i_0^{ref} \end{bmatrix} \quad (\text{II.38})$$

## II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons choisis de présenter le filtre actif parallèle à quatre bras comme une solution de dépollution des courants perturbés et énergies réactif générés par des charges non-linéaires.

Pour cela, nous avons présenté en détails, le principe et la constitution du filtre actif parallèle à quatre bras connecté à un réseau électrique à quatre fils, ainsi on a décrit le système étudié, qui est un réseau électrique à quatre fils avec des charges monophasées non-linéaires.

Aussi, nous avons présenté les trois stratégies de commande qu'on a appliquée sur le filtre actif parallèle pour l'identification des courants de référence de notre système.

# **Chapitre III**

## **Résultats de simulations**



### III.1 Introduction

Afin d'éliminer les harmoniques de courant ainsi que l'énergie réactive produite par les charges non linéaires, on doit exploiter des techniques de dépollution très performantes. Le filtrage actif parallèle de puissance (FAP) est l'une des solutions modernes et efficaces. Cette technique pouvant être appliquée que ce soit en mode équilibré ou pas.

Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats obtenues lors de nos simulations pour les trois méthodes d'extraction des courants de référence qui sera suivies par une étude comparative

### III.2 Présentation du système sans filtre actif de puissance

Avant l'application de nos lois de commande sur notre système, il est important de connaître les performances de notre réseau sans filtre, de cet effet, nous considérons le model de simulation composé par une source triphasé équilibré alimentant trois charges monophasées non linéaire présenté dans la figure ci-dessous :

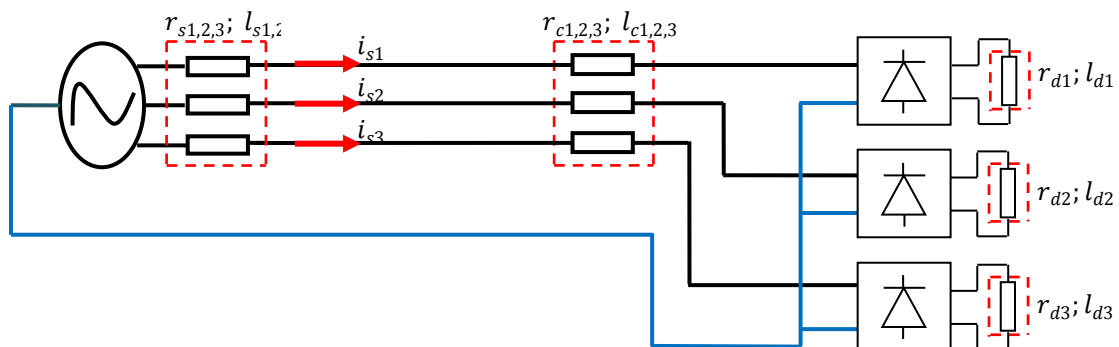


Figure III.1 : Schéma du réseau électrique triphasé à quatre fils alimentant trois charges monophasé non linéaire.

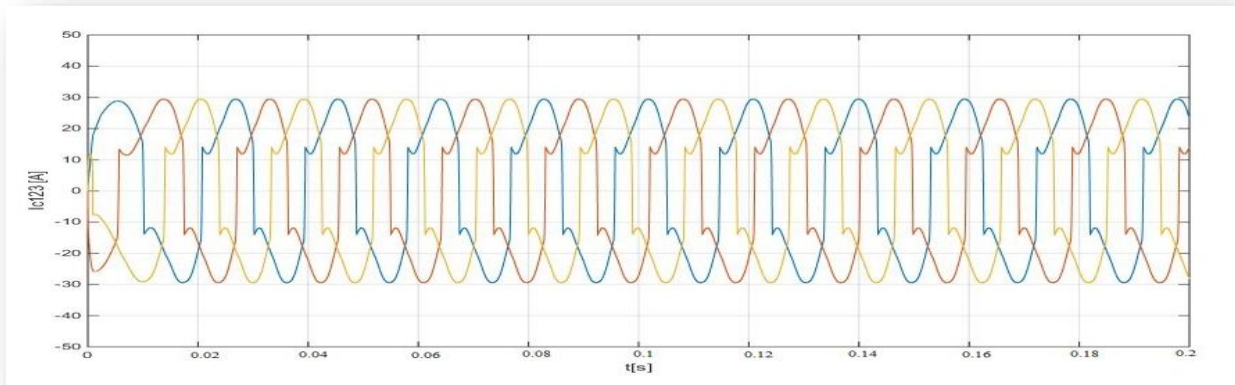
Les paramètres de simulation sont cités dans le tableau III-1 ci-dessous :

Tableau III.1 : Paramètres de simulation pour le système équilibré

$V_{seff}$ [V]	$f$ [Hz]	$r_s$ [mΩ]	$l_s$ [μH]	$r_c$ [mΩ]	$l_c$ [μH]	$r_{d1,2,3}$ [Ω]	$l_{d1,2,3}$ [mH]
240	50	3.63	14.12	11.95	102.71	7	15

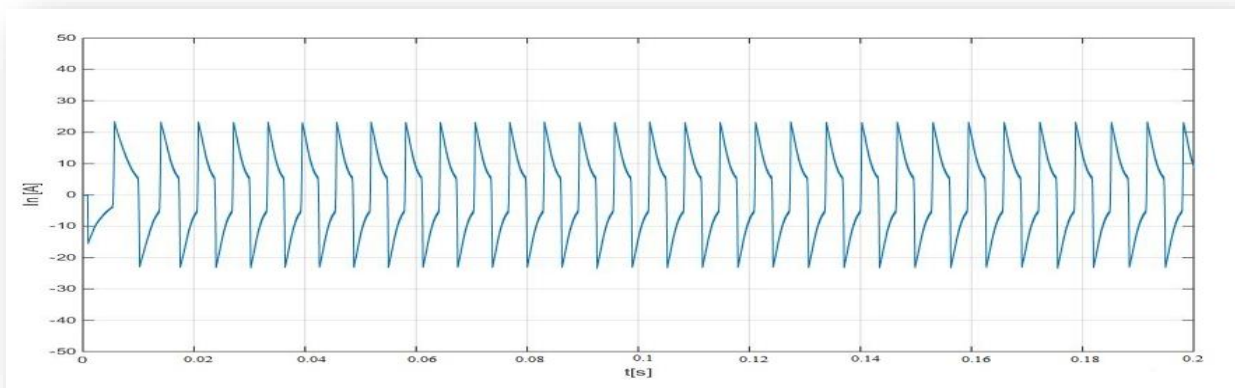
Les caractéristiques courant sont définies comme suite :

La figure suivante présente le courant de charge triphasé tel que  $I_{c123} = I_{s123}$



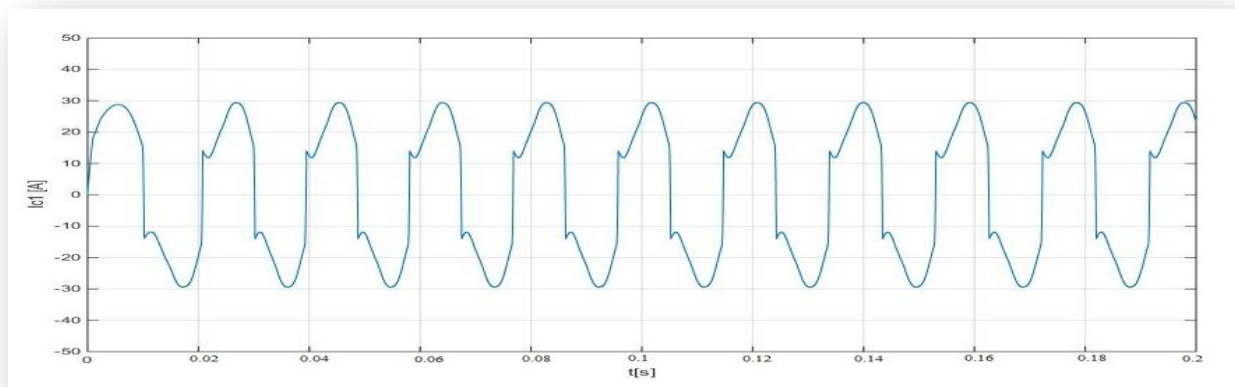
**Figure III.2 : Courant de charge triphasé.**

Le courant du neutre est présenté dans la figure suivante :



**Figure III.3 : Courant du neutre.**

La figure suivante présente le courant de charge de la première phase suivie d'une figure montrant son FFT :



**Figure III.4 : Courant de charge de la phase 1.**

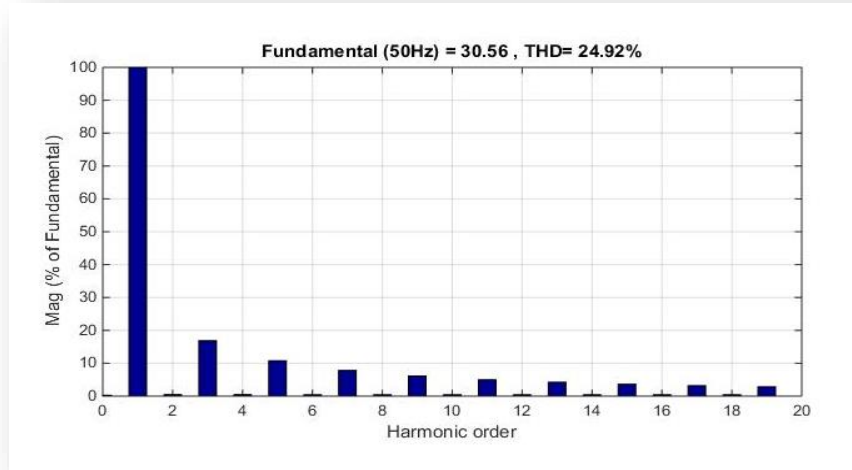


Figure III.5 : FFT du courant de source de la première phase.

### III.3 Système avec filtre actif de puissance parallèle à quatre bras

Après avoir présenté les techniques d'identification des courants de références appliqué aux filtres actifs de puissance parallèle, nous présentons maintenant le model de simulation de notre système, composé de réseau électrique triphasé à quatre fils, connecté à trois charges monophasées non linéaire, et un filtre actif de puissance parallèle à quatre bras. La figure suivante présente le schéma de notre système :

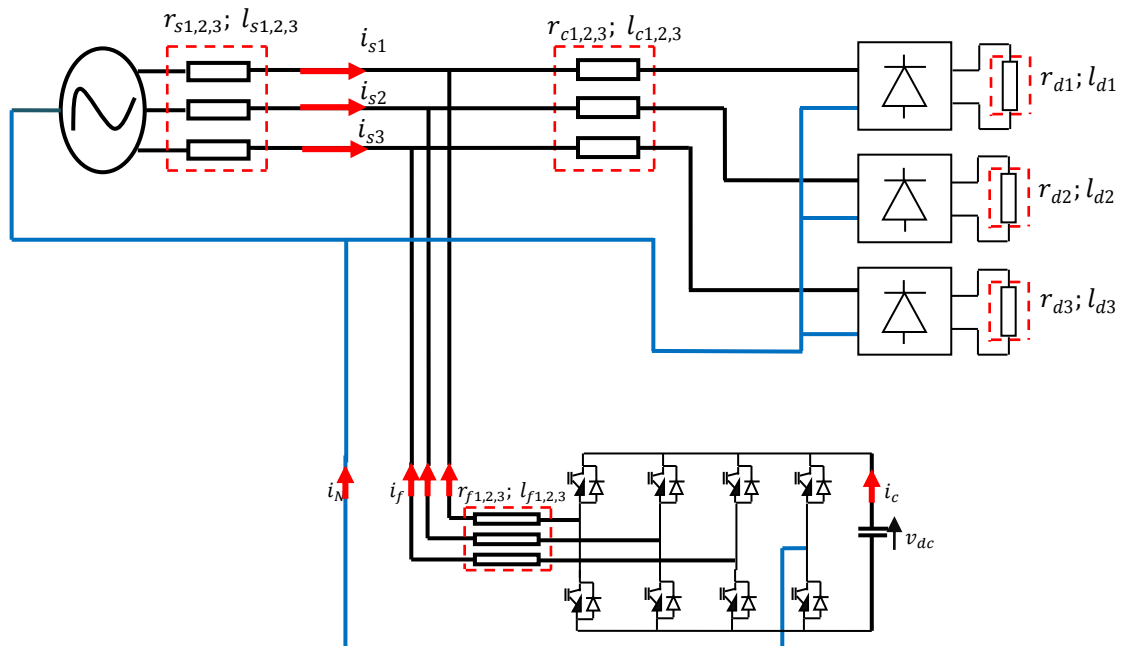


Figure III.6 : Modèle de simulation du système étudié.

Les paramètres de notre filtre actif de puissance sont cités dans le tableau suivant :

**Tableau III.2 : Paramètres de simulation du filtre.**

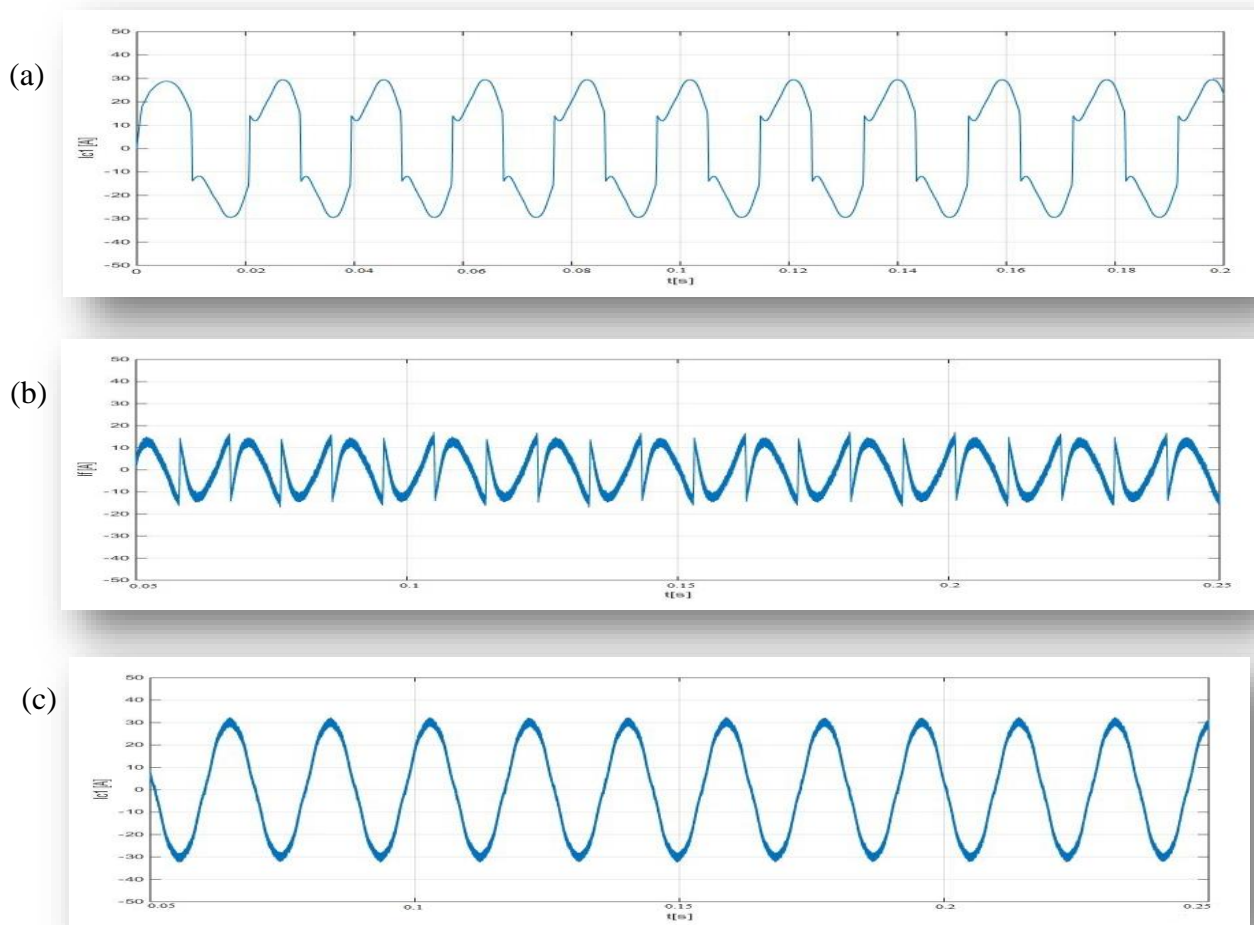
$r_f[m\Omega]$	$l_f[\mu H]$	$C_{dc}[mF]$	$V_{dc}[V]$
8	120	8	700

Après intégration de notre filtre actif de puissance parallèle, suivie d'une série de simulations que ce soit en régime équilibré ou déséquilibrés, nous avons obtenu les résultats suivants :

### III.3.1 Régime équilibré

#### III.3.1.1 Théorie p-q-r

En régime équilibré les courant de phase coté charge identique et déphasé de  $120^\circ$ . La figure suivante représente les caractéristiques courant de la première phase :



**Figure III.7 : Caractéristique courant de la 1<sup>ère</sup> phase**

**(a) :courant de charge ;(b) :courant de filtre ; (c) :courant de source.**

La FFT de ce courant nous a donné :

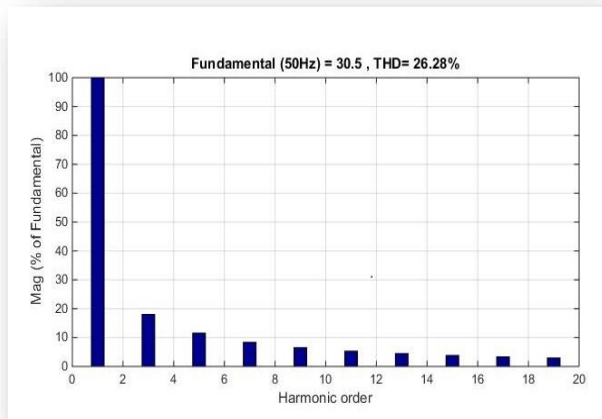


Figure III.8 : FFT du courant de charge.

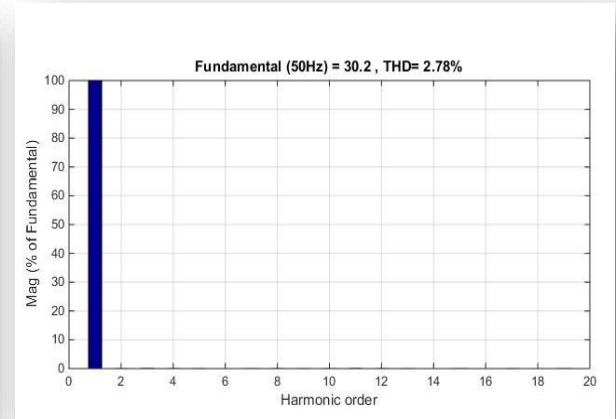


Figure III.9 : FFT du courant de source.

En comparant les courbes (a) et (c) de la figure (III-7) qui représentent le courant de charge et le courant de source , nous remarquons que le filtre actif de puissance a éliminer les perturbations de courant et a compenser l'énergie réactive de sorte que le courant a retrouver la forme sinusoïdale , et ça se confirme en observant les THD de chaque courant présentés dans les figure (III-8) et (III-9) ci-dessus.

Pour ce qui est des courants de neutre avant et après filtrage, on a obtenu:

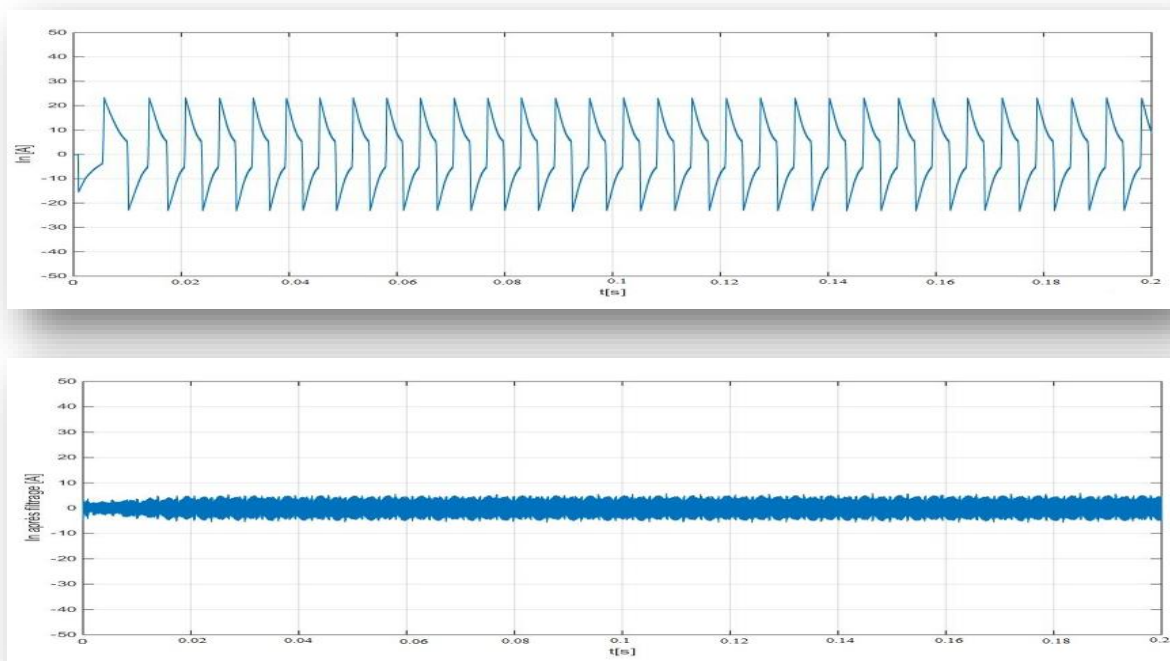
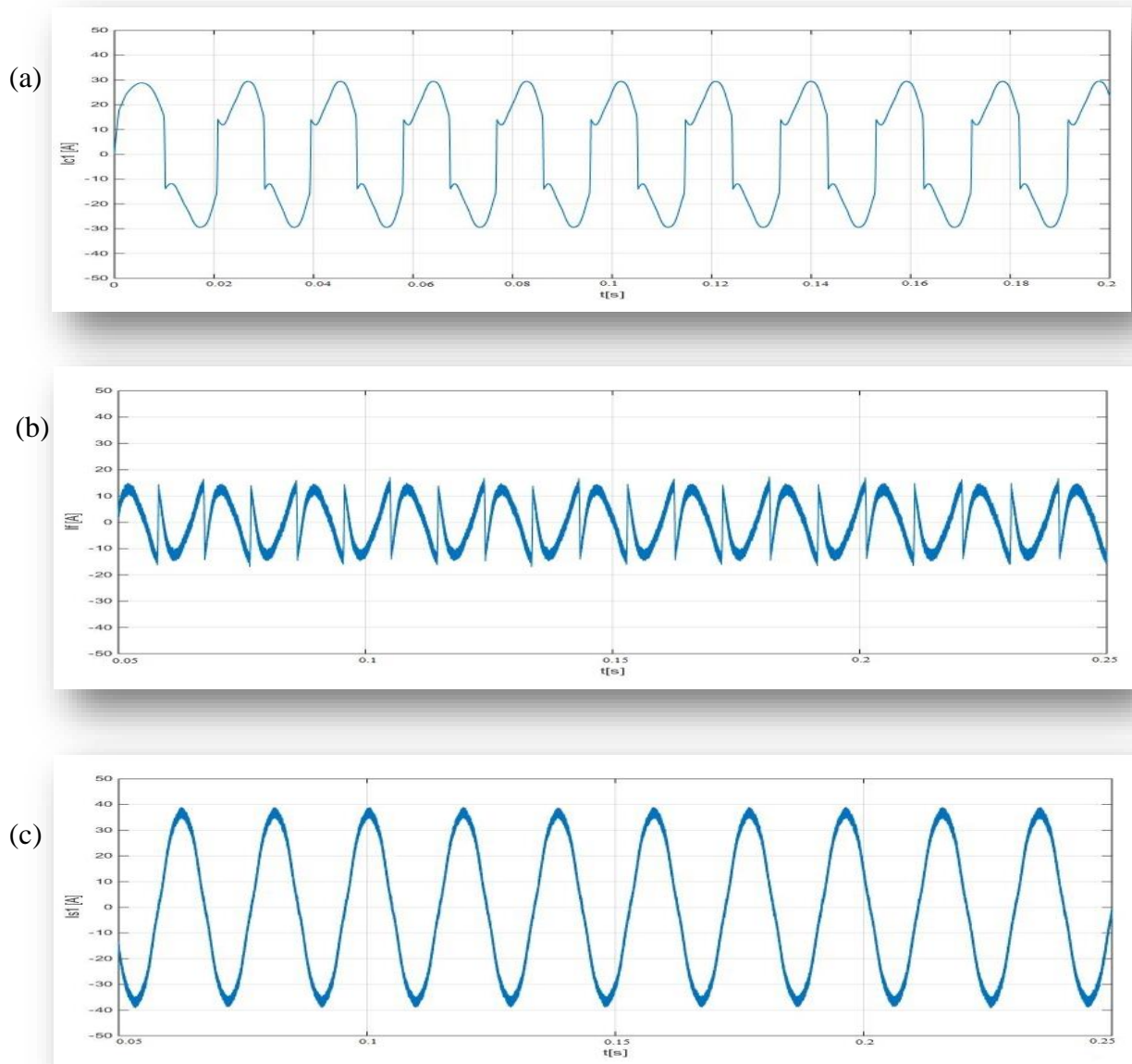


Figure III.10 : Courant du neutre avant et après filtrage.

### III.3.1.2 Méthode des puissances instantanées p-q-o

En appliquant la méthode des puissances instantanées p-q-o, nous avons obtenu les caractéristiques ci-dessous pour le cas de la phase 01 :



*Figure III.11 : Caractéristique courant de la 1<sup>ère</sup> phase*

*(a) courant de charge ; (b) : courant de filtre ; (c) : courant de source.*

Sachant que les courbes (a) et (c) de la figure (III-11) représentent le courant de charge et le courant de source respectivement, nous remarquons que les perturbations de courant ont été éliminées, ainsi que l'énergie réactive après l'injection du courant de filtre illustré par la courbe (b) de la figure (III-11).

La FFT des courants de charge et de source nous a donné :

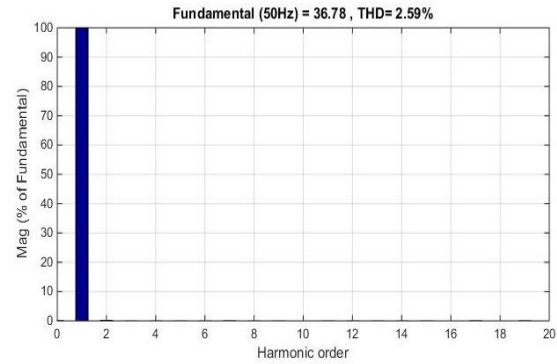
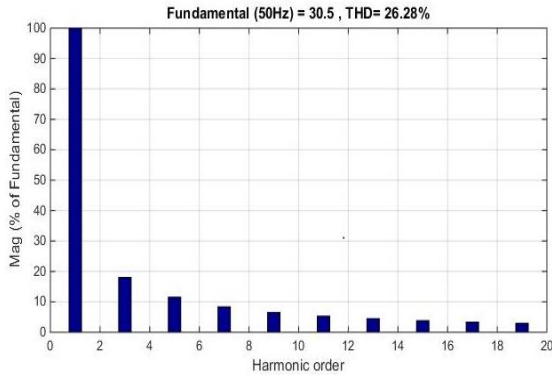


Figure III.12 : FFT du courant de charge.

Figure III.13 : FFT du courant de source.

Les résultats des THD donnés par les FFT des courants de charge et courant de source nous confirment les résultats précédents, que le filtre actif de puissance a été efficace. Après visualisation du courant de neutre avant et après filtrage on a obtenu :

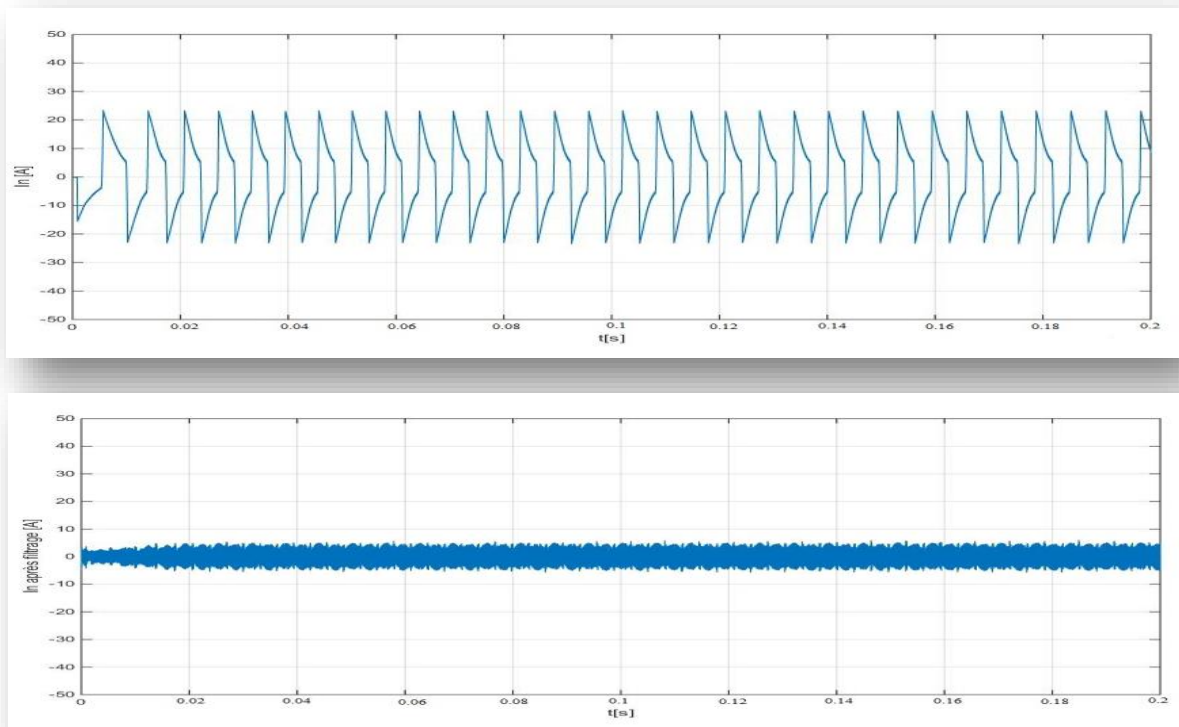
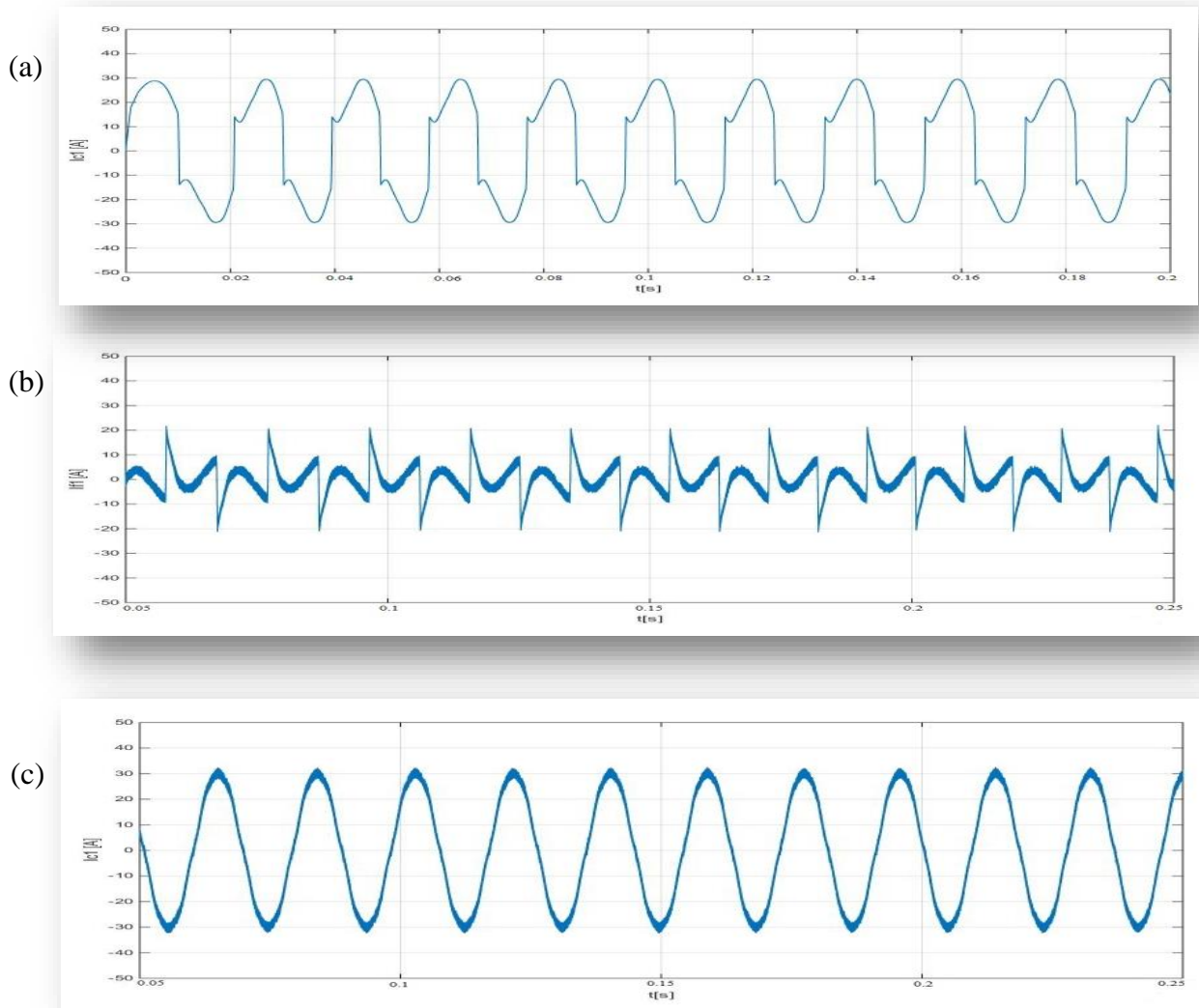


Figure III.14 : Courant du neutre avant et après filtrage.

### III.3.1.3 Méthode p-q avec FMVs.

Nous avons lorsque le système est équilibré le courant coté charge identique pour les trois phases. La figure suivante représente les caractéristiques courant de la première phase :



*Figure III.15 : Caractéristique courant de la 1<sup>ère</sup> phase*

*(a) : Courant de charge, (b) : Courant de filtre, (c) : Courant de source.*



Après comparaison des courbes (a) et (c) de la figure (III-15) qui représentent le courant de charge et le courant de source respectivement, nous remarquons que le filtre actif de puissance a effectué l'élimination des perturbations de courant et a compensé l'énergie réactive, car on observe le courant retrouver sa forme sinusoïdale.

La FFT de ce courant nous a donné :

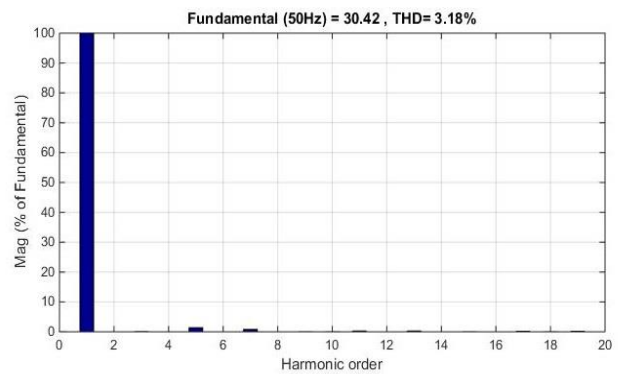
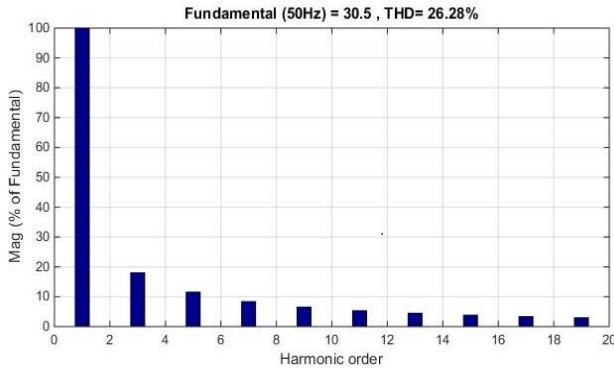


Figure III-16 : FFT du courant de source

Figure III-17 : FFT du courant de charge

Nous confirmons les résultats précédents en observant les THD de chaque courant présentés dans les figures (III-16) et (III-17) ci-dessus.

Après visualisation du courant de neutre avant et après filtrage on a obtenu :

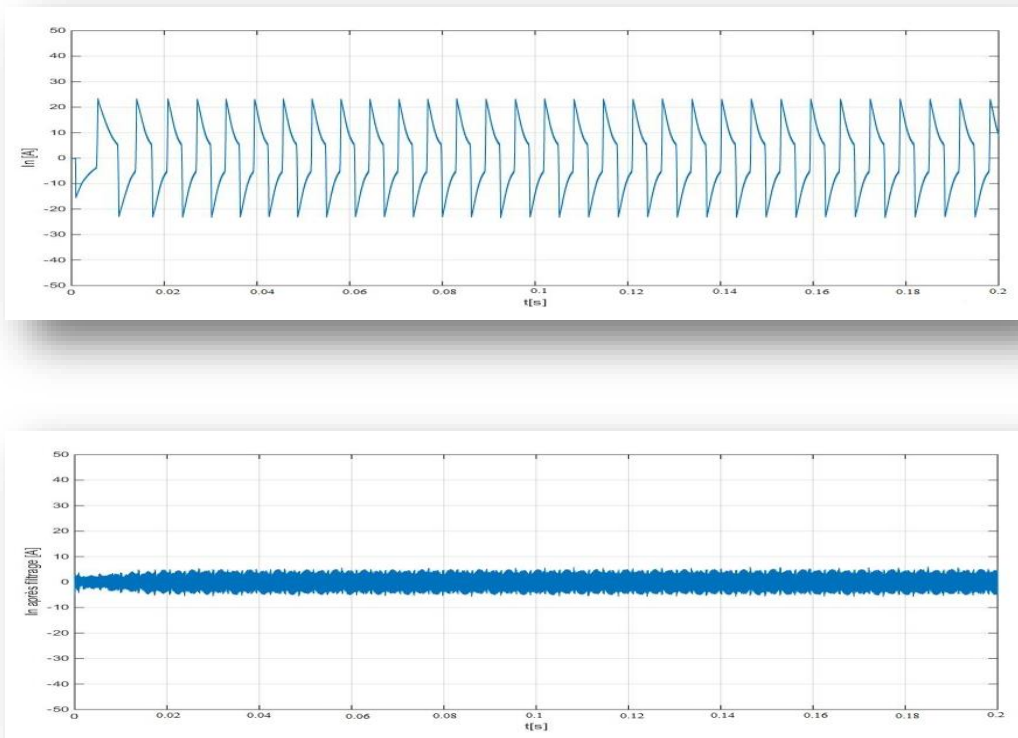


Figure III.18 : Courant du neutre avant et après filtrage.

### III.3.2 Système déséquilibré

#### III.3.2.1 Déséquilibre de charges

Tableau III.3 : Paramètres de simulation dans le cas de déséquilibre de charge.

$V_{seff}$ [V]	$f$ [Hz]	$r_s$ [m $\Omega$ ]	$l_s$ [ $\mu$ H]	$r_c$ [m $\Omega$ ]	$l_c$ [ $\mu$ H]
240	50	3.63	14.12	11.95	102.71
$r_{d1}$ [ $\Omega$ ]	$l_{d1}$ [mH]	$r_{d2}$ [ $\Omega$ ]	$l_{d2}$ [mH]	$r_{d3}$ [ $\Omega$ ]	$l_{d3}$ [mH]
2	42.38	1.3	28.55	7	160

##### III.3.2.1.1 La méthode de théorie p-q-r

La figure suivante présente les caractéristiques courant de la première phase :

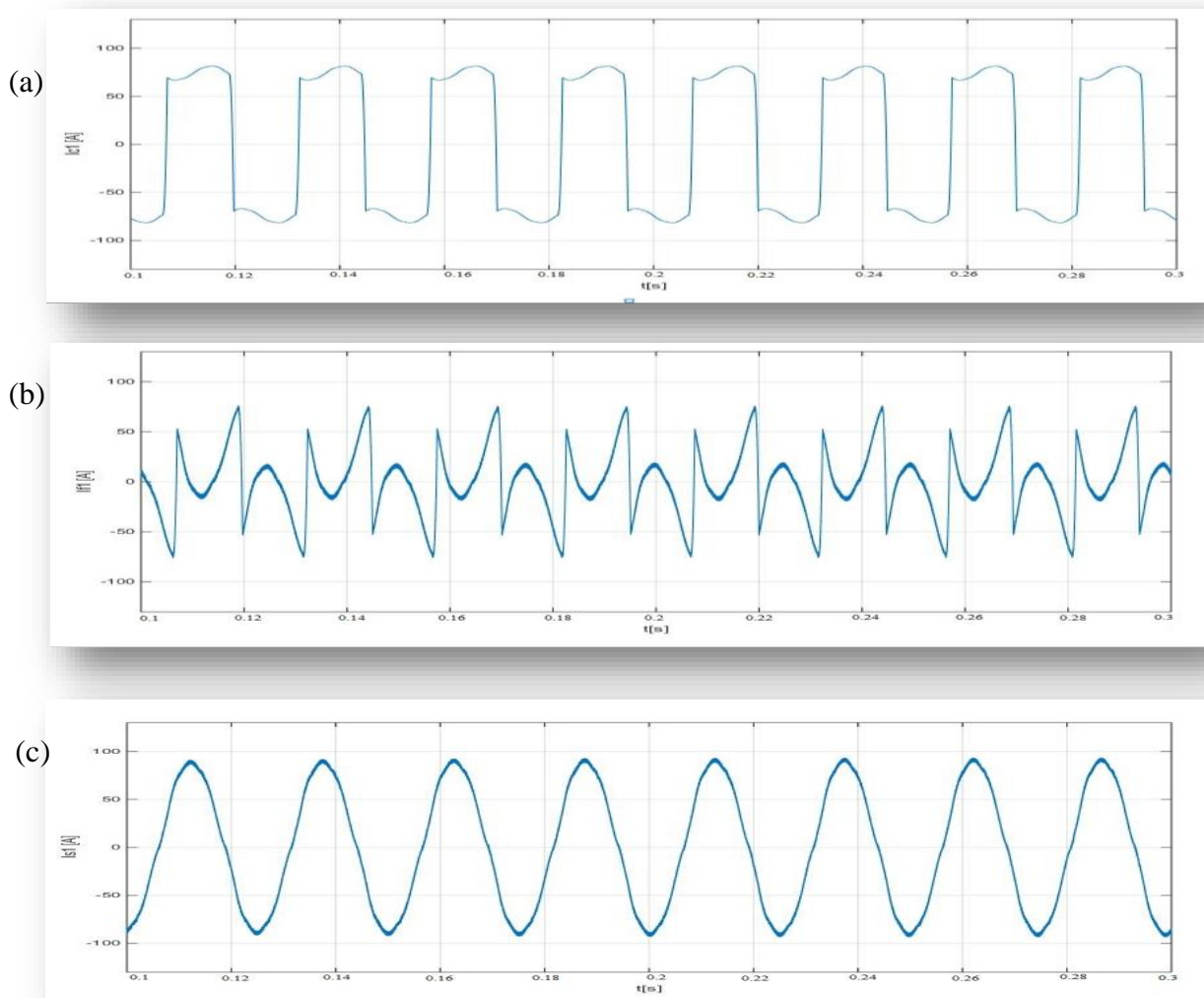
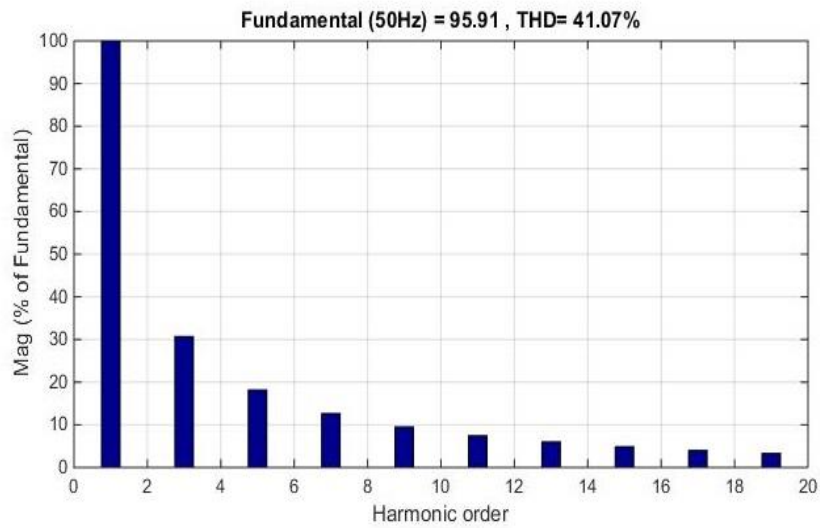
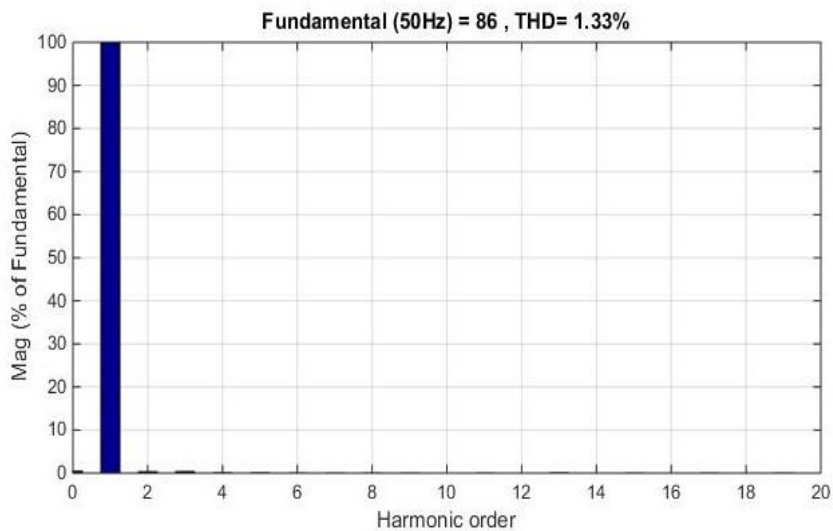


Figure III.19 : Caractéristiques de courant de la 1<sup>ère</sup> phase  
(a) : Courant de charge ; (b) : Courant de filtre ; (c) : Courant de source



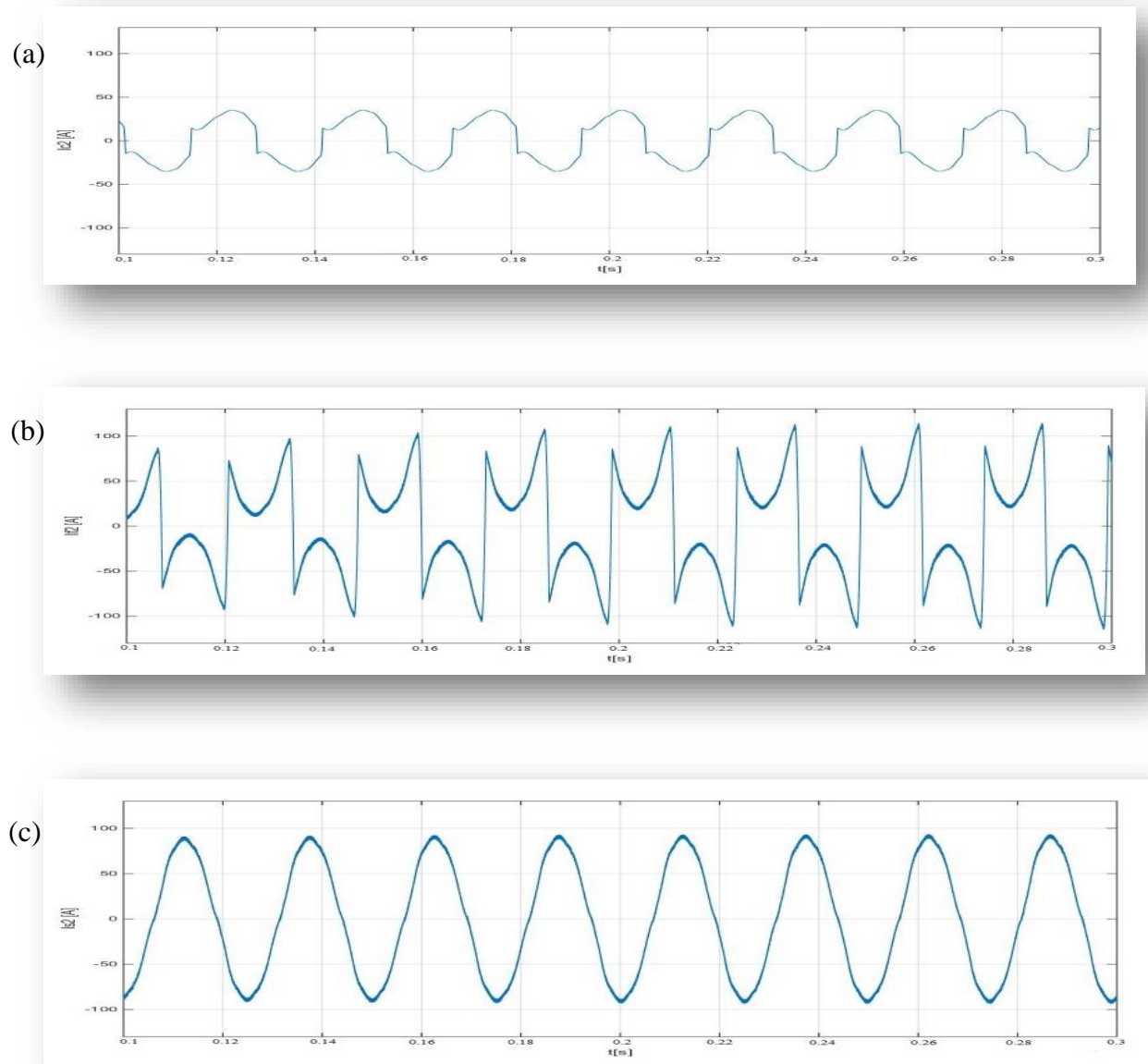
**Figure III.20 : FFT du courant de charge.**



**Figure III.21 : FFT du courant de source.**

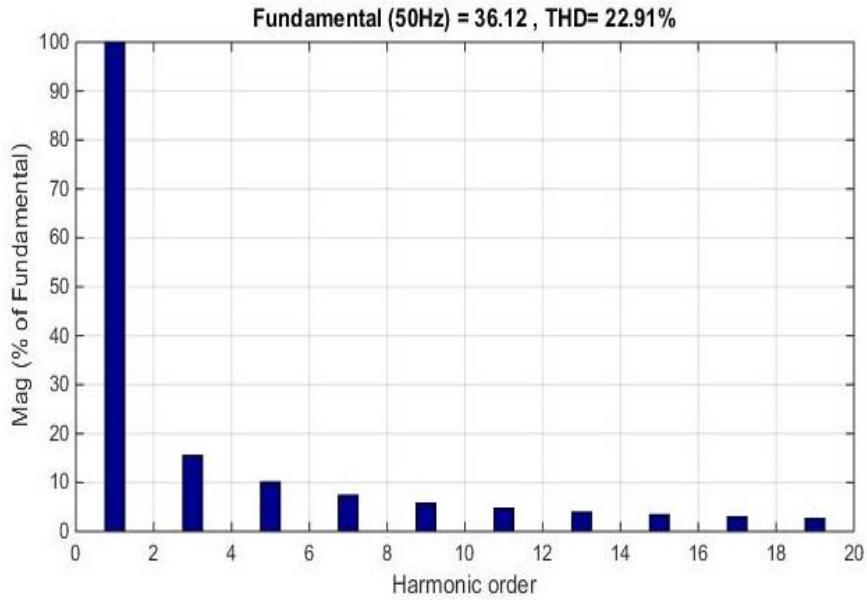
La figure (III-19) nous montre que le filtre a éliminer les perturbations dans la première phase et ça se confirme en observant les THD de chaque courant présentés dans les figure (III-20) et (III-21) ci-après.

Les caractéristiques courant de la deuxième phase sont illustré dans la figure suivante :

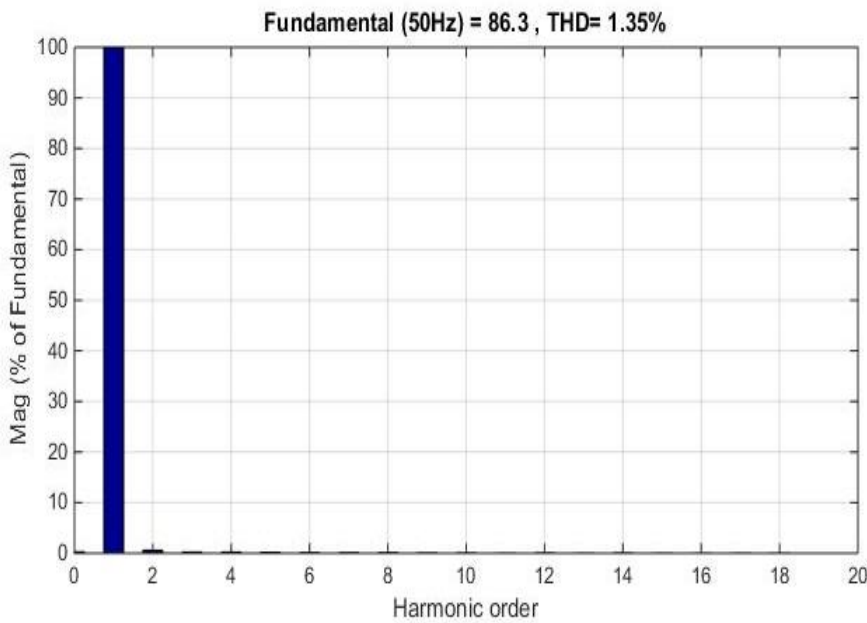


**Figure III.22 : Caractéristiques courant de la 2<sup>ème</sup> phase**

**(a) : courant de charge ; (b) : courant de filtre ; (c) : courant de source.**



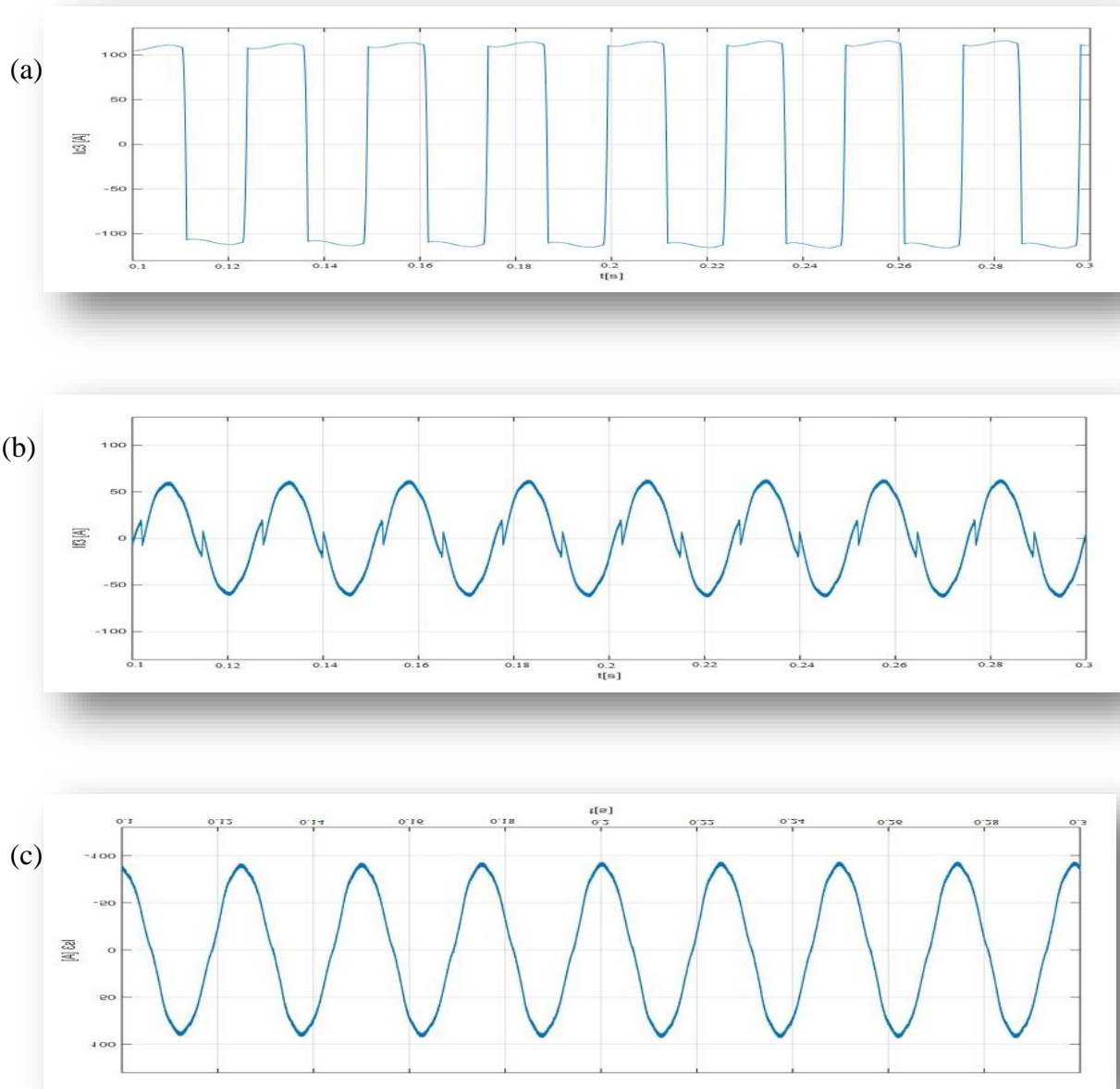
*Figure III.23 : FFT du courant de charge.*



*Figure III.24 : FFT du courant de source.*

Dans la deuxième phase les perturbations ont été éliminées, c'est ce qu'on a remarqué de la figure (III-22) et ça se confirme en observant les THD de chaque courant présenté dans les figures (III-23) et (III-24) ci-dessus.

Pour la troisième phase, les caractéristiques sont illustrées comme suit :



**Figure III.25 : Caractéristiques courant de la 3<sup>ème</sup> phase**

**(a) : Courant de charge ; (b) : Courant de filtre ; (c) : Courant de source.**

Notre filtre actif de puissance a éliminé les perturbations dans la troisième phase de façon que le courant de source soit sinusoïdale, les THD des courant de charge et de source sont les suivants :

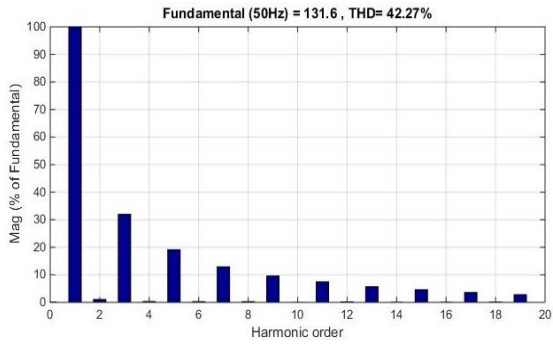


Figure III.26 : FFT du courant de charge.

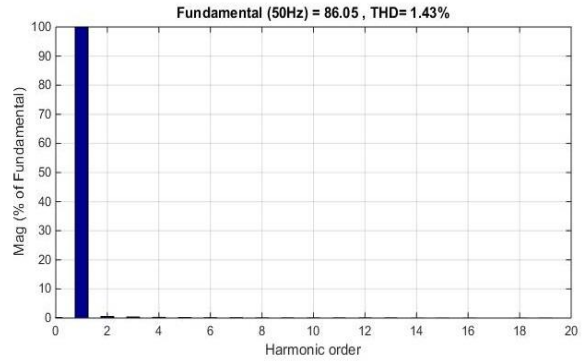


Figure III.27 : FFT du courant de source.

Le courant du neutre est visualisé avant et après filtrage :

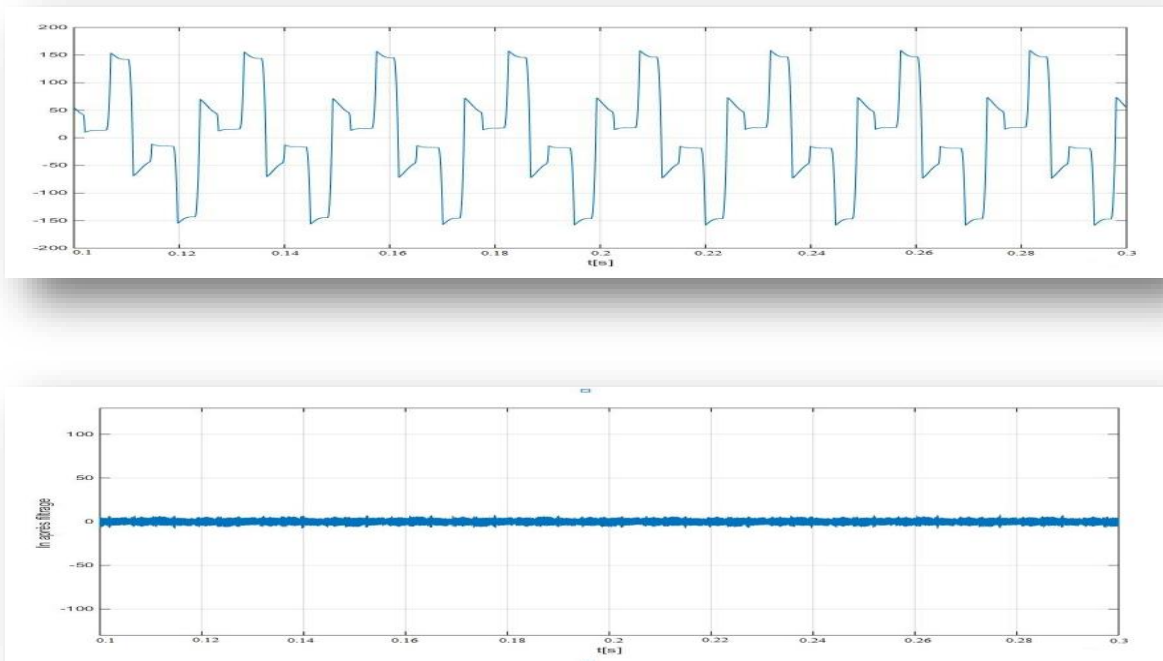
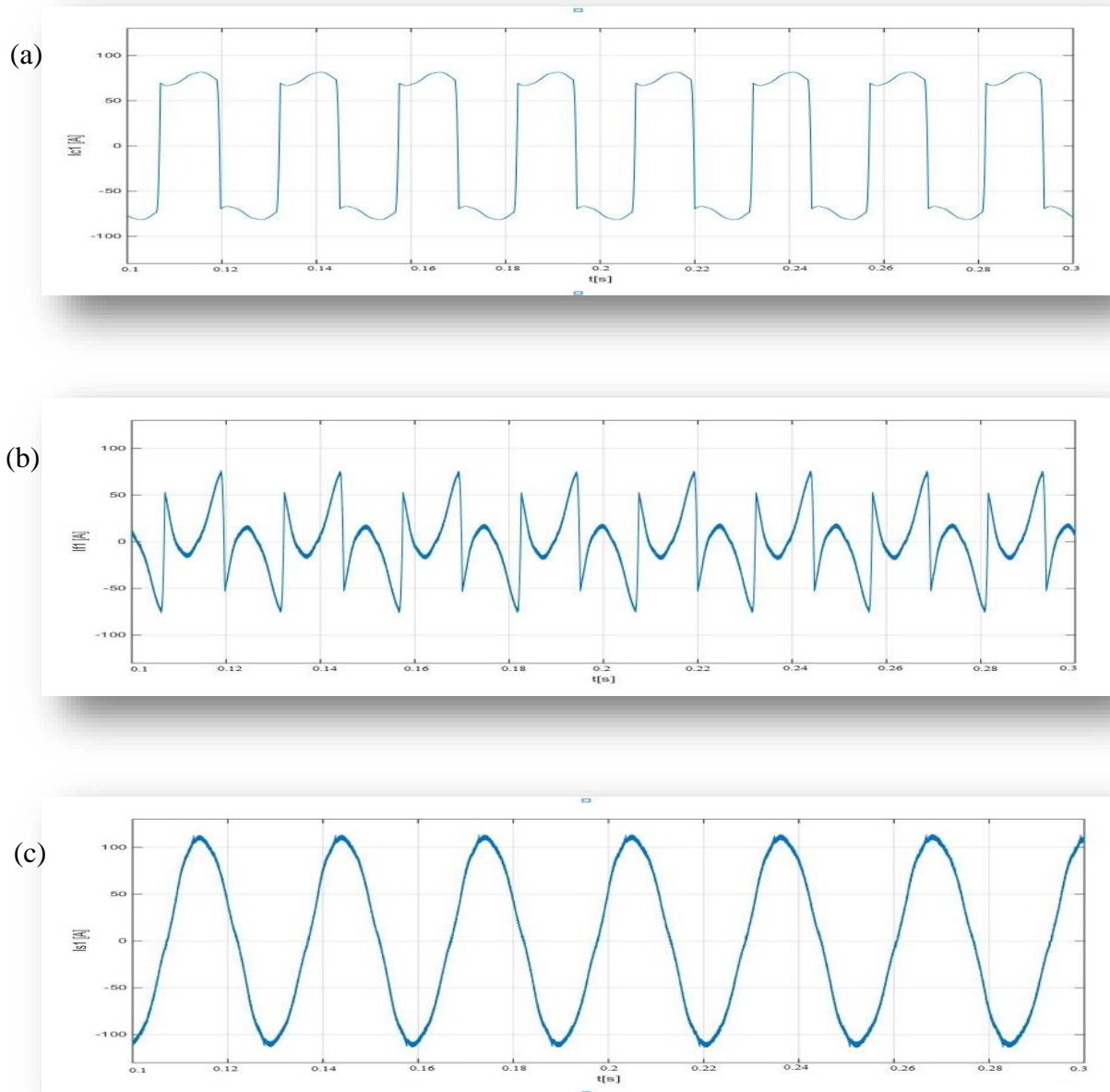


Figure III.28 : Courant du neutre avant et après filtrage.

### III.3.2.1.2 Méthode des puissances instantanées modifié p-q-o

La figure suivante présente les caractéristiques courant de la première phase :



**Figure III.29 : Caractéristiques de courant de la 1<sup>ère</sup> phase.**

**(a) : Courant de charge ; (b) : Courant de filtre ; (c) : Courant de source.**



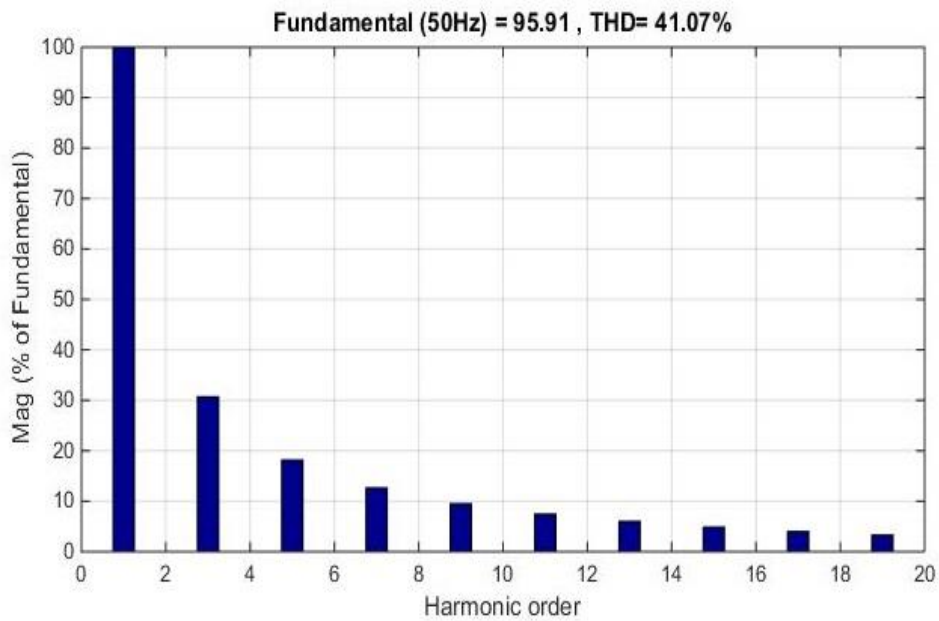


Figure III.30 : FFT du courant de charge.

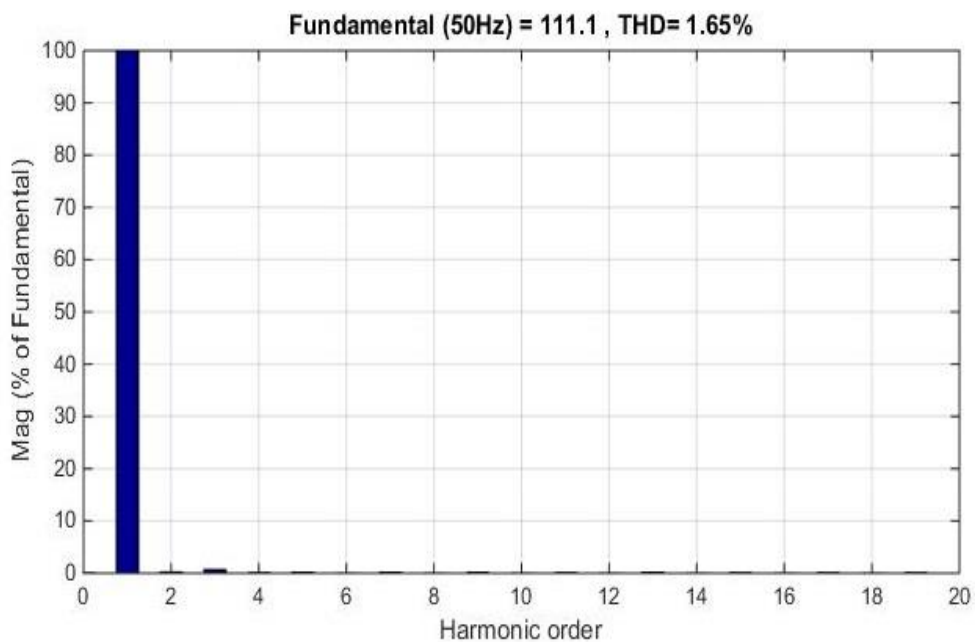
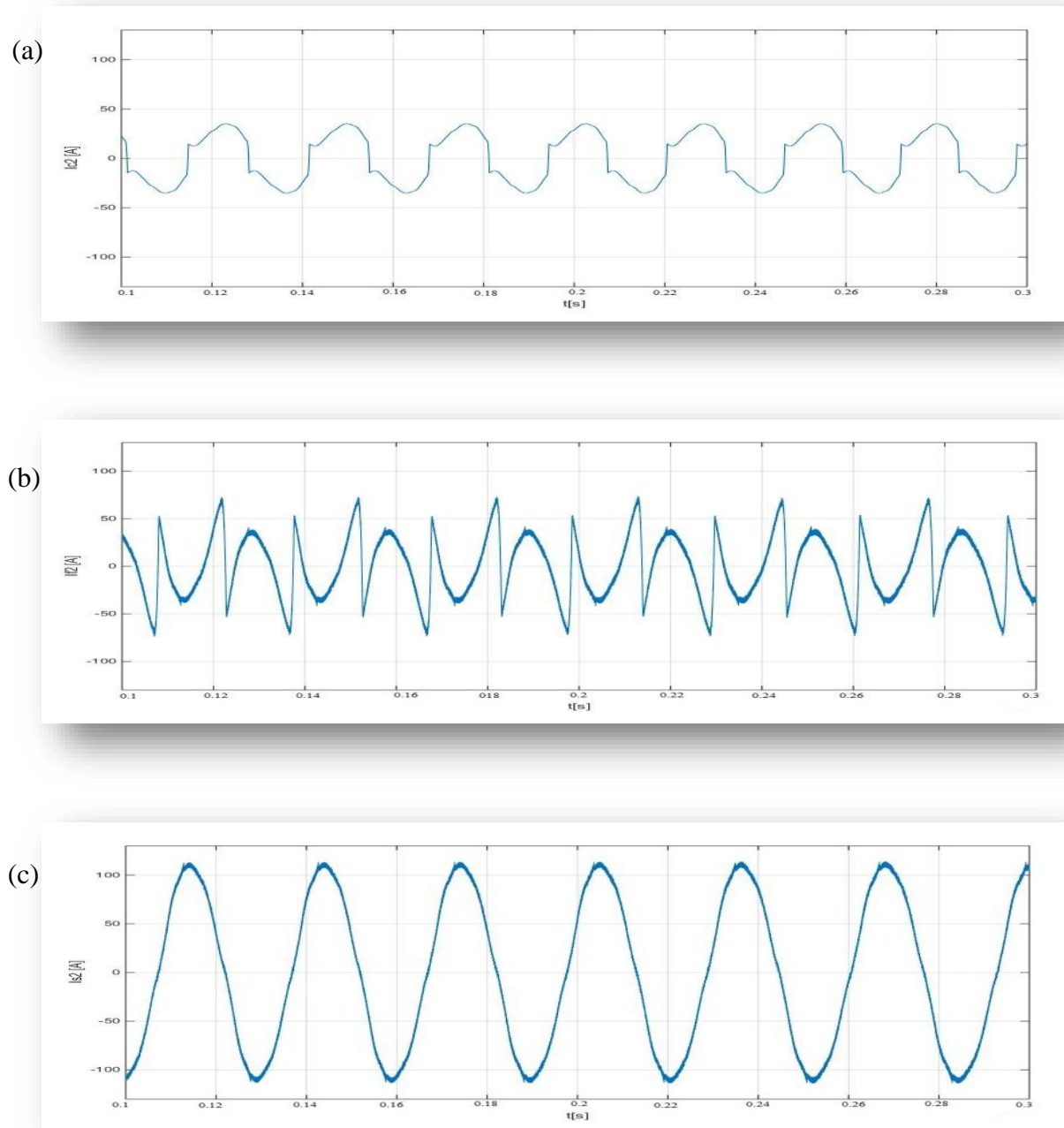


Figure III.31 : FFT du courant de source.

La figure (III-29) nous montre que le filtre a éliminer les perturbations dans la première phase et ça se confirme en observant les THD de chaque courant présentés dans les figure (III-30) et (III-31) ci-dessus.

Les caractéristiques courant de la deuxième phase sont illustré dans la figure suivante :



**Figure III.32 : Caractéristiques courant de la 2<sup>ème</sup> phase**

**(a) : Courant de charge ; (b) : Courant de filtre ; (c) : Courant de source.**

Dans la deuxième phase les perturbations ont été éliminé, c'est ce qu'on a remarquer de la figure (III-32) et ça se confirme en observant les THD de chaque courant présentés dans les figure (III-33) et (III-34) ci-dessous.

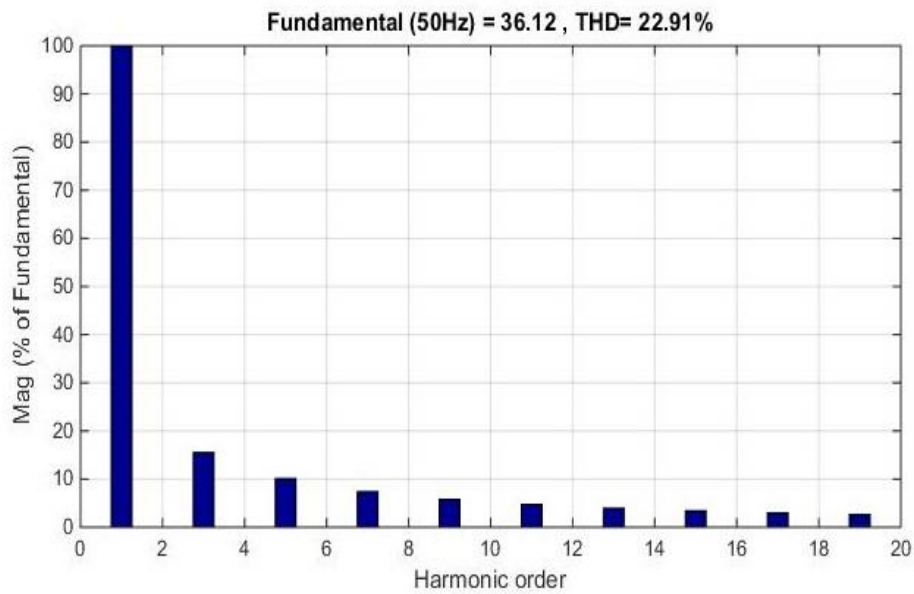


Figure III.33 : FFT du courant de charge.

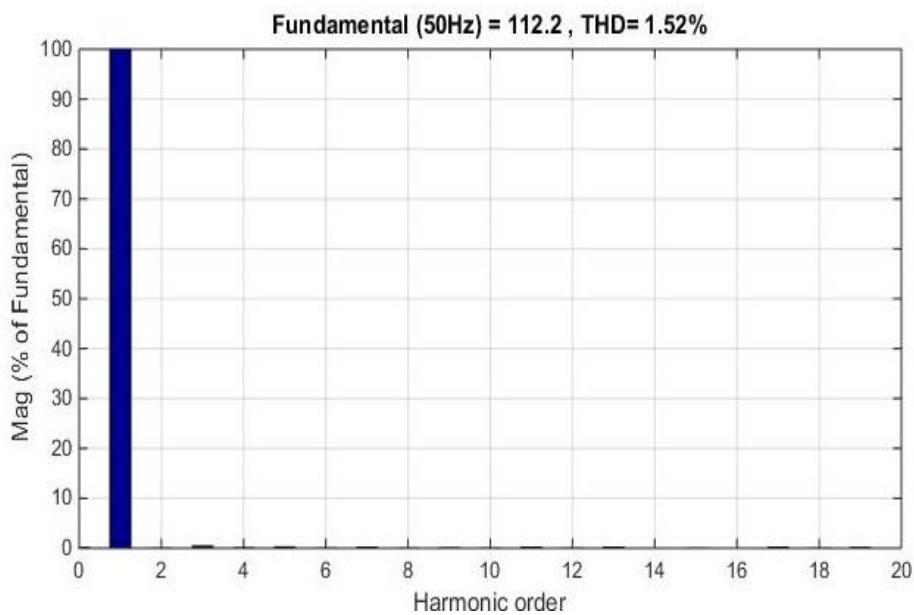
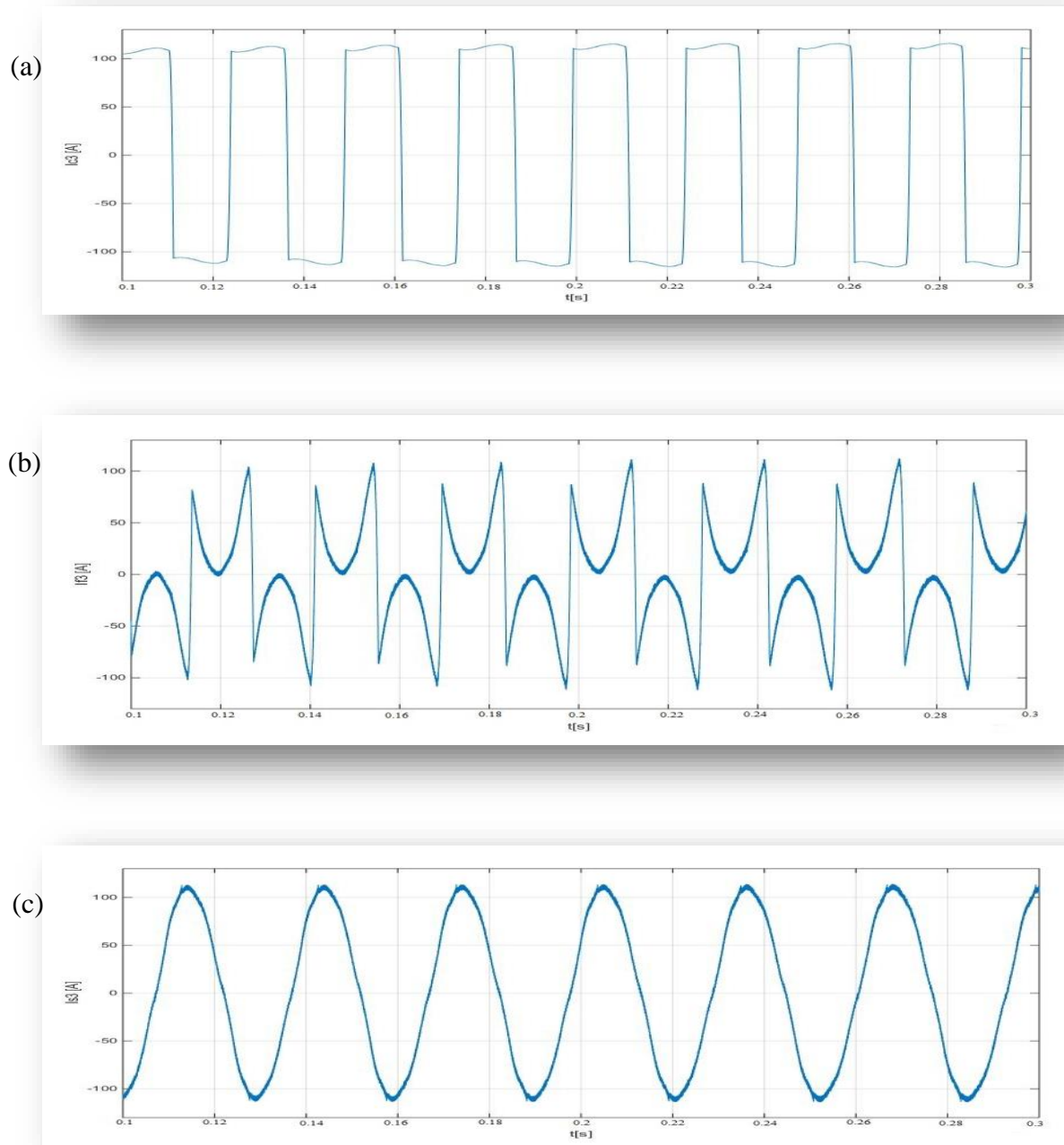


Figure III.34 : FFT du courant de source.

Pour la troisième phase , les caractéristiques sont illustré comme suit :



**Figure III.35 : Caractéristiques courant de la 3<sup>ème</sup> phase**

**(a): Courant de charge ;(b) : Courant de filtre ; (c) : Courant de source.**

Notre filtre actif de puissance a éliminer les perturbations dans la troisième phase de façon que le courant de source est sinusoïdale, les THD des courant de charge et de source sont les suivants :

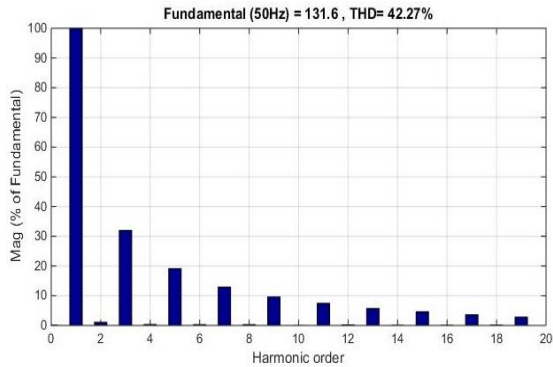


Figure III.36 : FFT du courant de charge.

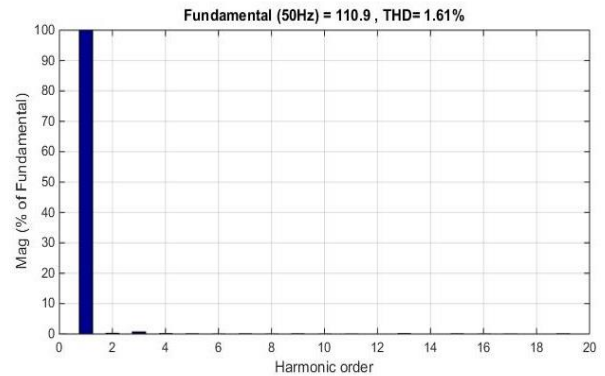


Figure III.37 : FFT du courant de source.

Le courant du neutre est visualisé avant et après filtrage :

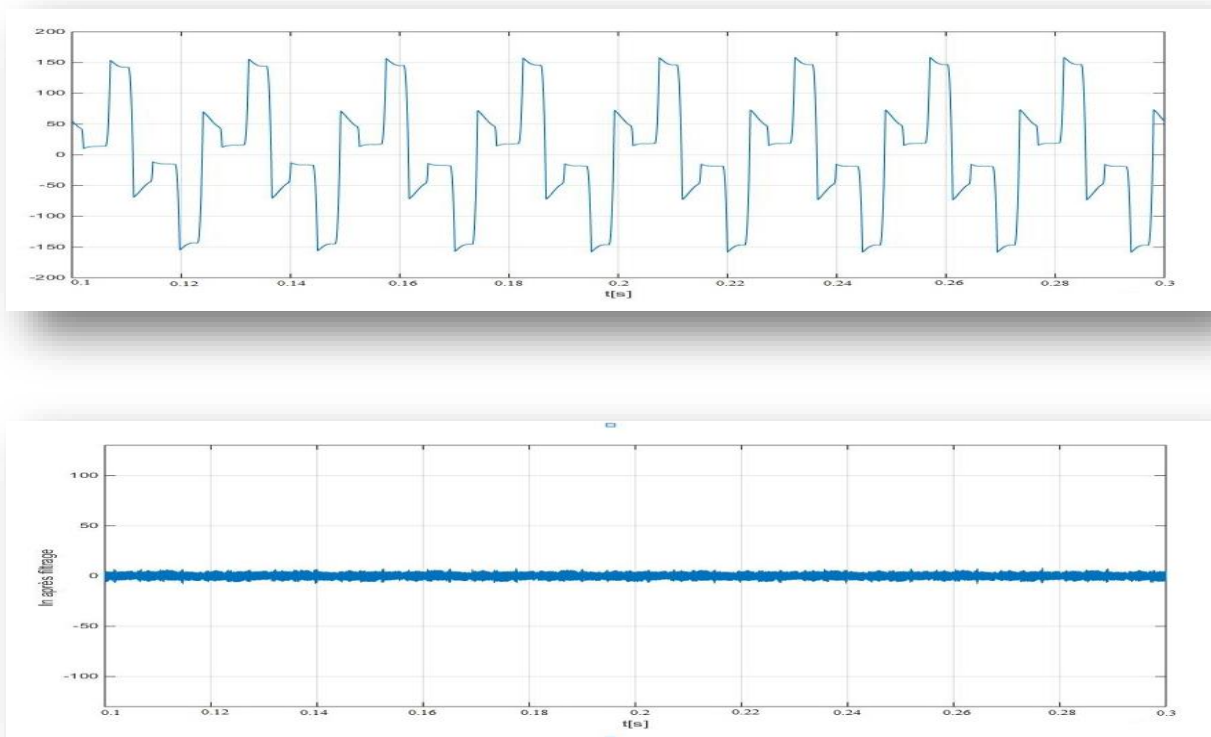
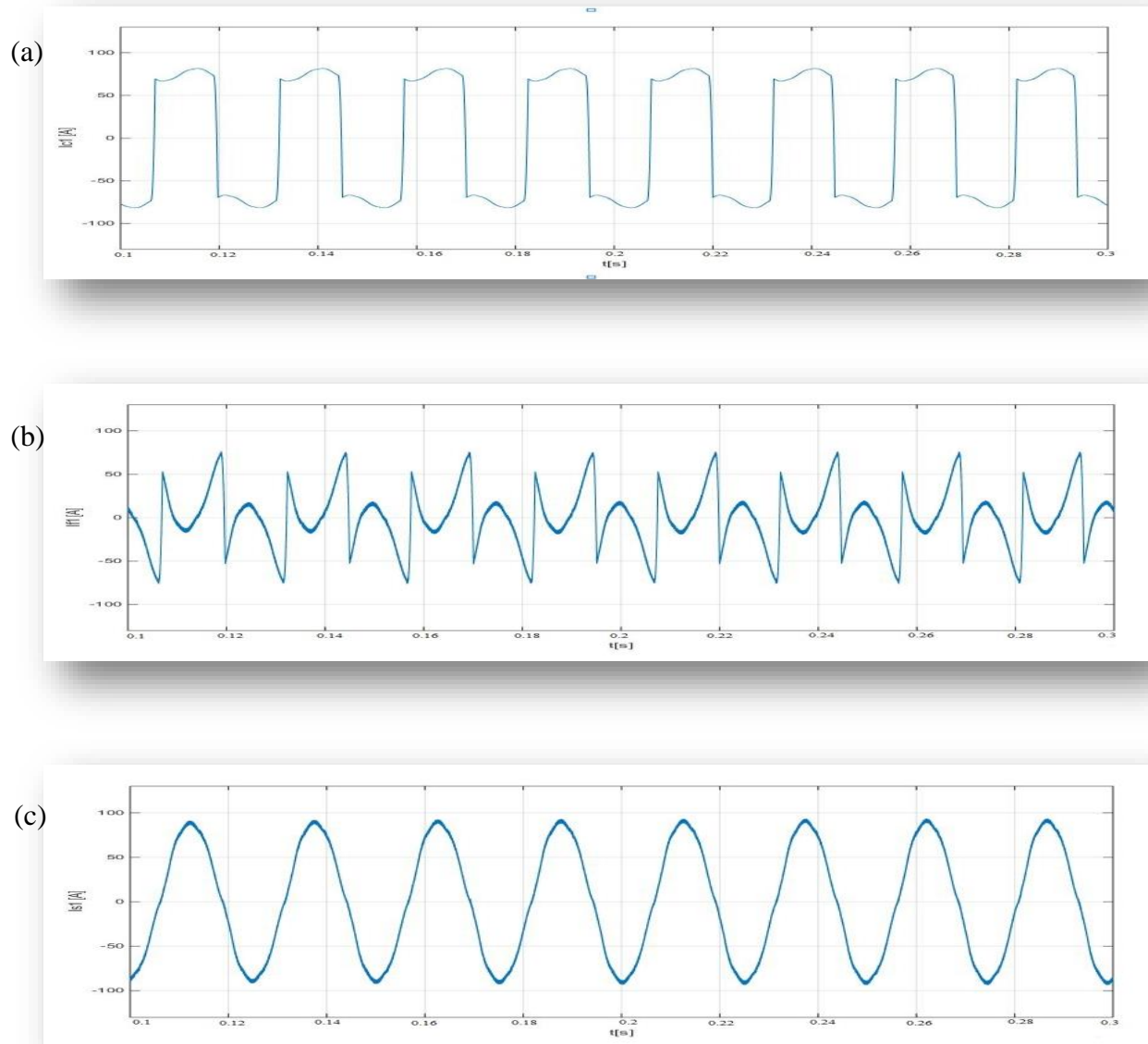


Figure III.38 : Courant du neutre avant et après filtrage.

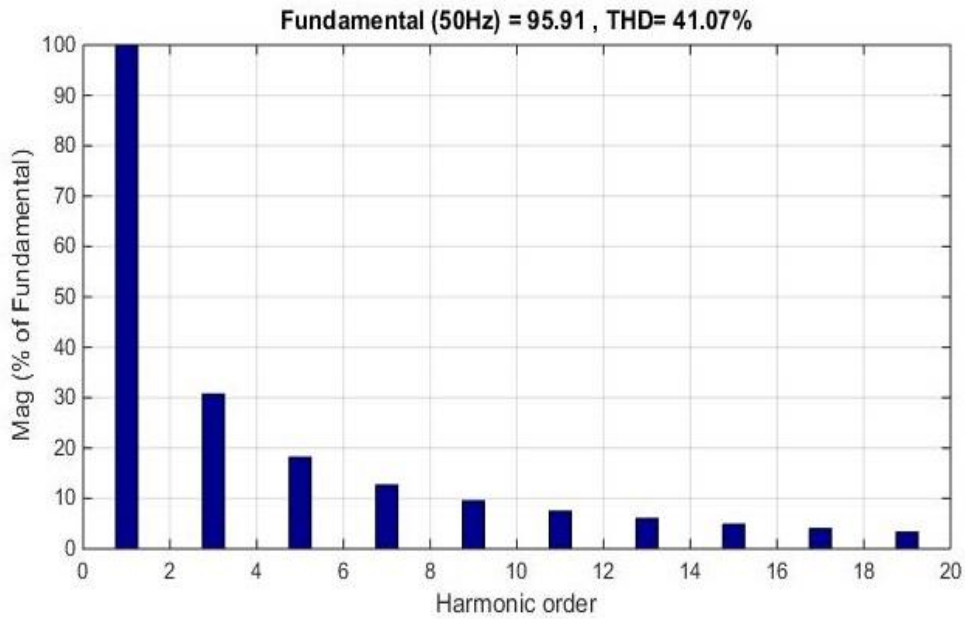
### III.3.2.1.3 La méthode p-q avec FMVs

La figure suivante présente les caractéristiques courant de la première phase :

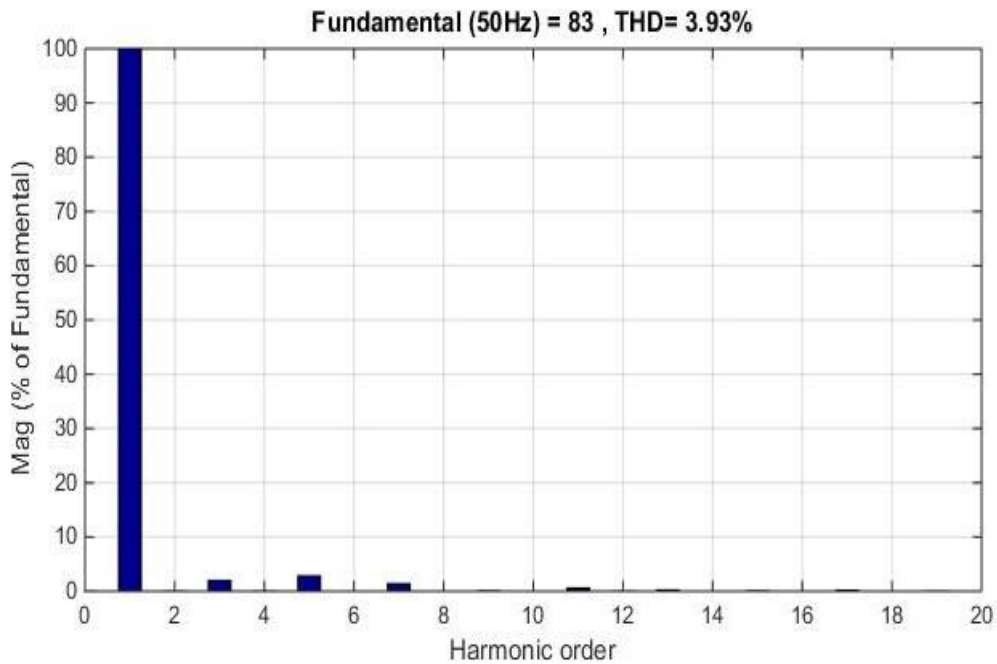


**Figure III.39 : Caractéristiques de courant de la 1<sup>ère</sup> phase**  
(a) : Courant de charge ;(b) : Courant de filtre ;(c) : Courant de source.

Dans cette première phase les perturbations ont été éliminées , c'est ce qu'on a remarquer de la figure (III-39) et ça se confirme en observant les THD de chaque courant présentés dans les figure (III-40) et (III-41) au suivant :

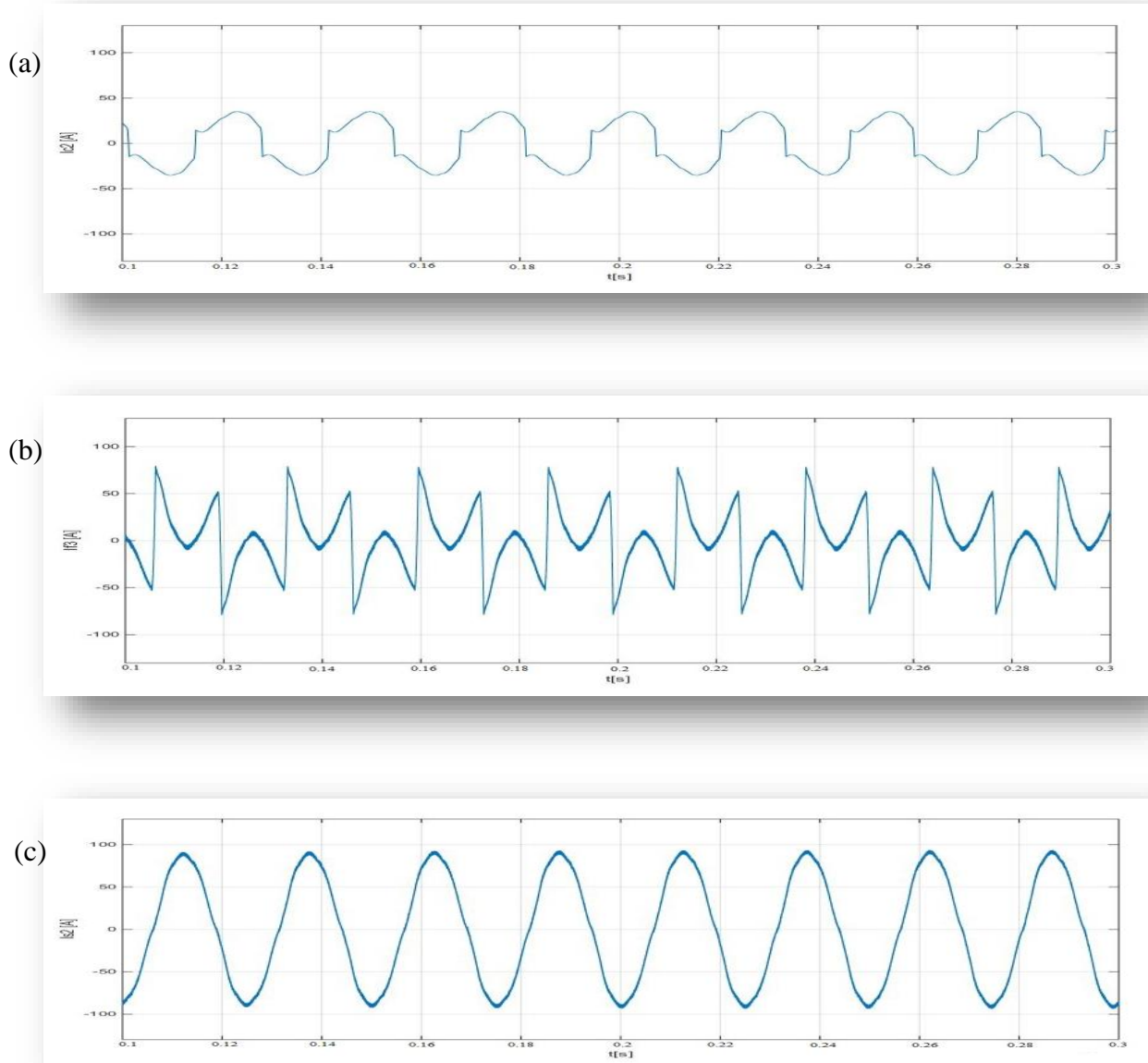


*Figure III.40 : FFT du courant de charge.*



*Figure III.41 : FFT du courant de source.*

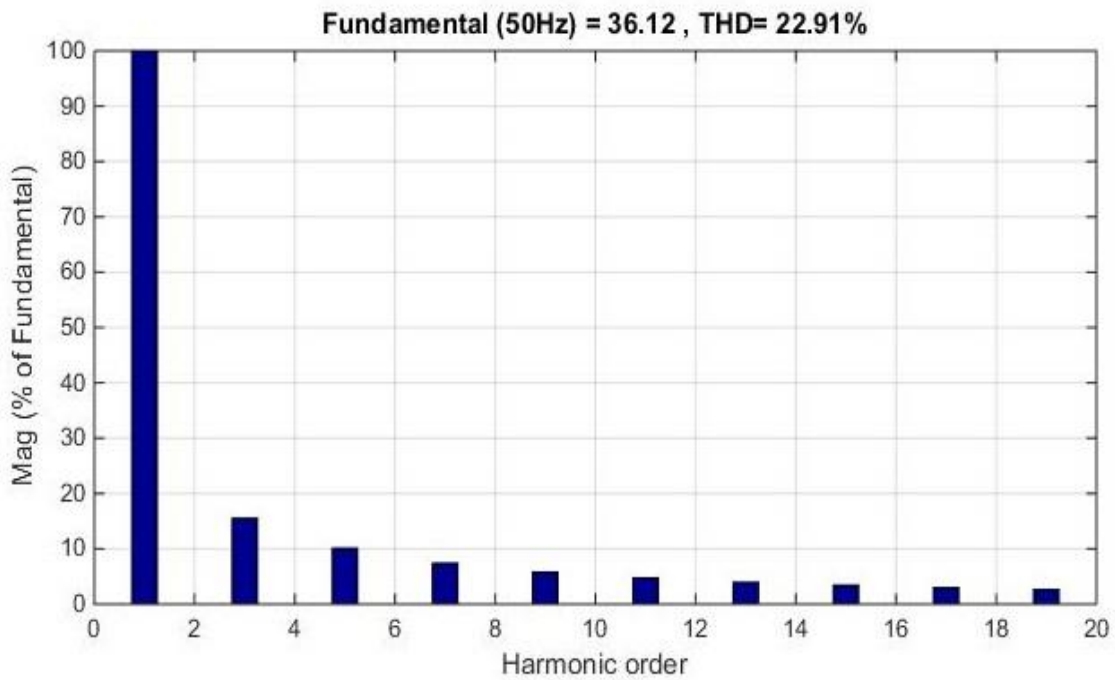
Les caractéristiques courant de la deuxième phase sont illustré dans la figure suivante :



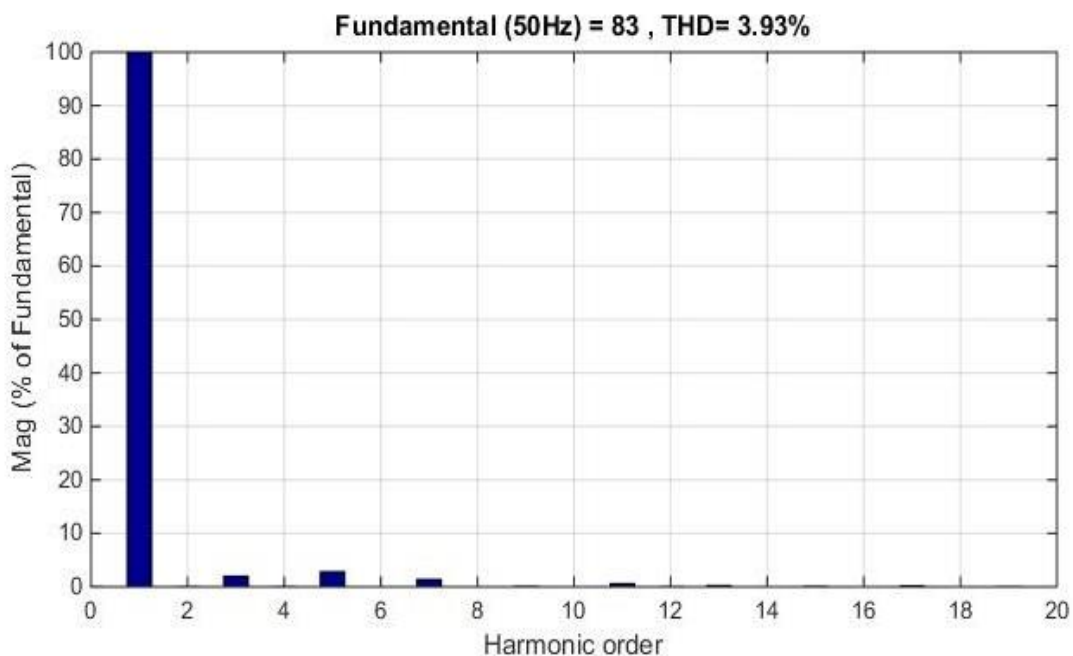
**Figure III.42 : Caractéristiques courant de la 2<sup>ème</sup> phase**

**(a) : Courant de charge ; (b) : Courant de filtre ; (c) : Courant de source.**





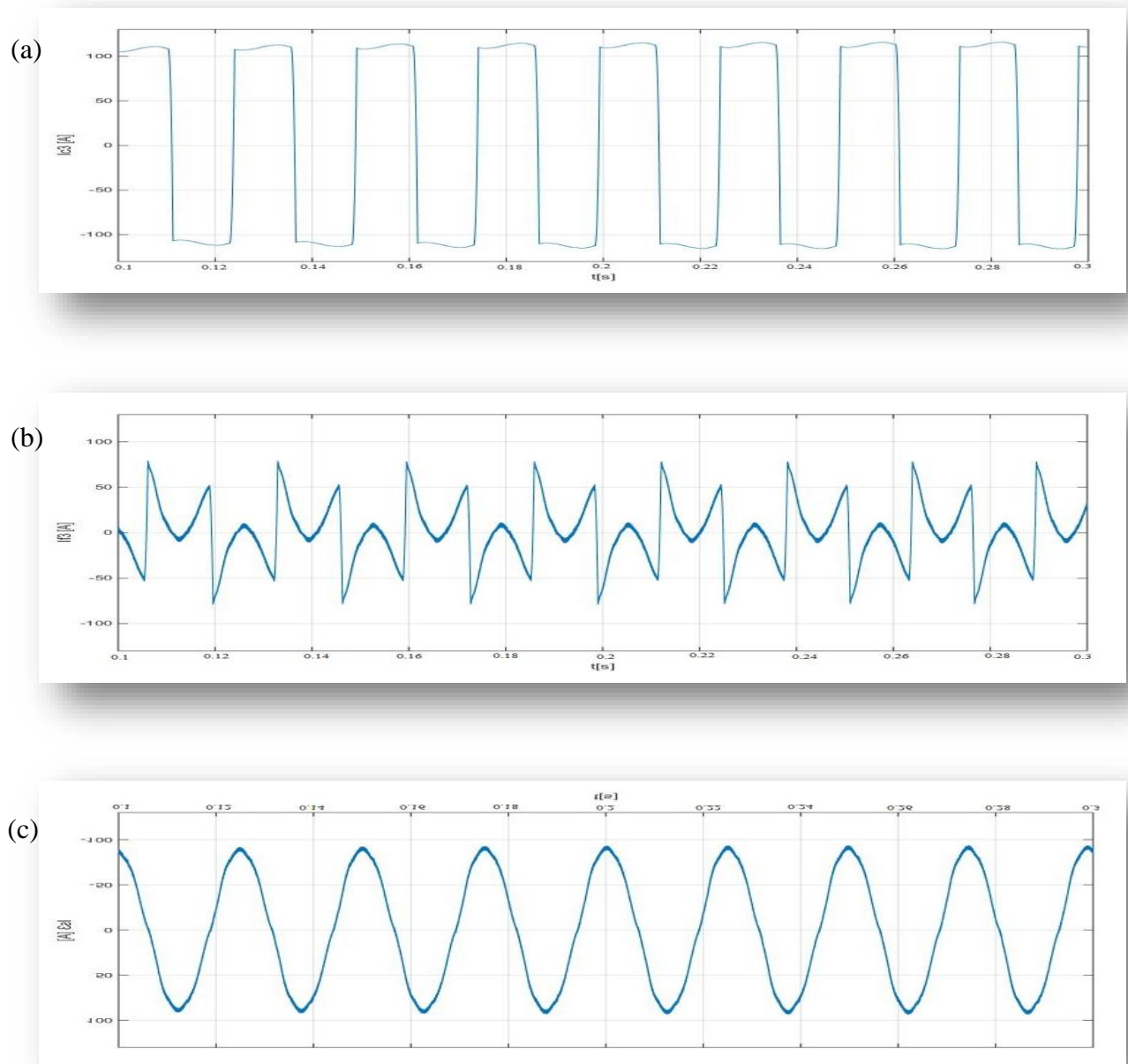
**Figure III.43 : FFT du courant de charge.**



**Figure III.44 : FFT du courant de source.**

Dans la deuxième phase les perturbations ont été éliminées, c'est ce qu'on a remarqué de la figure (III-42) et ça se confirme en observant les THD de chaque courant présentés dans les figures (III-43) et (III-44) ci-dessus.

Pour la troisième phase , les caractéristiques sont illustré comme suit :



**Figure III.45 : Caractéristiques courant de la 3<sup>ème</sup> phase**

**(a) : Courant de charge ; (b) : Courant de filtre ; (c) : Courant de source.**

Notre filtre actif de puissance a éliminer les perturbations dans la troisième phase de façon que le courant de source est sinusoïdale, les THD des courant de charge et de source sont les suivants :

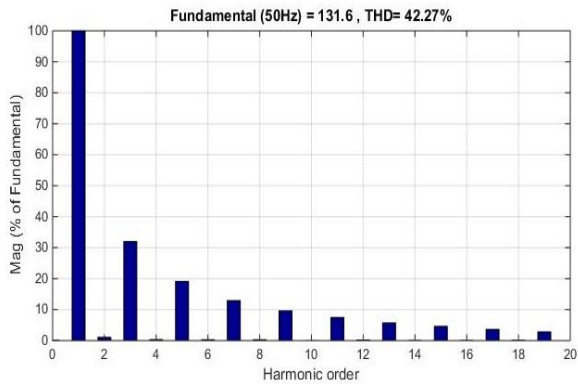


Figure III.46 : FFT du courant de charge.

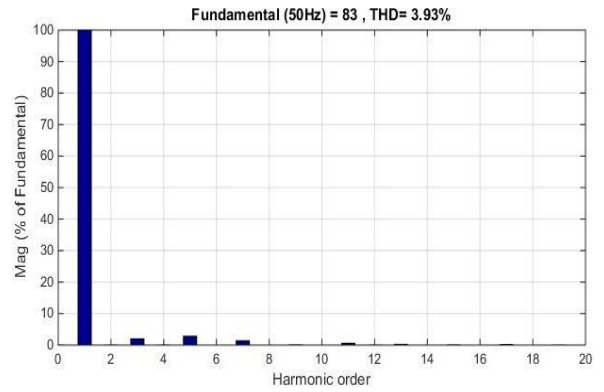


Figure III.47 : FFT du courant de source.

Le courant du neutre est visualisé avant et après filtrage :

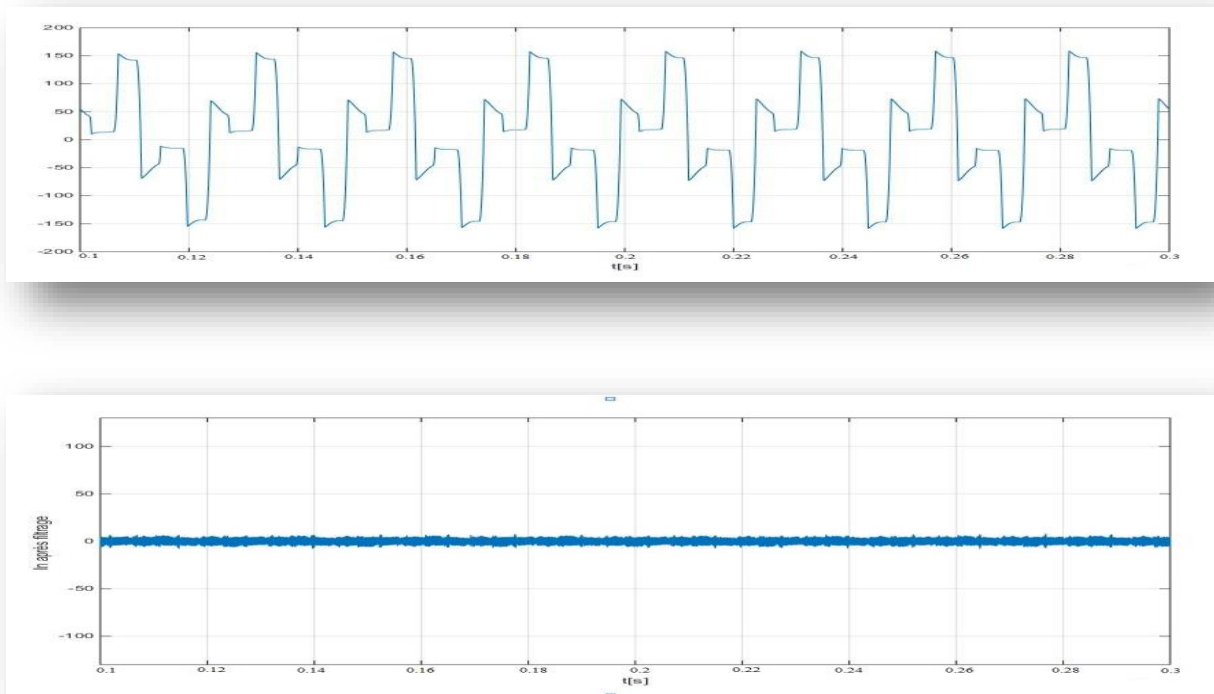


Figure III.48 : Courant du neutre avant et après filtrage.

### III.3.2.2 Défaut monophasé en phase 3

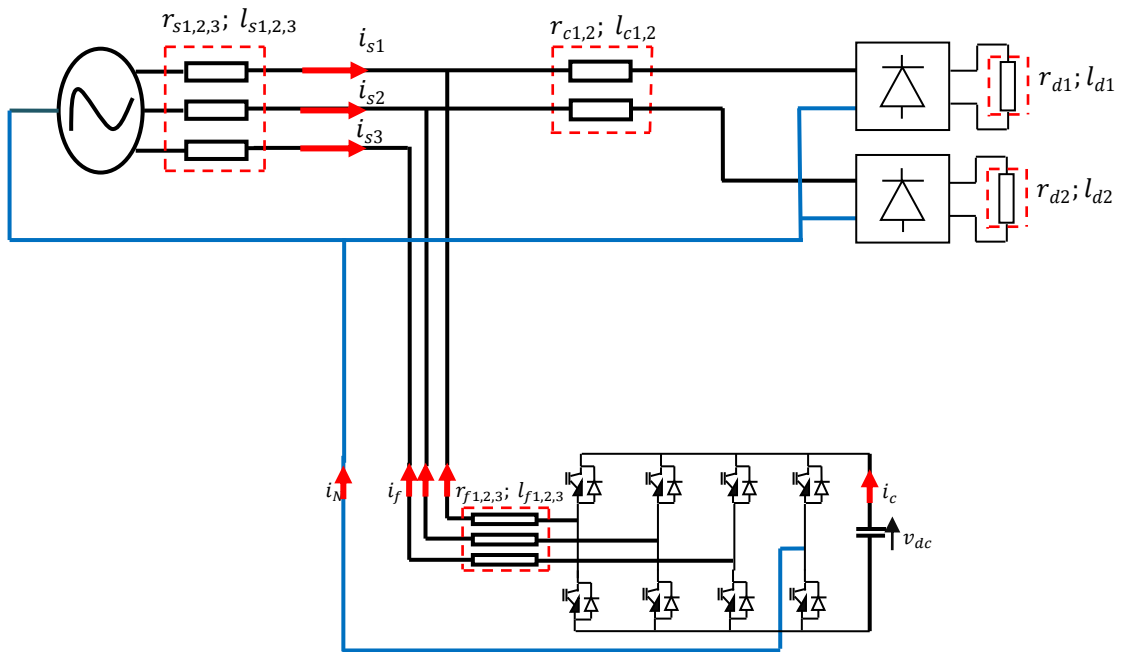


Figure III.49 : Modèle de simulation du système avec défaut monophasé.

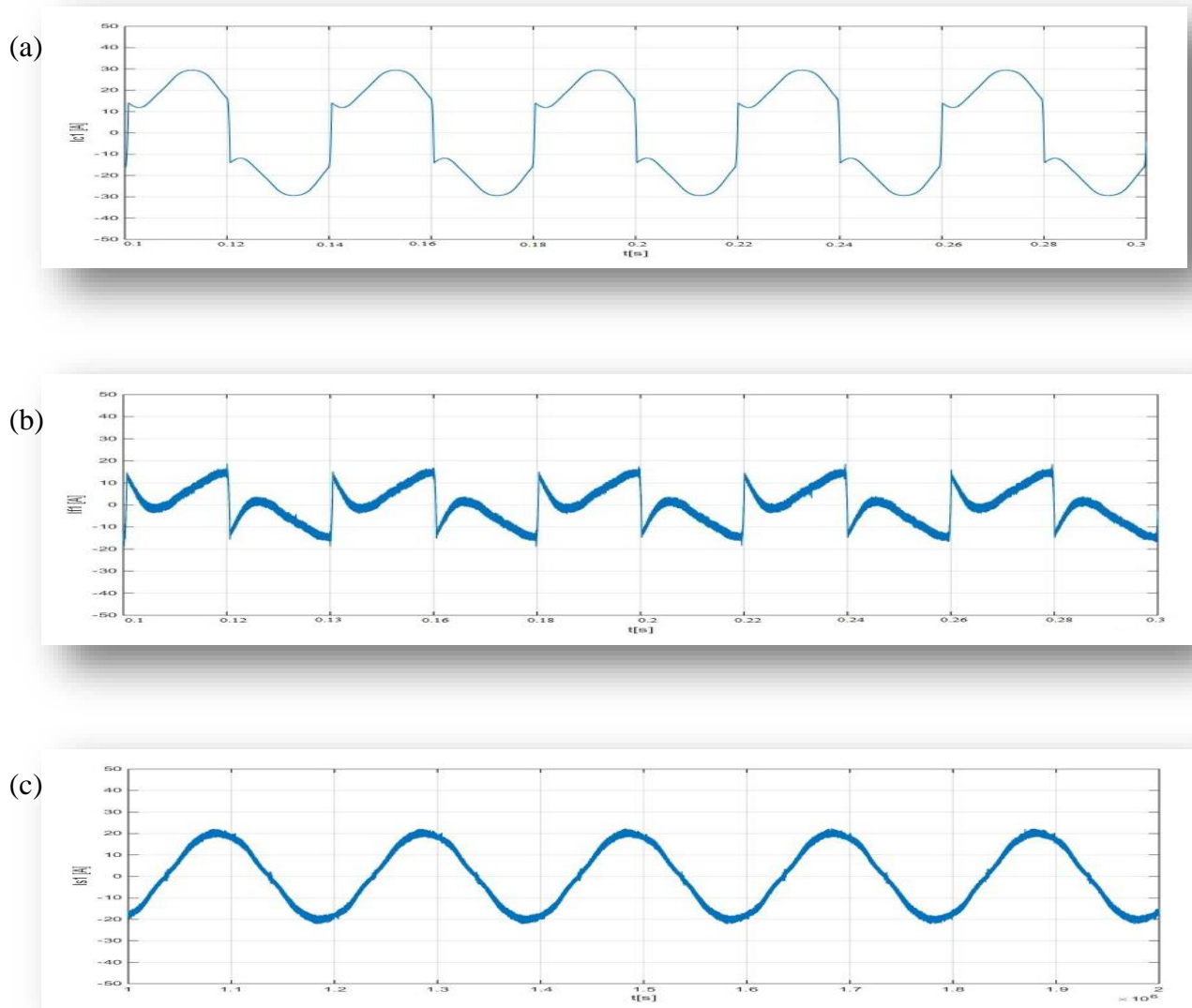
Pour ce mode de régime on a utilisés les paramètres qui sont définis dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.4 : Paramètres de simulation dans le cas de défaut monophasé.

$V_{seff}$ [V]	$f$ [Hz]	$r_s$ [mΩ]	$l_s$ [μH]	$r_c$ [mΩ]
240	50	3.63	14.12	11.95
$l_c$ [μH]	$r_{d1}$ [Ω]	$l_{d1}$ [mH]	$r_{d3}$ [Ω]	$l_{d3}$ [mH]
102.71	7	15	7	15

### III.3.2.2.1 La méthode de théorie p-q-r

Les courants de la 1<sup>ère</sup> phase sont les suivants :



**Figure III.50 : Caractéristiques de courant de la 1<sup>ère</sup> phase**  
 (a) : Courant de charge ; (b) : Courant de filtre ; (c) : Courant de source.

La FFT du courant  $I_{c1}$  a donnée :

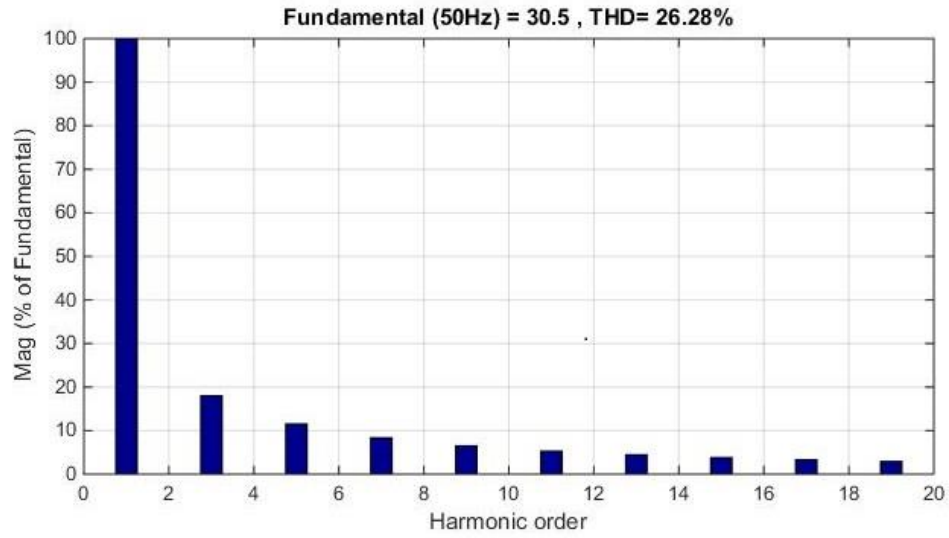


Figure III.51 : FFT du courant de charge.

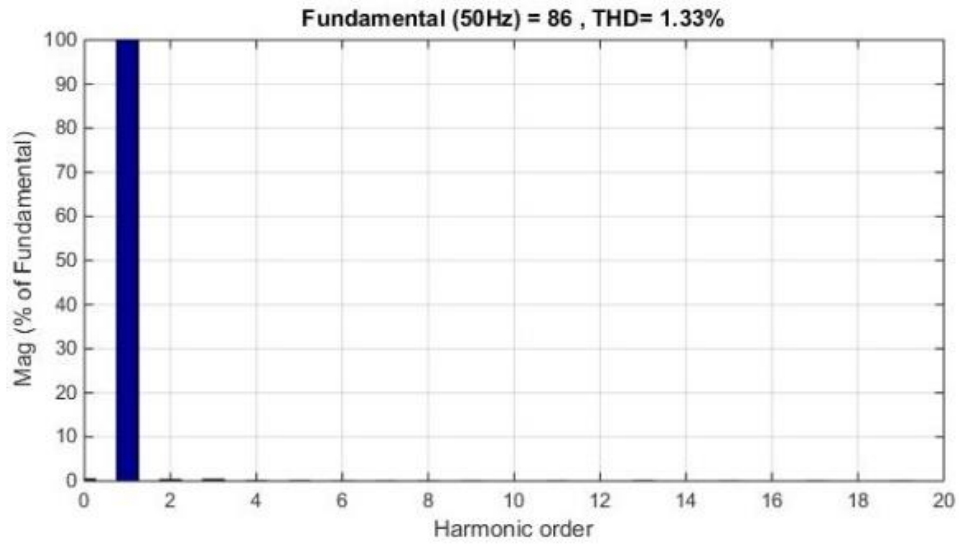
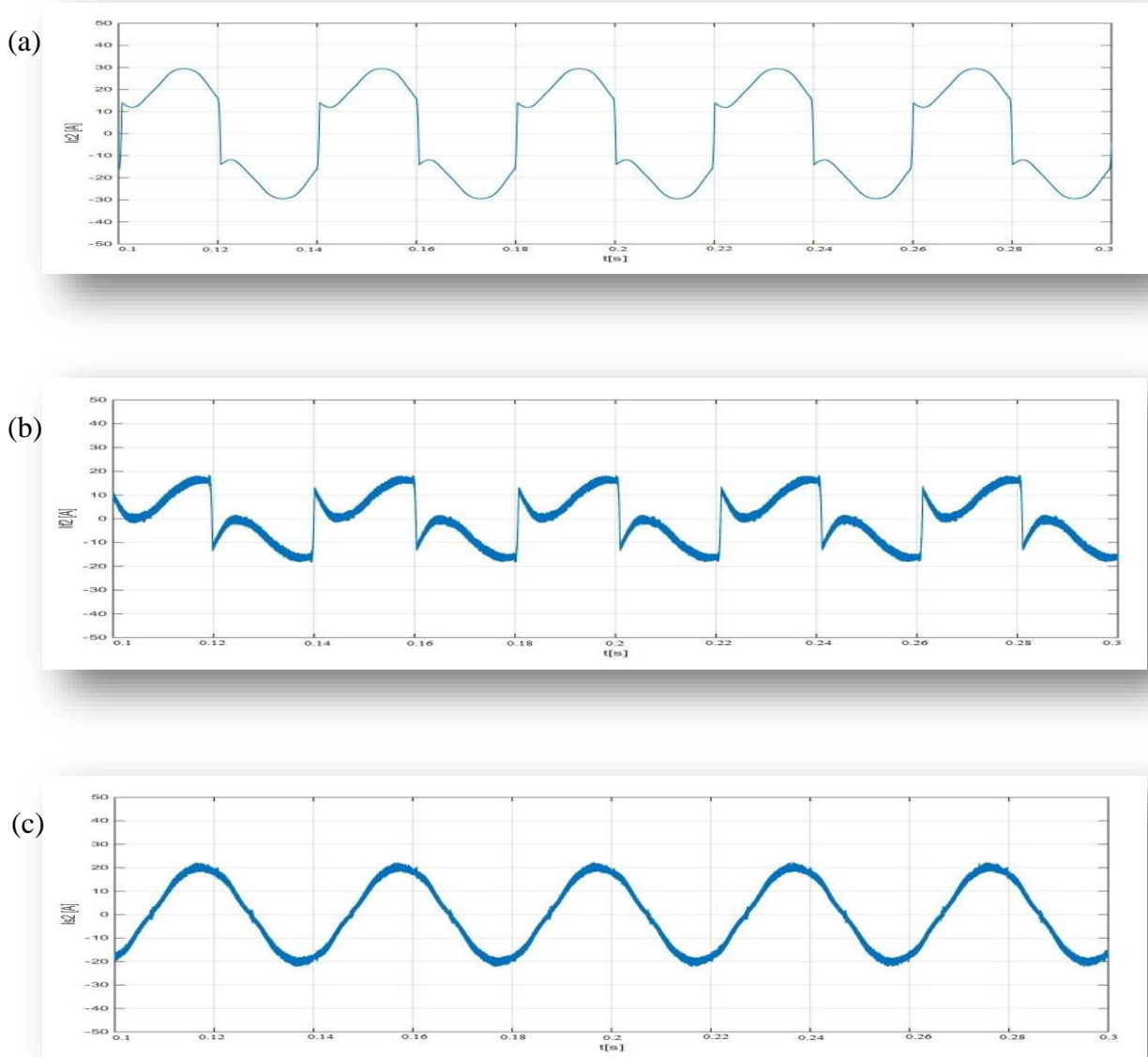


Figure III.52 : FFT du courant de source.

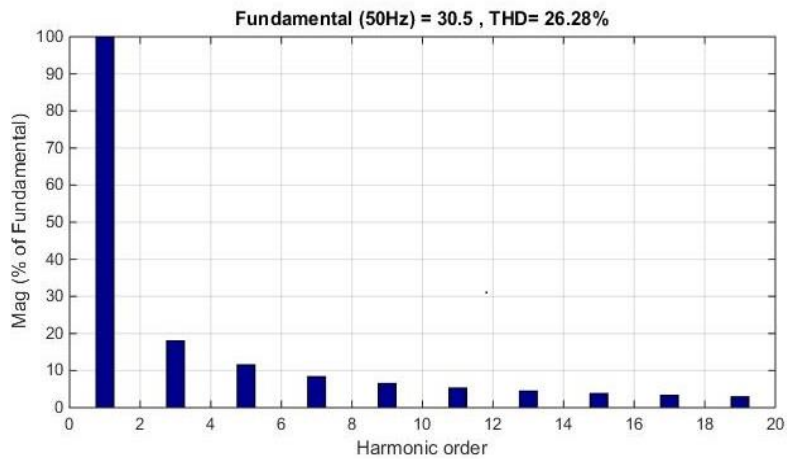
Comme les courants de charges, les courants de source des deux premières phases sont aussi identiques, la figure suivante illustre les courants de la 2<sup>ème</sup> phase :



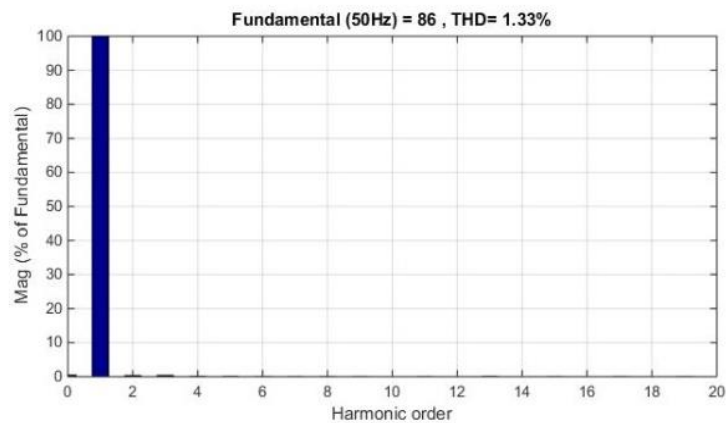
**Figure III-53 : Caractéristiques courant de la phase 2**

**(a) Courant de charge ; (b) : Courant de filtre ; (c) : Courant de source.**

La FFT du courant  $I_{c2}$  a donnée :



*Figure III.54 : FFT du courant de charge.*

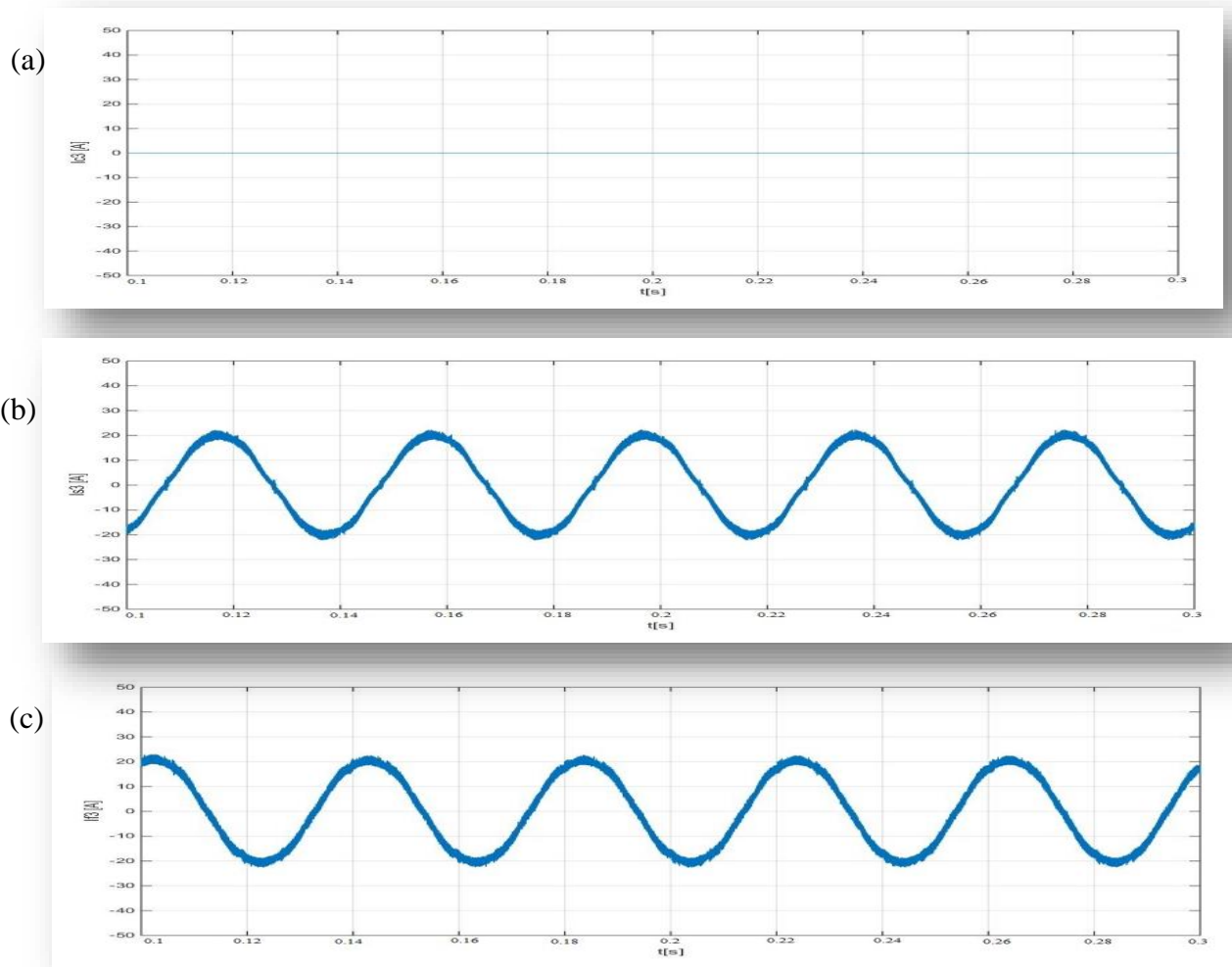


*Figure III.55 : FFT du courant de source.*

Dans la deuxième phase les perturbations ont été éliminées, c'est ce qu'on a remarqué de la figure (III-53) et ça se confirme en observant les THD de chaque courant présenté dans les figures (III-54) et (III-55) ci-dessus.

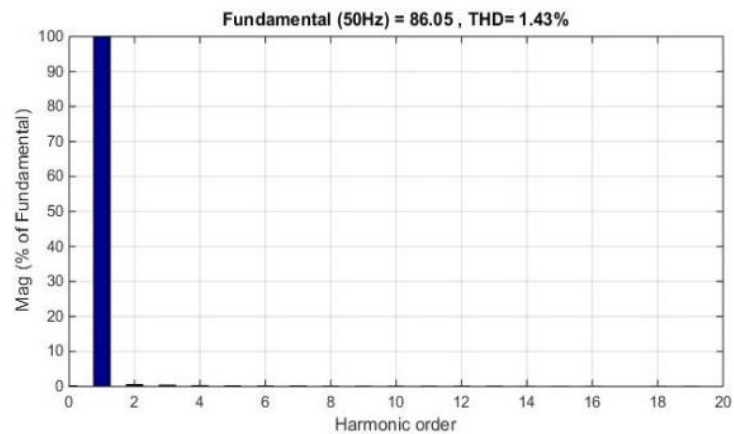


Pour la troisième phase, le courant de charge est nul et est présenté comme suit :



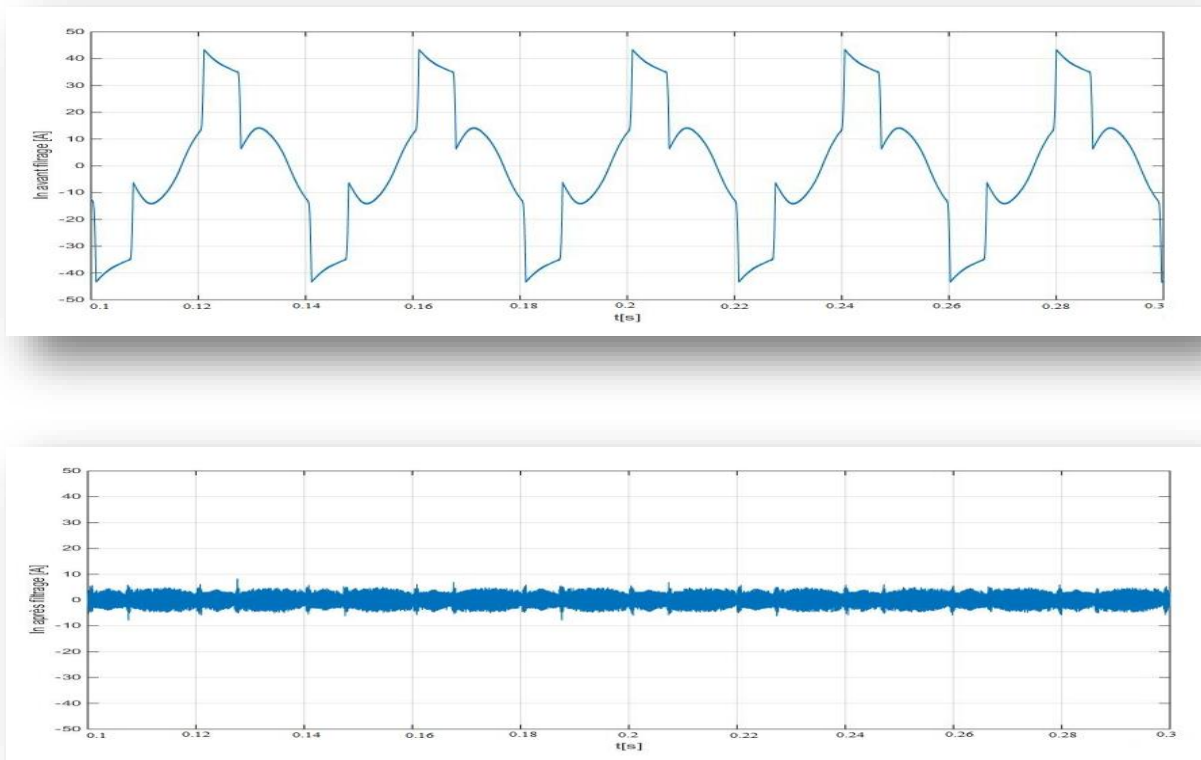
**Figure III-56 : Caractéristiques courants de la 3<sup>ème</sup> phase**  
 (a) : Courant de charge ; (b) : Courant de filtre ; (c) : Courant de source.  
 (b)

La consultation de la FFT du courant de source de la phase 3 a donnée :



**Figure III.57 : FFT du courant de source.**

Le courant du neutre avant et après filtrage est présenté par les figures suivantes :



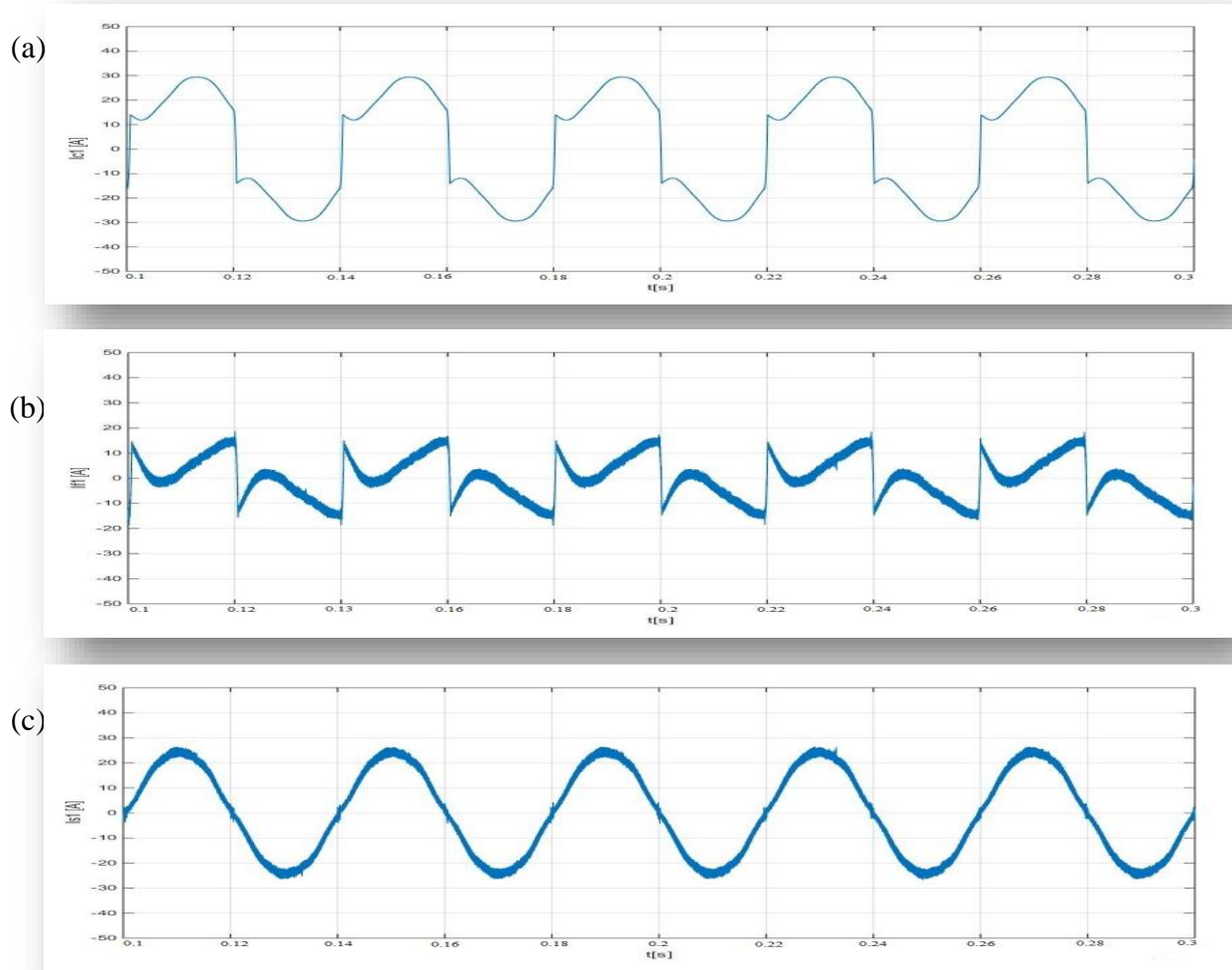
**Figure III.58 : Courant du neutre avant et après filtrage.**

Nous remarquons que les harmoniques de courant ont été compensés pour chacune des phases, même la troisième phase, également le déséquilibre de courant a été nettement atténué.

Ainsi, on constate clairement la compensation de l'énergie réactive.

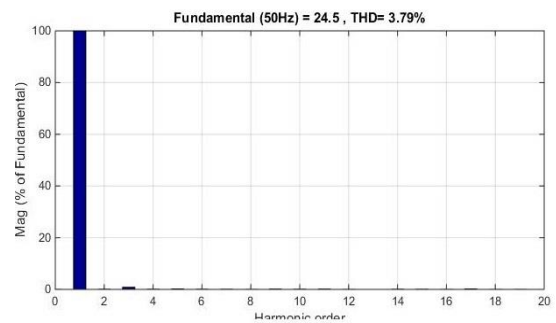
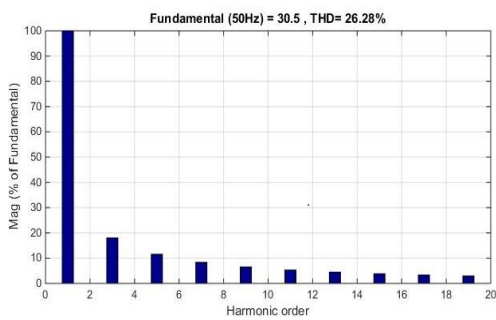
### III.3.2.2.2 Méthode des puissances instantanées modifiée p-q-o

Les courants de la 1<sup>ère</sup> phase sont les suivants :



**Figure III.59 : Caractéristiques de courant de la 1<sup>ère</sup> phase**  
 (a) : Courant de charge ; (b) : Courant de filtre ; (c) : Courant de charge.

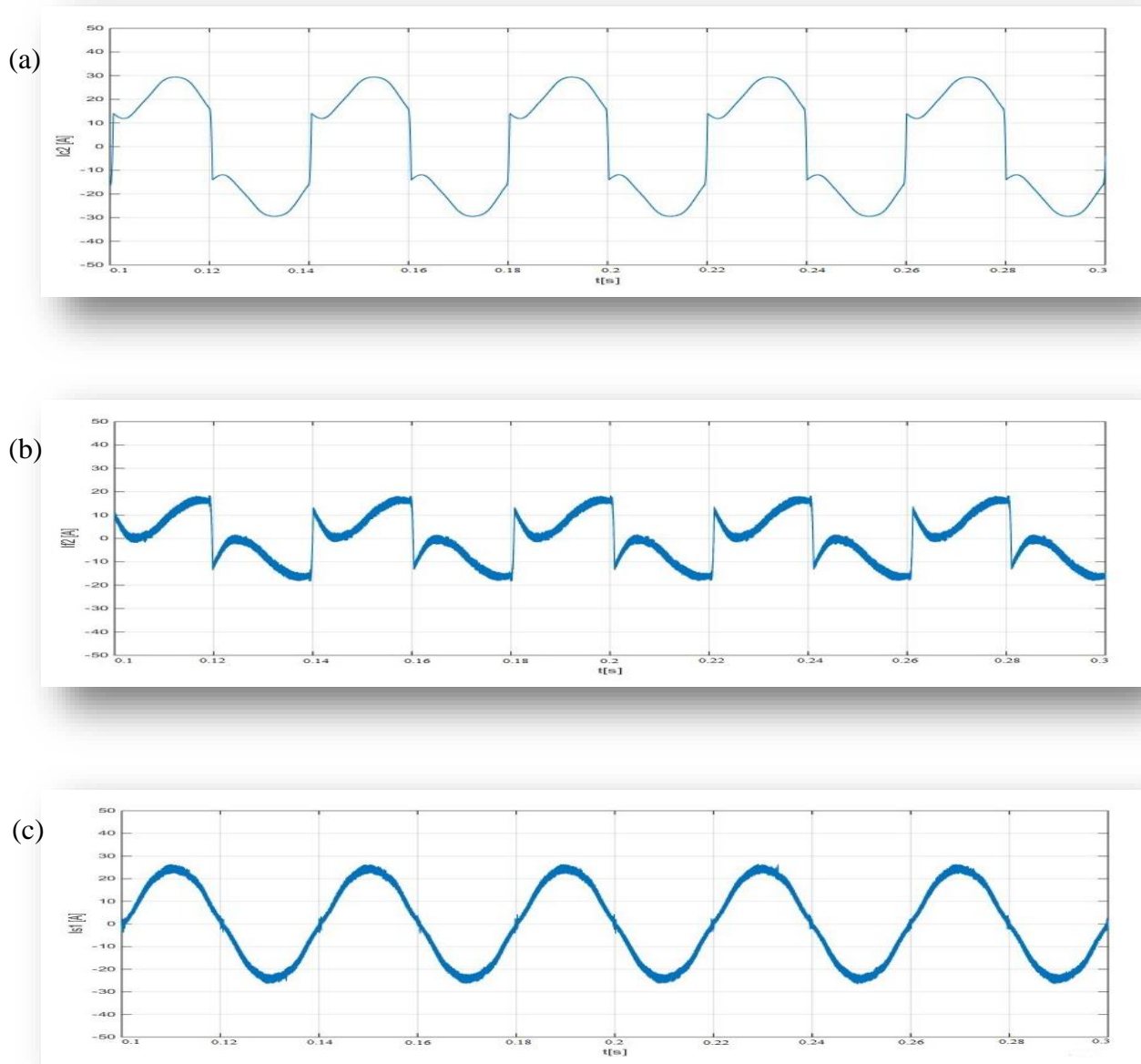
La FFT du courant  $I_{c1}$  a donnée :



**Figure III.60 : FFT du courant de charge.**      **Figure III.61 : FFT du courant de source.**

Dans cette première phase les perturbations ont été éliminées, c'est ce qu'on a remarqué de la figure (III-59) et ça se confirme en observant les THD de chaque courant présenté dans les figures (III-60) et (III-61) ci-avant.

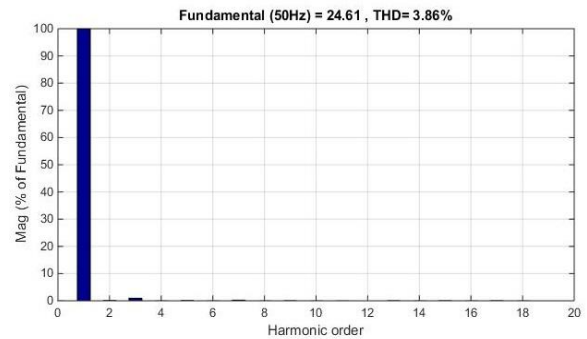
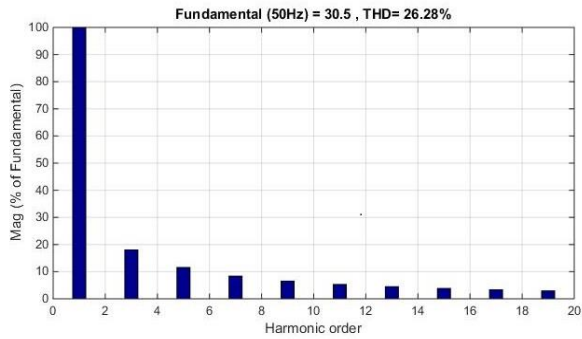
Comme les courants de charges, les courants de source des deux premières phase sont aussi identiques, la figure suivante illustre les courants de la 2<sup>ème</sup> phase :



**Figure III.62 : Caractéristiques courant de la phase 2**

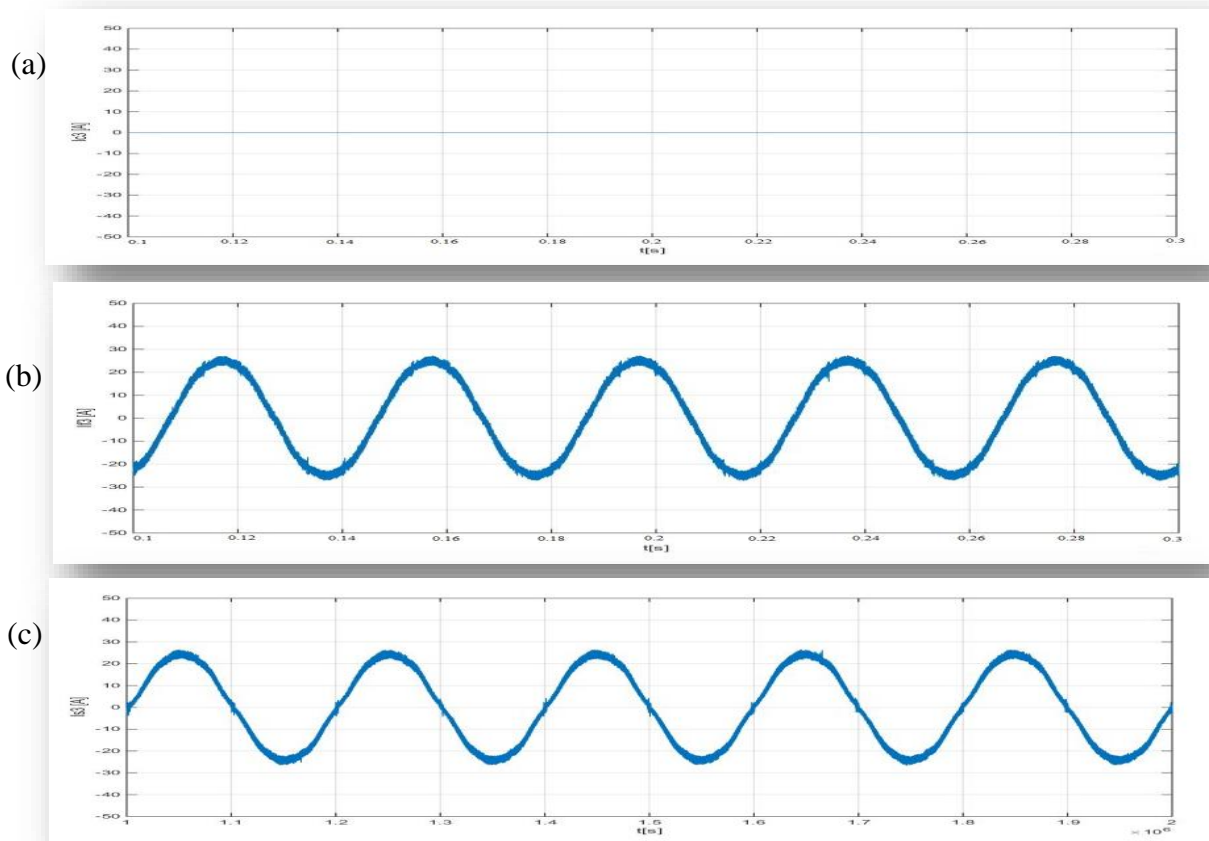
**(a) : Courant de charge ; (b) : Courant de filtre ; (c) : Courant de source.**

Dans la deuxième phase les perturbations ont été éliminées, c'est ce qu'on a remarqué de la figure (III-62) et ça se confirme en observant les THD de chaque courant présentés dans les figure (III-63) et (III-64) ci-après.



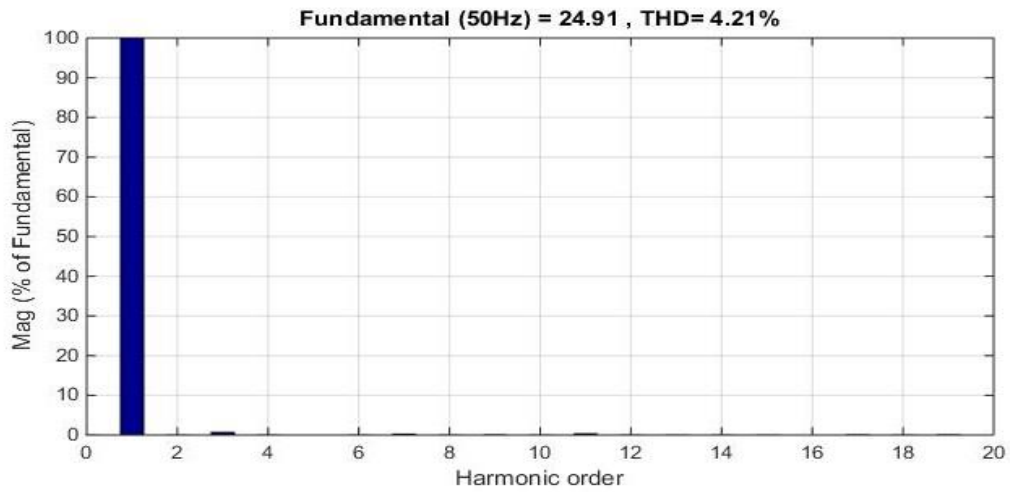
**Figure III.63 : FFT du courant de charge** **Figure III.64 : FFT du courant de source**

Pour la troisième phase, le courant de charge est nul et est présenté comme suit :



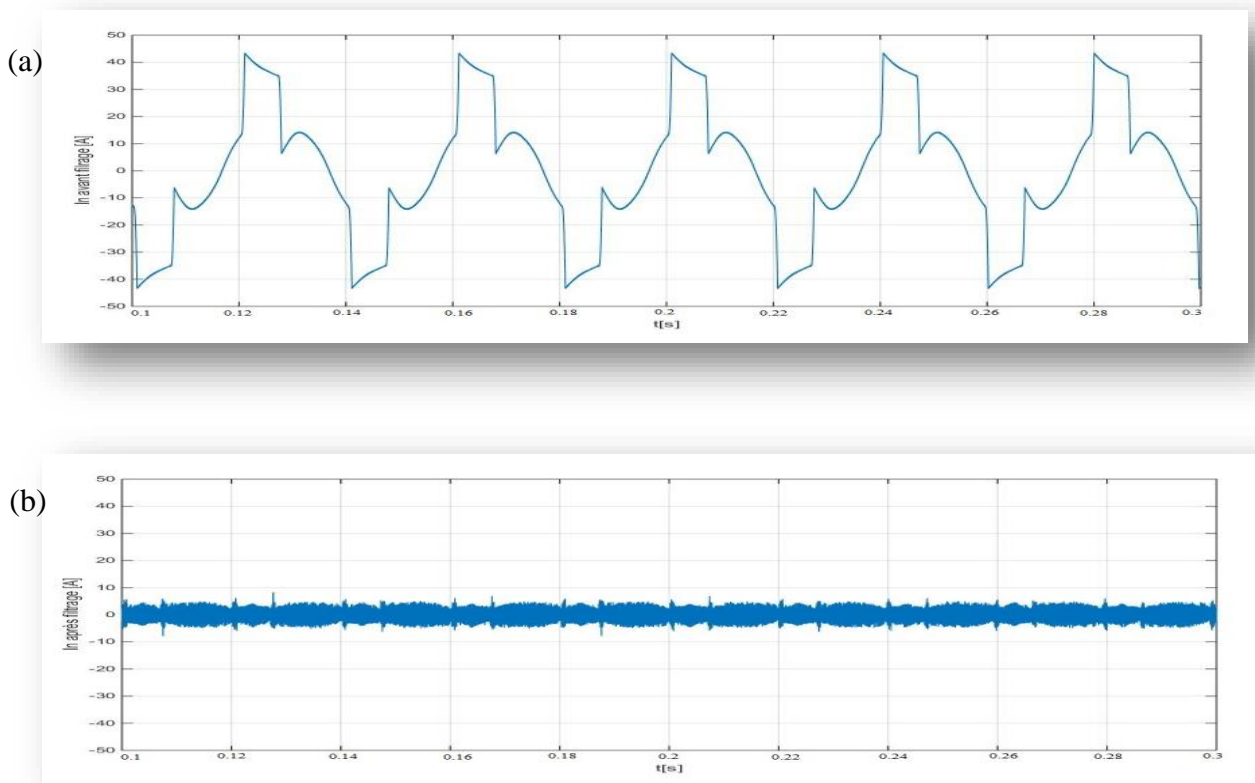
**Figure III.65 : Caractéristiques courants de la 3<sup>ème</sup> phase**  
**(a) : Courant de charge ; (b) : Courant de filtre ; (c) : Courant de source.**

La consultation de la FFT du courant de source de la phase 3 a donnée :



*Figure III.66 : FFT du courant de source.*

Le courant du neutre avant et après filtrage est présenté par les figures suivantes :

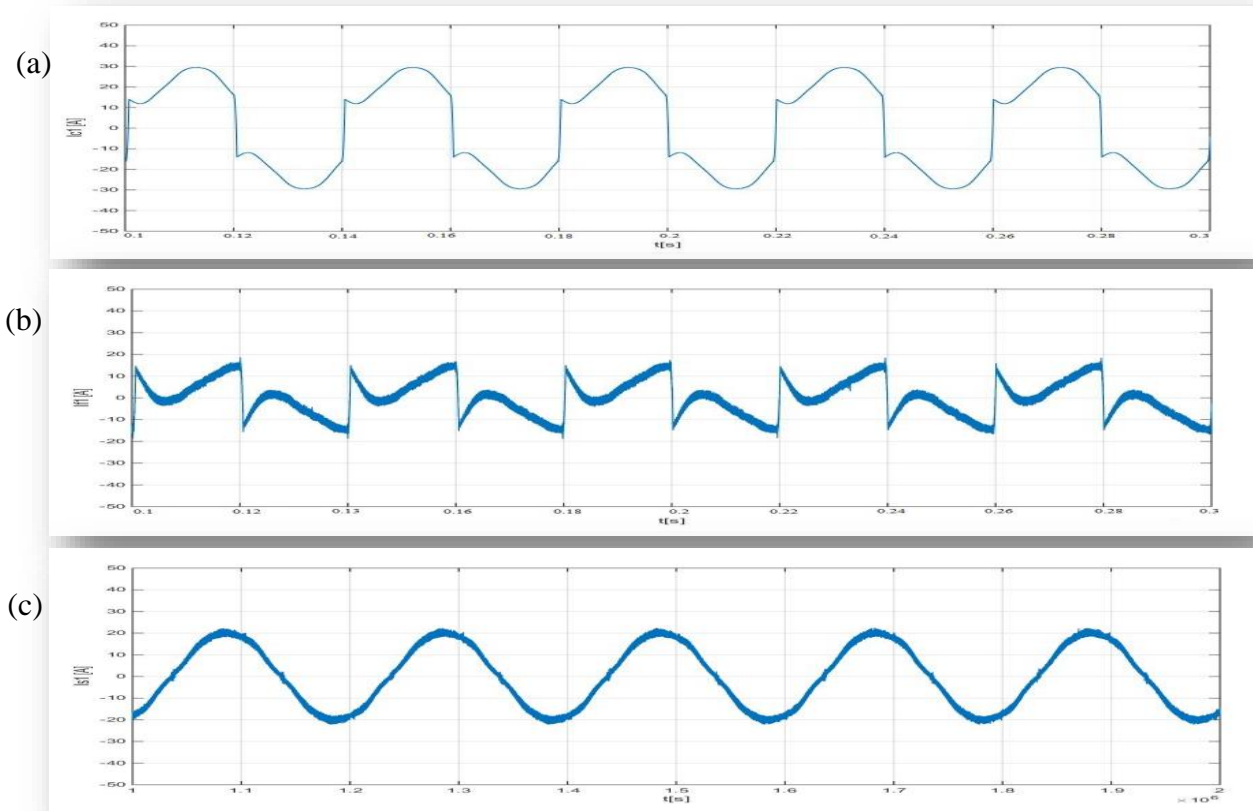


*Figure III.67 : Courant du neutre avant et après filtrage.*

Notre filtre actif de puissance a éliminer les perturbations dans la troisième phase de façon que le courant de source est sinusoïdale, le THD des courant de source est présenté ci-dessus.

### III.3.1.2 La méthode p-q avec FMVs

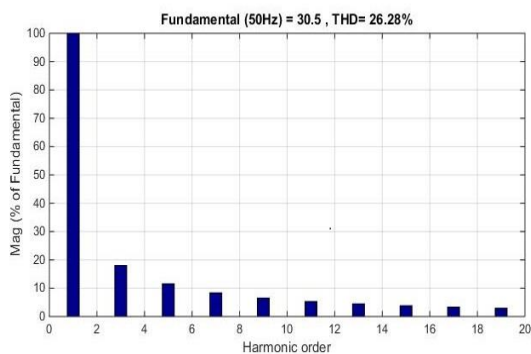
Les courants de la 1<sup>ère</sup> phase sont les suivants :



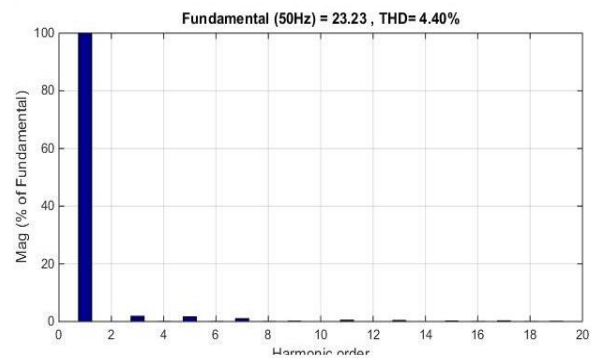
**Figure III.68 : Caractéristiques de courant de la 1<sup>ère</sup> phase**

**(a) : Courant de charge ; (b) : Courant de filtre ; (c) : Courant de source.**

La FFT du courant  $I_{c1}$  a donnée :



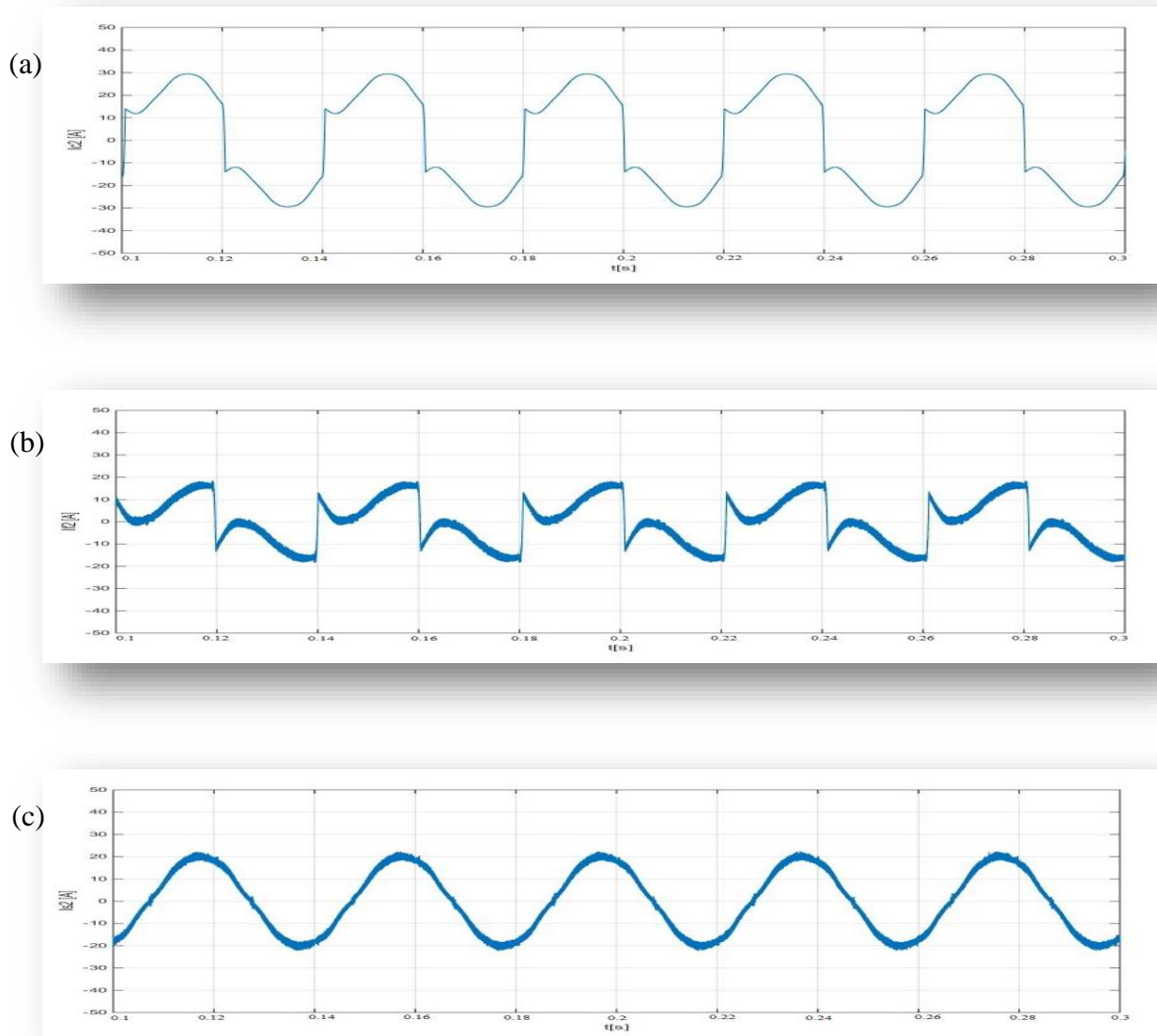
**Figure III.69 : FFT du courant de charge.**



**Figure III.70 : FFT du courant de source.**

Dans la deuxième phase les perturbations ont été éliminées, c'est ce qu'on a remarqué de la figure (III-68) et ça se confirme en observant les THD de chaque courant présentés dans les figures (III-69) et (III-70) ci-dessus.

Comme les courants de charges, les courants de source des deux premières phase sont aussi identiques, la figure suivante illustre les courants de la 2<sup>ème</sup> phase :



**Figure III-71 : Caractéristiques courant de la phase 2**  
**(a) : Courant de charge ; (b) : Courant de filtre ; (c) : Courant de source.**



La FFT du courant  $I_{c1}$  a donné :

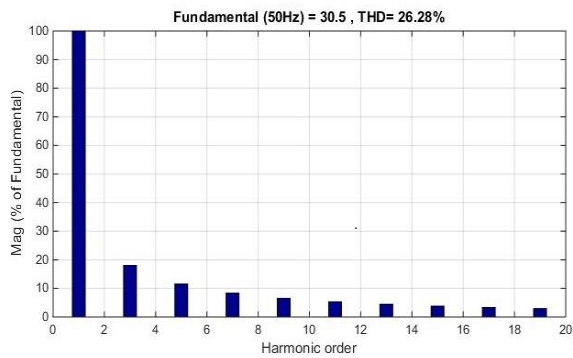


Figure III.72 : FFT du courant de charge.

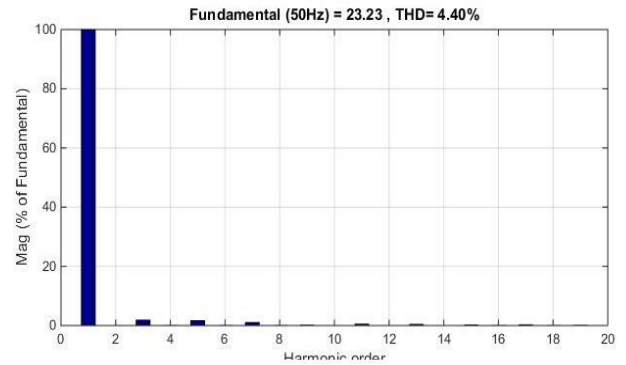


Figure III.73 : FFT du courant de source.

Dans la deuxième phase les perturbations ont été éliminé, c'est ce qu'on a remarqué de la figure (III-71) et ça se confirme en observant les THD de chaque courant présentés dans les figure (III-72) et (III-73) ci-dessus.

Pour la troisième phase, le courant de charge est nul et est présenté comme suit :

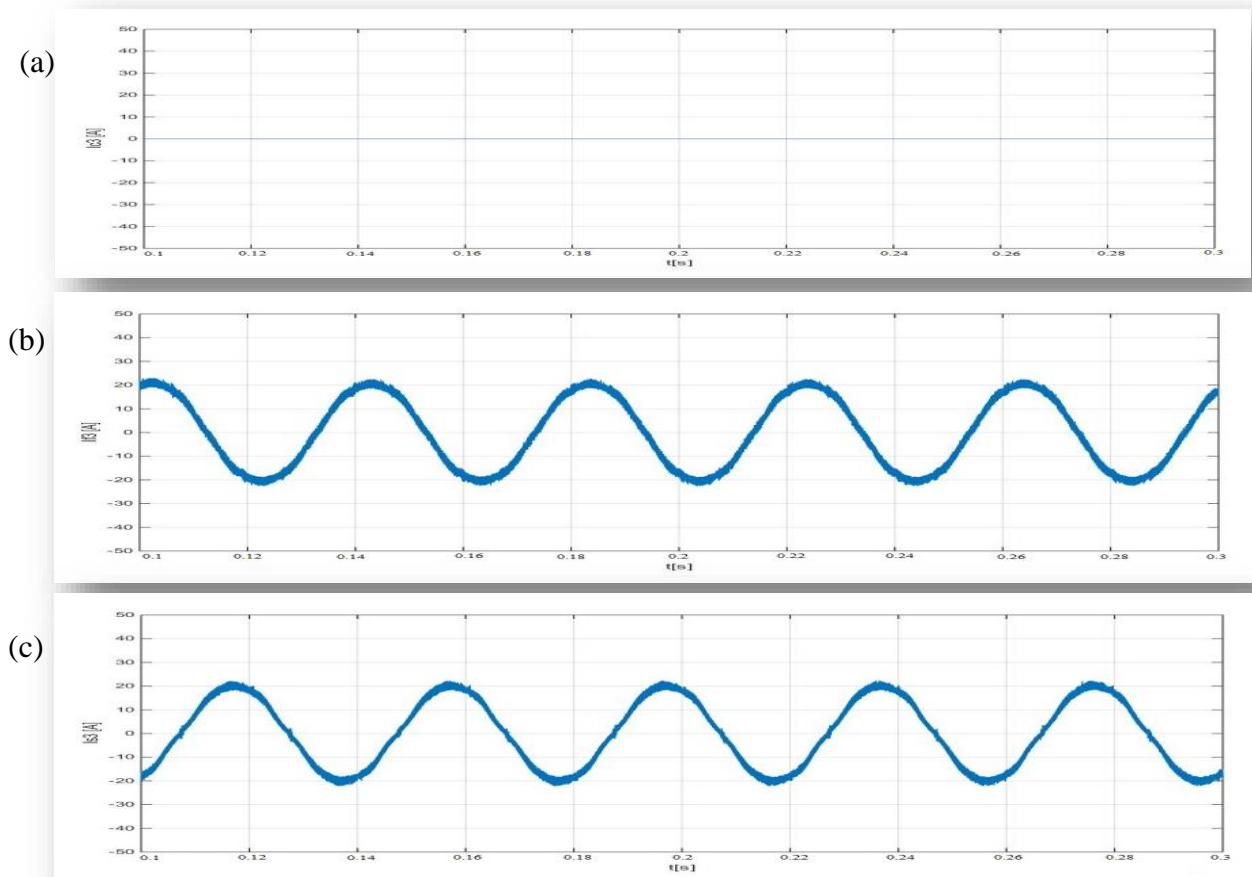


Figure III-74 : Caractéristiques courants de la 3<sup>ème</sup> phase  
 (a) : Courant de charge ;(b) : Courant de filtre ; (c) : Courant de source.

La consultation de la FFT du courant de source de la phase 3 a donnée :

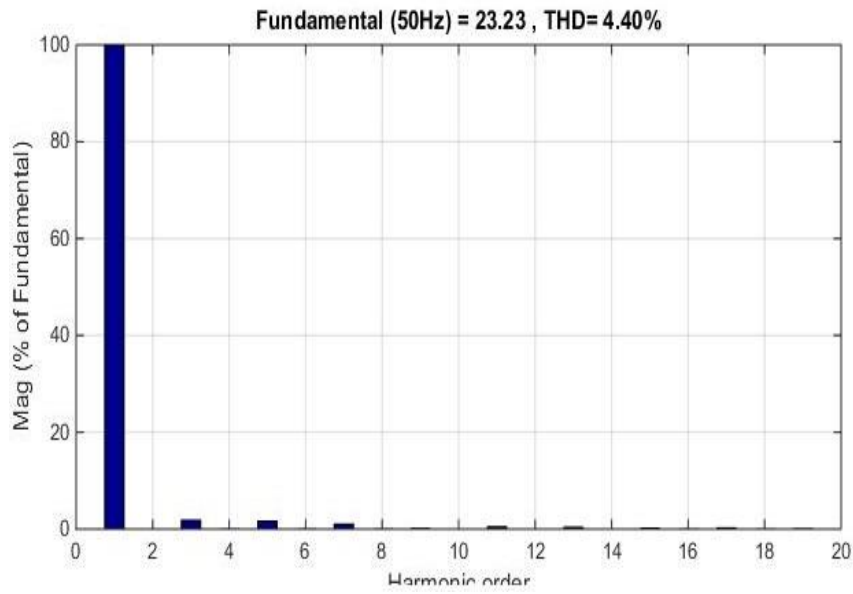


Figure III.75 : FFT du courant de source.

Le courant du neutre avant et après filtrage est présenté par les figures suivantes :

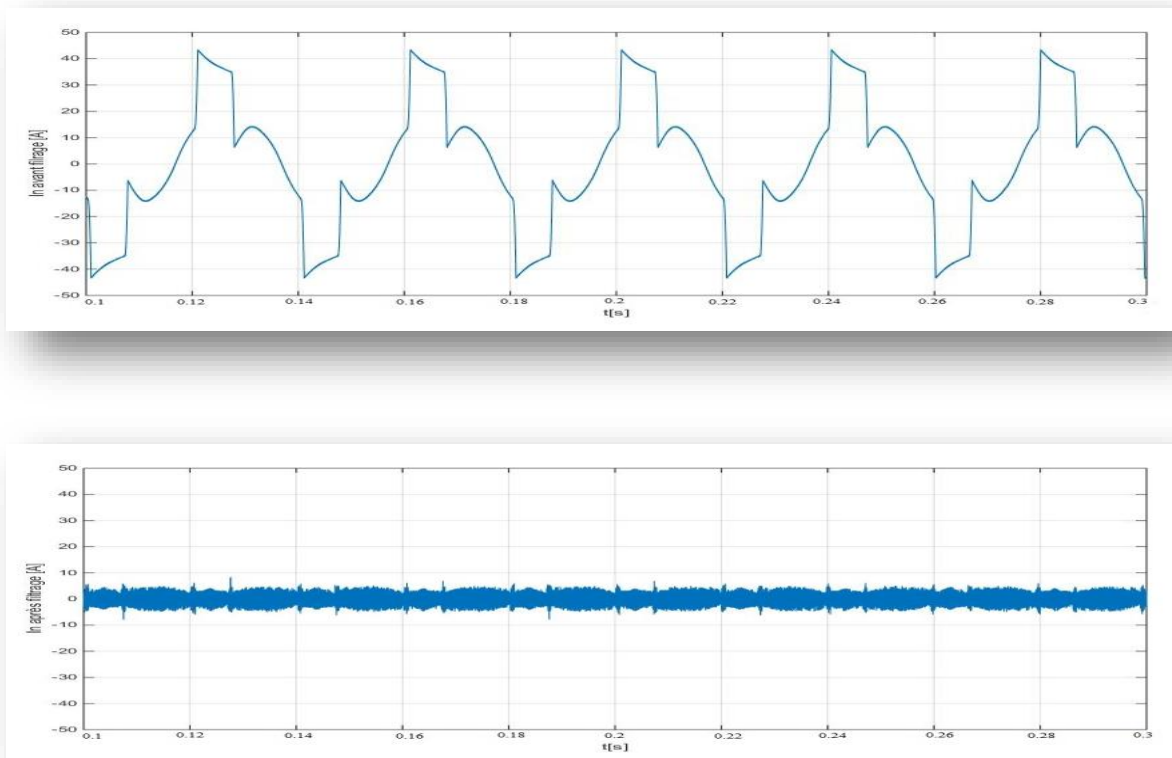


Figure III.76 : Courant du neutre avant et après filtrage.

Notre filtre actif de puissance a éliminer les perturbations dans la troisième phase de façon que le courant de source est sinusoïdale, le THD des courant de source sont illustrés dans la figure ci-dessus.

### III.4 Interprétation des résultats

Après avoir appliqué les différentes série de simulations pour les trois techniques de commande, il est rationnel de faire un récapitulatif des résultats obtenus pour nous permettre d'effectuer une étude comparative entre les trois techniques utilisées par rapport aux THD des courants de source.

➤ Cas de système équilibré :

**Tableau III.5 : THD des trois techniques appliquées au système équilibré.**

		Méthode p-q-r	Méthode p-q-o	Méthode p-q FMVs
<b>THD</b>	<b>avant</b>	<b>26.28%</b>	<b>26.28%</b>	<b>26.28%</b>
<b>filtrage</b>				
<b>THD</b>	<b>après</b>	<b>2.78%</b>	<b>2.59%</b>	<b>3.18%</b>
<b>filtrage</b>				

Lorsque notre système est équilibré, nous remarquons que la méthode des puissances instantanée modifiée p-q-o nous donne le meilleur résultat vis que son THD est le plus faible, donc c'est la meilleure technique pour l'élimination des courants harmoniques.

- Déséquilibre de charges :

**Tableau III.6 : THD des trois techniques appliquées sur notre système déséquilibré en charges.**

	Avant filtrage			Après filtrage		
	p-q-r	p-q-o	p-q FMV	p-q-r	p-q-o	p-q FMV
Phase 1	41.07%	41.06%	41.07%	1.33%	1.65%	3.93%
Phase 2	22.91%	22.91%	22.91%	1.35%	1.52%	3.93%
Phase 3	42.27%	42.01%	42.25%	1.43%	1.61%	3.91%

- Défaut monophasé :

**Tableau III.7 : THD des trois techniques appliquées sur notre système en cas de défaut monophasé.**

	Avant filtrage			Après filtrage		
	p-q-r	p-q-o	p-q FMV	p-q-r	p-q-o	p-q FMV
Phase 1	41.07%	41.06%	41.07%	1.33%	3.78%	4.40%
Phase 2	22.91%	22.91%	22.91%	1.33%	3.86%	4.40%
Phase 3	00.00%	00.00%	00.00%	1.43%	4.21%	4.40%

Les résultats obtenues de simulations pour nos deux régimes déséquilibrés (déséquilibre de charge, défaut monophasé) ont montré que la méthode de théorie p-q-r nous a donné des résultats plus performants vus les THD obtenus après filtrages pour les trois techniques étudiées.

### III-5 Conclusion :

Suite à l'utilisation des trois techniques d'extraction de courants de référence aux simulations des deux modes : équilibré et déséquilibré, nous sommes arrivés à déduire que le choix de techniques d'extraction des courants de référence doit être judicieux pour permettre d'aboutir à des courants de source à très faible THD.

## **Conclusion générale**

Notre travail a été consacré à étudié et simulé un filtre actif à quatre bras dans le but d'améliorer ses performances lors de son interconnexion à un réseau électrique de distribution basse tension triphasé à quatre fils, de sorte à maintenir notre système de courants triphasé côté source sinusoïdal et équilibré.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les différentes perturbations qui peuvent affecter les réseaux électriques, leurs origines et conséquences sur les autres charges connectées. Différentes solutions ont été présentées quels soient conventionnelles ou modernes (le filtrage actif série, parallèle ou hybride ...). Ensuite, nous avons présenté les normes imposées sur le taux de distorsion harmonique pour les utilisateurs selon certaines organisations de normalisation.

Nous nous sommes fixé comme objectif d'éliminer les perturbations de types courant provenant des charges non linéaires, pour cela, nous nous sommes limité à étudié et analysé la solution de filtrage actif de puissance parallèle.

Dans le second chapitre, nous avons présenté le principe du filtre actif parallèle à quatre bras comme solution de dépollution des harmoniques de courant et de l'énergie réactive générée par les charges polluantes. Pour cela, nous avons présenté l'onduleur ainsi que le filtre de découplage. On a fait appel à différentes techniques d'extraction de courants de référence : « p-q-r ; p-q-o modifié ; p-q FMVs » pour être appliquées à la commande de notre filtre actif de puissance.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté les résultats obtenues lors de nos différentes simulations. Pour les trois techniques d'extraction de courants de références en régime équilibré et déséquilibré ( déséquilibre en charge et défaut monophasé), il s'en est suivi une étude comparative des performances de nos trois

méthodes permettant ainsi de conclure que dans notre cas, la méthode des puissance instantanées modifiées p-q-o est la plus performante pour le régime équilibré par contre la méthode dite théorie p-q-r comme étant la plus performante en régime déséquilibré.

# Bibliographie :

- [1] H.Djehgloud , « Filtrage actif de puissance » , Université Mentouri – Constantine , Thèse de Doctorat , 2007.
- [2] H.Salem , « Commande d'un Filtre Actif Parallèle à 4 bras par des techniques avancées » , Université de Biskra , Mémoire de Magister , 2015.
- [3] M.M.Abdusalam , « Structures et stratégies de commande des filtres parallèles et hybrides avec validations expérimentales.» , UHP – Nancy I , Thèse de Doctorat , 2008.
- [4] K.Djazia , « Etude des filtres actifs pour réseaux déséquilibrés et distordus » , Université Ferhat Abbas – Setif , Thèse de Doctorat , 2015.
- [5] M.C.Benhbib , « Contribution à l'étude des différentes topologies et commandes des filtres actifs parallèles à structures tension : Modélisation, simulation et validation expérimentale de la commande. » , UHP - Nancy I , Thèse de Doctorat, 2004.
- [6] M.Elbar , B.Naas, M.O.Mahmoudi , « Application d'un Filtre Actif Quatre Bras à Trois Niveaux à la Compensation des Harmoniques d'un Réseau à Quatre Fils. » , Ecole Nationale Polytechnique – Alger , Article.
- [7] T.D.Rachmildha , « La Commande Hybride Prédictive d'un Convertisseur Quatre Bras. » , Université de Toulouse , Thèse de Doctorat , 2009.
- [8] A.Chaoui, « Filtrage Actif Triphasé Pour Charges Non Linéaires. » , Université de Setif , Thèse de Doctorat , 2010.
- [9] S.Ben Ali, S.Bouhanak, « Etude et Simulation d'un Filtre Actif Parallèle à Quatre Fils. » , UCHL – El Oued , 2015.
- [10] N.K.Nguyin , « Approche neuromimétique pour l'identification et la commande des système électrique : Application aux filtrage actif et aux actionneurs synchrones. » , Université Haute Alsace – Mulhouse, 2010.
- [11] S.Beaulieu, « Etude et Mise au Point d'un Filtre Actif d'Harmoniques en Vue d'Améliorer La Qualité de l'Alimentation Électrique. » , Université du Québec à Chicoutimi , Mémoire d'Ingénierie , 2007.
- [12] A.Chaghi, A.Guettafi, A.Benoudjit, « Four legged active power filter compensation for a utility distribution system.» , Journal of ELECTRICAL ENGINEERING, VOL. 55, NO. 1-2, 2004.
- [13] N.Hamouda, K.E.Hemsas, «Application d'une nouvelle approche FMV pour la compensation active globale et sélective des harmoniques de courants », Université FERHAT Abbas Sétif .

- [14] M.Abdusalam , P.Poure, S.Saadate, « A New Control Method of Hybrid Active Filter Using a Feedforward Loop Tuned at 5th and 7th Harmonic Frequency.», IEEE , 2007.
- [15] M.C.Benhabib, S.Saadate, « A New Robust Experimentally Validated Phase Locked Loop For Power Electronic Control.», EPE Journal.Vol15.n°3 , 2005.
- [16] M.António, H.Azevedo, J.Ferreira. « Active Power Filters for Harmonic Elimination and Power Quality Improvement. »INTECH Open Access Publisher, 2011.
- [17] D.Shen, P. W. Lehn. « Fixed-frequency space-vector-modulation control for three-phase four-leg active power filters. » *IEE Proceedings-Electric Power Applications* 149.4 (2002).
- [18] A.Chebabhi, M.K.Fellah, M.F.Benkhoris, A.Kessal, « Three Level Four Leg Shunt Active Power Filter Based a New Three Dimensional Space Vector Modulation strategy in the  $\alpha\beta$ -axes.» *Journal of Electrical Engineering*, 2015.
- [19] V.Parimala, D. GaneshKumar, V. Renugadevi, « four-leg shunt active power filter for power quality improvement using pi and fuzzy controllers.» , *International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR)*, Volume 4, Issue 2, February 2015
- [20] H.Benalla, and H.Djeghloud., « A novel time-domain reference-computation algorithm for shunt active power filters. » , *ACSE Journal* 6.2 , 2006 : 30-40.
- [21] L.Zhang, M.J. Waite, and B.Chong. « Three-phase four-leg flying-capacitor multi-level inverter-based active power filter for unbalanced current operation. » , *IET Power Electronics* 6.1 , 2013 : 153-163.
- [22] A.Fellah, M.K.Chebabhi, A.Kessal M.F.Benkhoris, « the pq0 theory with multi variable filter and fuzzy logic control for a four leg shunt active power filter compensated by three dimensional space vector modulation under unbalanced loads », *Bulletin of Engineering* 5 , 2012.



## Annexe

- 1- **CEI 61000-2-2** : cette norme fixe les limites de compatibilité pour les perturbations conduites basse fréquence et la transmission de signaux sur les réseaux publics d'alimentation basse tension. Les phénomènes perturbateurs incluent les harmoniques (tableau 1.2), inter harmoniques, fluctuations de tension, creux de tension, déséquilibres de tension transitoires, etc.

**Tableau I-4: CEI 61000-2-2 : Niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux publics basse tension[5].**

Harmoniques impairs non multiples de 3		Harmoniques impairs multiples de 3		Harmoniques pairs	
Rang harmonique h	Tension harmonique %	Rang harmonique h	Tension harmonique %	Rang harmonique h	Tension harmonique %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	>21	0.2	10	0.5
19	1.5	-	-	12	0.2
23	1.5	-	-	>12	0.2
25	1.5	-	-	-	-
>25	0.2+12.5/h	-	-	-	-

- 2- **CEI 61000-2-4** : cette norme fixe les limites de compatibilité pour les réseaux industriels et non publics basse tension et moyenne tension, à l'exclusion des réseaux de navires, des avions, des plateformes offshore et des installations ferroviaires afin de pour établir les limites d'émission sur les réseaux industriels et de choisir les niveaux d'immunité des équipements inclus dans ces systèmes [5].

**Tableau I-5: Taux (en % de VI) des tensions harmoniques acceptables (CEI 61000-2-4)[5].**

Rang harmonique	Classe1 : matériels et systèmes sensibles	Classe 2 : réseaux industriels	Classe 3 : réseaux industriels perturbés
2	2	2	3
3	3	5	6
4	1	1	1.5
5	3	6	8
6	0.5	0.5	1
7	3	5	7
8	0.5	0.5	1
9	1.5	1.5	2.5
10	0.5	0.5	1
11	3	3.5	5
<b>Pair &gt; 10</b>	0.2	0.2	1
13	3	3	4.5
15	0.3	0.3	2
17	2	2	4
19	1.5	1.5	4
21	0.2	0.2	1.75
<b>Impair &gt; 21 et ≠ 3h</b>	0.2	0.2	1
23	1.5	1.5	3.5
25	1.5	1.5	3.5
<b>Impair &gt;21 et ≠ 3h</b>	0.2+12.5/h	0.2+12.5/h	5*(11/h)
<b>THD</b>	<b>5%</b>	<b>8%</b>	<b>10%</b>

3- CEI 61000-3-2 : cette norme spécifie les limites pour les émissions de courant harmonique des matériels individuels raccordés aux réseaux publics pour les appareils consommant moins de 16 A par phase.

**Tableau I-6: CEI 61000-3-2 : Limites d'émission de courants harmoniques des appareils basse tension de courant inférieur à 16A et de classe A[5].**

<b>Rang harmonique</b>	<b>Courant harmonique maximal autorisé (A)</b>
<b>2</b>	1.08
<b>3</b>	2.30
<b>4</b>	0.43
<b>5</b>	1.14
<b>6</b>	0.30
<b>7</b>	0.77
<b>8&lt;h&lt;40</b>	$0.23 \cdot 8/h$
<b>9</b>	0.40
<b>11</b>	0.33
<b>13</b>	0.21
<b>15&lt;h&lt;39</b>	$0.15 \cdot 15/h$

- 4- **CEI 61000-3-4** : cette norme spécifie les limites pour les émissions de courant harmonique des équipements individuels d'intensité assignée supérieure à 16A et jusqu'à 75A. Ces limites s'appliquent aux réseaux publics de tensions nominales entre 230V (monophasée) et 600V (triphase) [5].

**Tableau I-7 : CEI 61000-3-4 : Limitation des émissions de courants harmoniques [5].**

<b>Rang harmonique</b>	<b>Courant harmonique en % du fondamental</b>
<b>3</b>	21.6
<b>5</b>	10.7
<b>7</b>	7.2
<b>9</b>	3.8
<b>11</b>	3.1
<b>13</b>	2.0
<b>15</b>	0.7
<b>17</b>	1.2
<b>19</b>	1.1
<b>21</b>	<0.6
<b>23</b>	0.9
<b>25</b>	0.8
<b>27</b>	<0.6
<b>29</b>	0.7
<b>31</b>	0.7
<b>&gt;33</b>	<0.6
<b>Pair</b>	<0.6 ou < 8/h

- 5- **CEI 61000-4-13** : Le but de cette norme est d'établir une référence commune pour l'évaluation de l'immunité fonctionnelle des matériels électriques et électroniques soumis aux harmoniques et inter harmoniques et aux fréquences des signaux transmis sur le réseau.

Les niveaux proposés correspondent généralement aux environnements résidentiels, commerciaux, et de l'industrie légère. Elle donne les essais d'immunité basse fréquence aux harmoniques et inter-harmoniques incluant les signaux transmis sur le réseau électrique alternatif. Le tableau 1.6 donne les taux des harmoniques en tension à utiliser pour vérifier l'immunité des appareils pour les matériels et systèmes sensibles (classe 1) et les réseaux industriels (classe 2) [5].

**Tableau I-8 : CEI 61000-4-13 : Taux des harmoniques en tension à utiliser pour vérifier l'immunité des appareils.**

<b>Rang harmonique</b>	<b>Classe1 : matériels et systèmes sensibles</b>	<b>Classe 2 : réseaux industriels</b>
<b>3</b>	8	8
<b>5</b>	8	12
<b>7</b>	6.5	10
<b>9</b>	2.5	4
<b>11</b>	5	7
<b>13</b>	4.5	6
<b>15</b>	-	3
<b>17</b>	3	5
<b>19</b>	2	5
<b>21</b>	-	2
<b>23</b>	2	4
<b>25</b>	2	4
<b>27</b>	-	2
<b>29</b>	1.5	4
<b>31</b>	1.5	3

## Résumé

Les réseaux électriques de distribution sont soumis à des problèmes de pollutions harmoniques de plus en plus préoccupants avec l'accroissement de l'usage des charges non linéaires.

Dans ce mémoire, on présente une étude théorique avec simulation des commandes d'un filtre actif parallèle à quatre bras pour améliorer la qualité de l'énergie d'un réseau électrique triphasé à quatre fils, en régime équilibré et déséquilibré afin de compenser les harmoniques et les puissances réactives.

On a utilisé trois techniques d'extraction de courants de référence, qui sont : la méthode des puissances instantanées modifiée p-q-o, la théorie p-q-r et la méthode des puissances instantanées p-q avec FMV. En utilisant l'outil Matlab/SimPower System par lequel on a effectué différentes simulations sanctionnées par une étude comparative de ses méthodes.

## Abstract

The distribution Electrical networks are subject to harmonic problems with an increase of the use of non-linear loads.

In this work, we present a theoretical study with simulation of the four legs parallel active power filter control to improve the quality of the signal of the electrical network, under balanced and unbalanced for compensate harmonics and reactive powers.

Three techniques for extracting reference currents have been used, which are : The modified instantaneous powers p-q-o method, the p-q-r theory, and the instantaneous p-q power method with FMV. Using the Matlab/SimPower System tool by which we performed the series of simulations that were presented to measure the effectiveness of the three methods.

## المخلص

تتعرض شبكات التوزيع الكهربائية لمشاكل التلوث التوافقي بشكل متزايد مع الزيادة في استخدام الأحمال الغير الخطية.

في هذا المذكرة قمنا بدراسة نظرية مرفقة بمحاكاة تطبيقية لأنظمة تحكم في مرشح موازي رباعي الارتباط ، لتحسين نوعية الطاقة في شبكة كهربائية ثلاثية الطور ذات أربع أسلاك، بطريقة متوازنة و غير متوازنة ، لتعويض التوافقيات وقوة رد الفعل.

استعملنا ثلاث طرق لاستخراج التيارات المرجعية و هي : طريقة معدلة من قوة لحظية p-q-o ، نظرية p-q-r ، طريقة معدلة من قوة لحظية p-q مع FMV. باستخدام الأداة Matlab/SimPower System التي أجرينا من خلالها سلسلة من المحاكاة سمحت بإجراء مقارنة بين نتائج الطرق الثلاث.