

République Algérienne Démocratique Et Populaire  
MINISTERE 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

***Meriem AZMANI & Nerimane BENBACHIR***

Intitulé du Mémoire

## ***Etude et simulation d'un conditionneur de puissance (UPQC)***

Soutenu publiquement le 28 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**

## ***Remerciement***

Nous tenons particulièrement à remercier Allah le tout puissant, ce mémoire n'aurait jamais été réalisé sans sa bénédiction.

Nous adressons nos remerciements à notre encadreur Monsieur BRIKCI NIGASSA Mohammed Amine pour son aide consistante, ses conseils judicieux et les encouragements qu'il nous prodigué pendant toute la durée de ce travail.

Nous remercions les membres du jury, Monsieur MELIANI Sidi Mohamed d'avoir l'amabilité de présider le jury de notre mémoire. Nous tenons à remercier Monsieur BENAHBIB Mohammed Choukri et Monsieur GORINE Ali d'avoir accepté d'examiner notre travail.

Enfin, nous tenons à remercier toute personne qui nous a aidées de près ou de loin durant notre travail et en particulier tous nos collègues.

## *Dédicace*

*Je rends grâce à Dieu tout puissant de m'avoir  
accordé la force nécessaire pour la réalisation de ce  
travail que je dédie chaleureusement :*

*A l'âme de l'homme qui m'a appris la valeur de chose mon  
père qu'il se repose au paradis,*

*A ma mère qu'Allah la garde et lui procure santé et longue  
vie ;*

*A mon cher frère Youcef, à mes chères sœurs Asma, Meriem,  
Amira.*

*A mon beau-frère Rabah et mon neveu Rayan*

*A toute la famille BENBACHIR & BENOTMANE*

*Son oublier mon binôme Meriem Je lui souhaite une vie  
remplie de bonheur.*

*A tous mes collègues de l'études.*

*A tous ce qui m'ont soutenu de près ou de loin.*

*Nerimane*

## Dédicace

Je dédie ce mémoire :

✚ A mes parents :

- ❖ A ma chère mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.
- ❖ A mon cher père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.

✚ Mes sœurs et mon frère Esma, Imene et Amine qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité, avec leurs petites enfants Amira Wassim et Mouhamed

✚ A ma fille que j'attends avec impatience « Soundous »

✚ A toute la famille AZMANI et houhou

✚ A ma chère binôme Nerimane, qui m'a aidé et supporté dans les moments difficiles.

✚ Aux chers amis (es).

✚ A tous ce que j'aime et qui m'aiment.

✚ A tous mes collègues d'études.

Meriem

## *Symboles et abréviations*

FAP :	Filtre actif parallèle
FAS :	Filtre actif série
UPQC :	Conditionneur universel d'énergie électrique
SRF :	Méthode du référentiel lié au synchronisme (SRF)
PQ :	Méthode des puissances active et réactive instantanées (PQ)
C32 :	Transformation de Concordia 3-2
C23 :	Transformation inverse de Concordia 2-3
MLI :	Modulation en largeur d'impulsions
FPB :	Filtre pass bas
FPH :	Filtre pass haut
PLL :	Boucle à verrouillage de phase
PI :	Régulateur proportionnel intégral
DC :	Courant continu
$\bar{P}$ :	Puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant
$\bar{q}$ :	Puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant
$\tilde{p}$ :	Puissance harmonique active
$\tilde{q}$ :	Puissances réactive harmonique
$K_p$ :	Gain proportionnel
$K_i$ :	Gain intégral
$\xi$ :	Coefficient d'amortissement
$\omega_0$ :	$2\pi f_0$ la fréquence propre
$V_f$ :	Tension du filtre actif série
$i_f$ :	Courant du filtre actif parallèle.

## *Liste de figures*

Figure I-1 : Fluctuation de tension & flicker. ....	4
Figure I-2: Creux de tension. ....	5
Figure I-3: déséquilibre de la tension. ....	6
Figure I-4 : Synthèse d'un signal à partir des harmoniques. ....	6
Figure I-5 : Filtre actif parallèle.....	10
Figure I-6 : filtre actif série. ....	11
Figure I-7 : combinaison d'un filtre actif série avec un filtre passif parallèle. ....	12
Figure I-8 : Filtre actif série connectée en série avec un filtre passif parallèle. ...	12
Figure I-9 : Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle. ....	13
Figure I-10 : conditionneur actif de puissance.....	14
Figure II-2 : Onduleur de tension triphasé. ....	17
Figure II-3 : Commande par hystérésis. ....	20
Figure II-4 : Commande des interrupteurs par hystérésis. ....	20
Figure II-5 : Filtre passe haut équivalent.....	22
Figure II-6 : Schéma de principe de la méthode des puissances instantanées. ....	23
Figure II-7: Boucle de réglage de tension continu $V_{dc}$ .....	24
Figure II-8 : la source et la charge du réseau triphasé. ....	25
Figure II-9 : Tension triphasé côté source.....	25
Figure II-10 : courant de source triphasé.....	26
Figure II-11 : Courant de la phase 1 et son spectre de THD.....	26
Figure II-12 : Système complet la source, la charge et le filtre actif parallèle. ....	27
Figure II-13 : Tension de source.....	27
Figure II-14 : Courant de charge. ....	28
Figure II-15: (a) : courant de charge de la 1 <sup>ère</sup> phase ; (b) courant injecté par le filtre ; (c) : courant de source de la 1 <sup>ère</sup> phase. ....	28
Figure II-16 : Courant de charge et source et leurs spectres de THD. ....	29
Figure II-17 : Système complet la source, la charge et le filtre actif parallèle. ....	29
Figure II-18 : Courant de charge. ....	30
Figure II-19: courant de charge et source pour chaque phase. ....	31
Figure II-20: courant de source.....	32
Figure II-21 : Modèle de charges. ....	32
Figure II-22: Courant de charge pour les trois phases. ....	33
Figure II-23: Courant de charge (phase 1) et son spectre d'harmonique. ....	33
Figure II-24: (a) : courant de charge de la 1 <sup>ère</sup> phase ; (b) courant injecté par le filtre ;(c) : courant de source de la 1 <sup>ère</sup> phase.....	33
Figure II-25 : Courant de charge et son spectre harmonique et le courant de source et son spectre harmonique .....	34
Figure III-2 : Principe du filtrage actif de puissance série.....	38
Figure III-3 : Structure générale du filtre actif de puissance série .....	39
Figure III-4 : Schéma de modélisation du filtre de sortie.....	41
Figure III-5: Filtre passe haut équivalent. ....	44
Figure III-6: Schéma de principe de la méthode des puissances instantanées.....	45
Figure III-7: Schéma de principe de la méthode d'identification.....	45
Figure III-8 : Schéma de principe d'un PLL classique. ....	46

Figure III-9: Boucle de réglage de tension continu $V_{dc}$ .....	47
Figure III-10: Modèle de simulation (source-charge).....	49
Figure III-11: Tension coté source .....	50
Figure III-12: Courant coté source .....	50
Figure III-13: Tension de la phase 1 et son spectre de THD .....	51
Figure III-14 : Système complet la source, la charge et le filtre actif série. ....	51
Figure III-15 : Tension de source .....	52
Figure III-16 : Courant de source .....	52
Figure III-17 : (a) : tension de source de la 1ère phase ; (b) tension injectée par filtre ; (c) : tension de charge de la 1ère phase.....	53
Figure III-18 : courant de charge et source et leurs spectres de THD. ....	53
Figure III-19 : modèle de simulation (source-charge).....	54
Figure III-20 : Courant de charge.....	55
Figure III-21 : Tension de la charge.....	55
Figure III-22 : Tension de charge de la phase 1 et son spectre THD.....	55
Figure III-23 : Système complet la source, la charge et le filtre actif série. ....	56
Figure III-24 : tension de la source. ....	56
Figure III-25 : (a) : tension de charge de la 1ère phase ; (b) tension injectée par le filtre ; (c) : tension de source de la 1 er phase. ....	57
Figure III-26 : Courant de charge et source et leurs spectres de THD. ....	57
Figure IV-1 : Conditionneur actif de puissance.....	60
Figure IV-2: Tension de charge $V_{ch}$ .....	62
Figure IV-3 : Courant de charge.....	62
Figure IV-4 : la tension et le courant de charge et leur spectre de THD. ....	63
Figure IV-5 : la tension et le courant après la validation du FAS et leurs THD. .	63
Figure IV-6: (a) : tension de charge de la 1ère phase ;.....	64
Figure IV-7:(a) : courant de charge de la 1ère phase ;.....	64
Figure IV-8 : .....	65
Figure IV-9 : Représentation du processus de filtrage des courants de charge en présence d'un UPQC .....	66
Figure IV-10 : la tension de source et son spectre harmonique et le courant de source et son spectre harmonique. ....	67

## *Liste de tableaux*

Tableau II-1: paramètre du réseau électrique .....	25
Tableau II-2: paramètre du réseau électrique.....	30
Tableau II-3: récapitulatif des résultats de simulation .....	34
Tableau III-1: paramètre du réseau électrique .....	49
Tableau V-1 : Limites pour une charge triphasée selon IEC 61000-3-4.....	71
Tableau V-2: Limites des harmoniques selon IEC 61000-3-2 classe D.....	72
Tableau V-3 : Limites des composantes harmoniques en courant. ....	73
Tableau V-4 : Limites des émissions de courants harmoniques.....	74



# *Table des matières*

Remerciement .....	ii
Symboles et abréviations .....	v
Introduction générale .....	1
Chapitre I Perturbation dans les réseaux électriques .....	2
I.1 Introduction .....	3
I.2 Caractéristiques des perturbations électriques.....	3
I.2.1 Perturbations de type courant.....	3
I.2.2 Perturbations de type tension .....	4
I.2.3 Perturbations harmoniques .....	6
I.3 Normes de la qualité d'énergie .....	8
I.4 Solution de dépollution des réseaux électriques.....	8
I.4.1 Solutions traditionnelles .....	8
I.4.2 Solutions modernes :.....	10
I.5 Conclusion : .....	14
Chapitre II Filtrage Actif de Puissance Parallèle .....	15
II.1 Introduction .....	16
II.2 Filtre actif parallèle .....	16
II.3 Structure générale du filtre actif parallèle .....	16
II.4 Partie puissance du filtre actif parallèle .....	17
II.4.1 Onduleur de tension .....	17
II.4.2 Système de stockage de l'énergie .....	18
II.4.3 Filtre de sortie :.....	19
II.5 Partie contrôle commande.....	19
II.5.1 Commande de l'onduleur .....	19
II.5.2 Identification des courants perturbateurs.....	20
II.5.3 Régulation de tension continue .....	23
II.6 Description de simulation .....	24
II.7 Simulation d'une charge triphasée équilibrée.....	24
II.7.1 Avant filtrage .....	25
II.7.2 Après filtrage.....	27
II.8 Simulation d'une charge triphasé déséquilibré .....	29

II.8.1	Modèle de simulation .....	29
II.8.2	Paramètre de simulation .....	30
II.8.3	Résultat de simulation .....	30
II.9	Simulation des 3 charges monophasées équilibrées .....	32
II.9.1	Modèle de simulation .....	32
II.9.2	Résultat de simulation .....	33
II.10	Conclusion.....	34
Chapitre III	Filtrage actif de puissance série .....	36
II.11	Introduction .....	37
II.12	Filtre actif série .....	37
II.13	Principe de fonctionnement d'un Filtre Actif Série .....	37
II.14	Structure générale du filtre actif série.....	38
II.14.1	Partie puissance du filtre actif série .....	39
II.14.2	Partie contrôle commande .....	41
II.15	Description de la simulation .....	48
II.15.1	Simulation d'un FAS en présence de perturbation coté source .....	48
II.15.2	Simulation d'un FAS en présence de perturbation cotée charge.....	54
II.16	Conclusion.....	58
CHAPITRE IV	Conditionneur de Puissance - UPQC.....	59
IV.1	Introduction .....	60
IV.2	Conditionneur de puissance.....	60
IV.3	Structure générale de conditionneur de puissance .....	61
IV.4	Résultat de simulation.....	62
IV.4.1	Avant filtrage.....	62
IV.4.2	Après validation du FAS.....	63
IV.4.3	Après filtrage de UPQC.....	64
IV.5	Conclusion.....	67
Bibliographie	.....	69
Annexe A.....	.....	71

## *Introduction générale*

Le développement croissant de l'industrie a intégré à grande échelle des équipements à base d'électroniques de puissance, ce qui a entraîné d'énormes perturbations au niveau des réseaux électriques. Ainsi, les utilisateurs connectés au réseau électrique sont soumis à une augmentation régulière d'harmonique et de déséquilibre des courants ainsi qu'une importante consommation de la puissance réactive. La présence de ces courants perturbés engendrés par ces différentes charges non-linéaires s'est traduite par l'apparition d'harmoniques et/ou de déséquilibres de tension. Ce qui peut engendrer des conséquences néfastes sur les équipements électriques, entraînant souvent par exemple un échauffement des machines tournantes pouvant aboutir à leurs dégradations.

En conséquence, les compagnies de production d'électricité pénalisent les grands pollueurs avec des taxes supplémentaires. Par voie de conséquence, veiller sur la qualité des signaux dans le réseau électrique permet aux compagnies d'électricité d'honorer leurs engagements en termes de qualité vis-à-vis de ses clients. Pour ce faire, il existe une multitude de solutions de dépollution basées sur des techniques dites conventionnelles ou modernes.

Nous nous proposons de présenter dans ce mémoire la modélisation suivie de simulation d'un conditionneur de puissance dédié à éliminer l'ensemble des perturbations courants et tensions qui peuvent être générés par des charges non linéaires. Pour ce faire, nous aurons à valider deux modèles de filtre actif de puissance parallèle et série pour pouvoir développer notre conditionneur de puissance « UPQC » dédié à l'élimination de l'ensemble des perturbations courants et tension issues ou produites par des charges non linéaires.

*Chapitre I*  
*Perturbation dans les*  
*réseaux électriques*

## **I.1 Introduction**

A l'image des réseaux électriques au niveau mondiale, l'Algérie possède un réseau triphasé sinusoïdal de fréquence 50 Hz ainsi l'onde de tension délivrée prend idéalement la forme d'une sinusoïde de fréquence constante et d'amplitude constante. Mais, en réalité l'onde de tension n'est jamais parfaitement sinusoïdale, la fréquence et l'amplitude de cette onde varient en permanence, ceci est dû en partie à la présence des charges non linéaire.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la qualité de l'énergie dans les réseaux électriques en présentant les principaux défauts affectant la tension et le courant. Nous citerons également les normes internationales en matière de qualité de l'énergie imposées aux utilisateurs. En dernier, nous présenterons quelques solutions traditionnelles et modernes utilisées pour dépolluer les réseaux électriques.

## **I.2 Caractéristiques des perturbations électriques**

« Tout phénomène perturbateur qui fait sortir l'onde de tension (ou de courant) du secteur de ses caractéristiques peut être considéré comme une perturbation » [7].

Les distributeurs d'énergie rencontrent de plus en plus de problèmes sur la maîtrise de la qualité de l'énergie et ceci est lié principalement à l'accroissement du nombre de convertisseurs statiques raccordés aux réseaux de distribution d'énergie, conséquence de l'évolution technologique des composants d'électronique de puissance.

### **I.2.1 Perturbations de type courant**

Les courants perturbateurs comme les courants harmoniques, déséquilibrés, et la puissance réactive sont majoritairement émis par des charges non linéaires, à base d'électronique de puissance, et/ou déséquilibrées, sans pour autant négliger les surintensités. [3]

**I.2.1.1 Surintensité :** Dans un circuit électrique, la surintensité est atteinte lorsque l'intensité du courant dépasse une limite jugée supérieure à la normale, ces causes sont multiples : [21]

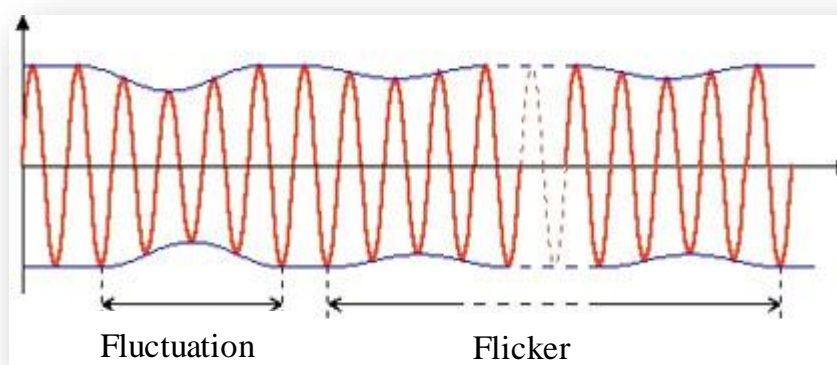
**Les surcharges :** elles interviennent quand un grand nombre d'appareils sont alimentés en même temps ou lorsqu'un de ces appareils consomme trop de puissance.

**Les courts-circuits :** Le courant de court-circuit est en général une forte intensité produite par la mise en connexion de deux points (ou plus) d'un circuit électrique entre lesquels il y a une différence de potentiel, par un conducteur de résistance négligeable.

## **I.2.2 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. [3]

**I.2.2.1 Fluctuation de tension & flicker :** Les fluctuations de tension sont une suite de variations de tension ou des variations cycliques ou aléatoires de l'enveloppe d'une tension. Ces fluctuations se situent dans les limites de variation normale de la tension, c'est-à-dire dans la tolérance de  $\pm 10\%$  autour de la tension nominale, ils sont principalement dus à des charges industrielles rapidement variables comme les machines à souder, les fours à arc. [20]



*Figure I-1 : Fluctuation de tension & flicker.*

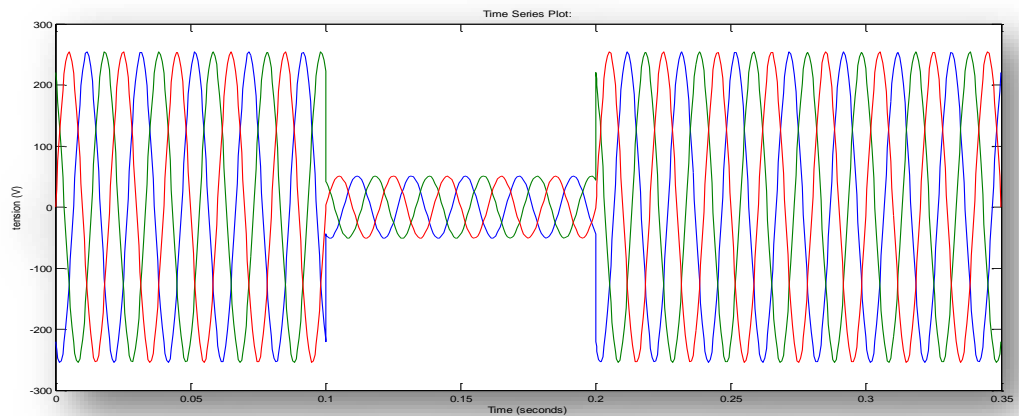
Ces fluctuations se traduisent par des variations d'intensité, visible au niveau de l'éclairage causant une gêne visuelle perceptible pour une variation de 1 % de la tension. Ce phénomène de papillotement est appelé flicker. [15]

### **I.2.2.2 Creux de tension :**

Un creux de tension est une diminution brusque de la tension  $U_f$ . Cette diminution est située entre 90% et 10% de la tension nominale  $U_n$ , est suivie du rétablissement de la tension après un court intervalle de temps *Figure I-2*. [13]

Flu                      Fli

Un creux de tension peut durer de 10 ms à 1 mn pour les coupures brèves et une durée supérieure à une minute pour les coupures longues. La plupart des appareils électriques admettent une coupure totale d'alimentation d'une durée inférieure à 10 ms [3].



*Figure I-2: Creux de tension.*

### **I.2.2.3 Déséquilibre de la tension :**

Un système triphasé est déséquilibré lorsque les trois tensions ne sont pas égales en amplitude et/ou ne sont pas déphasées les unes des autres de  $120^\circ$ . Il résulte principalement par la connexion de charges monophasées basse tension qui induisent un déséquilibre par la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau, ainsi que par : les machines à souder, les fours à arc pour le cas de tension plus élevée *Figure I-3*. [18]

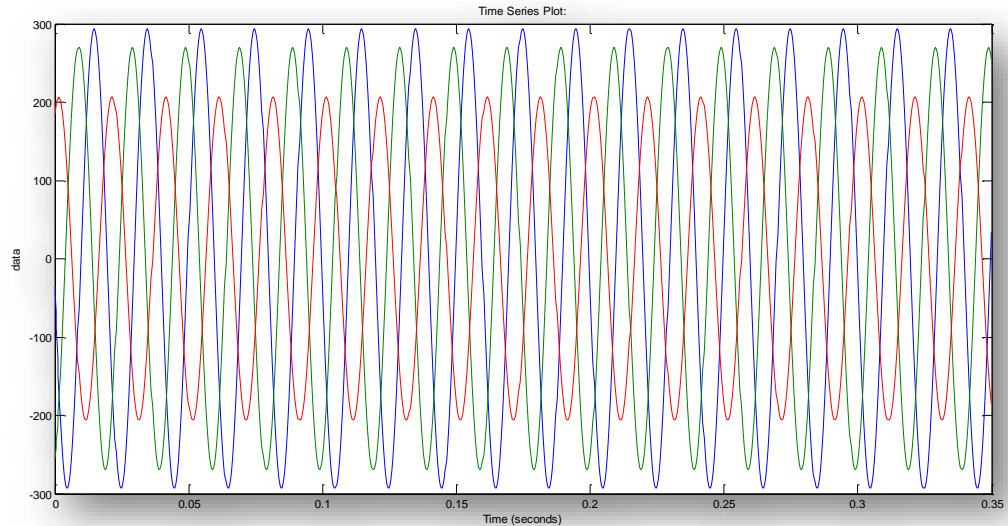


Figure I-3: déséquilibre de la tension.

### I.2.3 Perturbations harmoniques

Les harmoniques sont des perturbations affectant la forme d'onde tension ou courant du réseau. Ces perturbations résultent de la superposition, sur l'onde fondamentale à 50Hz, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples de celle du fondamental. La figure 1.4 illustre un exemple de forme d'onde d'une tension distordue contenant, en plus du terme fondamental de fréquence 50Hz, deux harmoniques de rang impair 5 et 7.

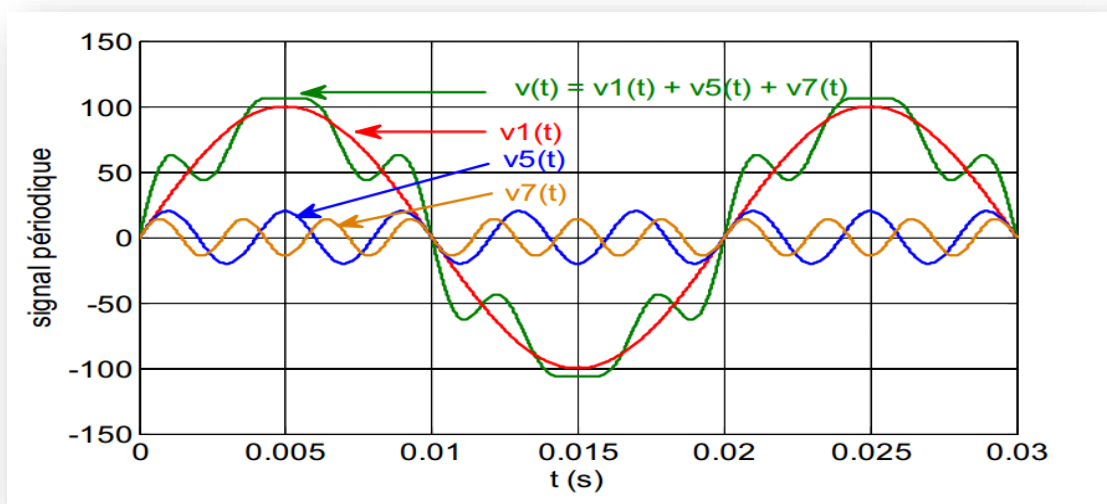


Figure I-4 : Synthèse d'un signal à partir des harmoniques.



Où :

$v(t)$  : onde polluée

$v_1$  : fondamentale

$v_5$  : harmonique d'ordre 5

$v_7$  : harmonique d'ordre 7

**I.2.3.1 Caractérisation des harmoniques** : Différentes grandeurs sont définies pour chiffrer ces perturbations. Parmi celles-ci les plus utilisées sont :

- **Taux de distorsion harmonique « THD »** : Il est défini comme le rapport de la valeur efficace globale des harmoniques sur la valeur efficace de la composante fondamentale. Il est adapté pour quantifier le degré de pollution harmonique sur les réseaux électriques. Le THD s'exprime par rapport à la fréquence fondamentale et caractérise l'influence des harmoniques sur l'onde de courant déformée. Il est défini par la relation suivante : [4]

$$\text{THD} = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{x_h^2}{x_1^2}} \quad (\text{I.1})$$

Avec  $x$  soit un courant, soit une tension.

- **Le facteur de puissance** : Dans le cas d'un signal sinusoïdal, le facteur de puissance est donné par le rapport entre la puissance active  $P$  et la puissance apparente  $S$  : [3] [8] [16]

$$F_p = \frac{P}{S} \quad (\text{I.2})$$

Avec :

$$P = V \cdot I_{s1} \cos \phi_1 \quad (\text{I.3})$$

$$Q = V \cdot I_{s1} \sin \phi_1 \quad (\text{I.4})$$

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

$$F_p = \frac{V \cdot I_{s1} \cdot \cos \phi_1}{V \cdot I_s} = \frac{I_{s1}}{I_s} \cos \phi_1 \quad (\text{I.5})$$

$\Phi_1$  représente le déphasage entre le courant fondamental et la tension.

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

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

$$F_p = \frac{\cos\phi}{\sqrt{1+THD^2}} \quad (I.6)$$

### **I.3 Normes de la qualité d'énergie**

Deux principales normes standards reconnues au niveau mondial : détaillé en Annexe A

- Normes CEI
- Normes IEEE

### **I.4 Solution de dépollution des réseaux électriques**

La bibliographie que nous avons consultée, nous a permis d'identifier deux types de solutions majeurs utilisées pour la dépollution des réseaux électriques :

#### **I.4.1 Solutions traditionnelles**

Elles apportent une solution facile et rapide pour certains cas de perturbations bien localisées et utilisent des composants passifs. [8]

**I.4.1.1 Dépollution des courants perturbateurs :** Inductance de lissage des courants : L'inductance de lissage se monte en série à l'entrée d'un récepteur pollueur, cette solution n'élimine aucun rang, mais limite les harmoniques de rangs élevées puisque leurs impédances augmentent avec la fréquence. Ces inductances réduisent donc la distorsion de la tension au point de raccordement mais induisent un coût supplémentaire. [19]

**I.4.1.1.1 Compensation de la puissance réactive :** La puissance réactive est majoritairement consommée par les charges non linéaires, dans le but d'augmenter le facteur de puissance, la solution la plus utilisée est d'installer des batteries de condensateur en parallèle avec le réseau à proximité des charges pour la compensation locale ou près d'un transformateur d'alimentation pour la compensation globale. [1]

**I.4.1.1.2 Compensation des courants harmoniques :** Plusieurs solutions existent pour limiter la propagation et l'effet des harmoniques dans les systèmes électriques :

- Renforcement de la puissance de court-circuit du réseau et la diminution de l'impédance en amont de la charge permet de réduire la tension créée par les harmoniques de courant qui ont pour effet de réduire la distorsion harmonique ; [8]
- Utilisation de dispositifs de filtrage pour réduire la propagation des harmoniques produite par des charges non linéaires. Le filtre passif consiste à implanter en parallèle sur le réseau électrique une impédance de très faible valeur autour de la fréquence à filtrer ; [3]

Le but du filtrage est d'abaisser l'impédance harmonique du réseau à l'aide de filtres accordés sur les fréquences des harmoniques générés par la source perturbatrice. Son principe consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance de valeur très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau, il existe deux classes de filtres passifs permettant de réduire les harmoniques : [8]

- Le filtre passif résonant : est un filtre très sélectif. Il peut se connecter en parallèle avec d'autres filtres résonants ;
- Le filtre passif amorti : il est le choix préférable pour atténuer toute une bande de fréquence.

**I.4.1.2 Dépollution de tensions perturbées :** Les tensions perturbées dans un réseau électrique basse tension sont dues principalement aux creux de tension, aux tensions harmoniques et /ou déséquilibrés. Ces deux dernières sont généralement causées par la circulation des courants harmoniques et/ou déséquilibrés.

Pour dépolluer les réseaux électriques de ces deux types de perturbation, on peut limiter la circulation des courants perturbateurs en utilisant les solutions traditionnelles présentées précédemment dans le cas des perturbations de courant. [3] Quant aux creux de tension, la solution la plus fréquente pour les milieux sensibles (hôpitaux, sites industriels, etc.) est d'utiliser des groupes électrogènes qui se substituent au réseau

électrique. Mais la limitation de la puissance de ces groupes ainsi que la qualité médiocre de l'énergie électrique fournie restent un problème. [3]

Il est à noter que ses solutions traditionnelles connues pour leur simplicité d'implémentation, présentent des inconvénients tel que leur courte durée de vie et offrent très peu de flexibilité.

#### I.4.2 Solutions modernes :

Les filtres actifs constituent une alternative intéressante aux solutions traditionnelles, ils peuvent également être utilisés comme complément aux solutions traditionnelles de dépollution. Son rôle est de compenser en temps réel les perturbations, ils peuvent être en parallèle, série ou mixte.

**I.4.2.1 Filtre actif de puissance parallèle « FAP » :** le Filtre actif de puissance parallèle ou compensateur shunt « figure I-5 », se connecte en parallèle avec le réseau de distribution et injecte en opposition de phase, en temps réel les composantes harmoniques des courants absorbés par les charges non-linéaires. Ainsi, le courant fourni par la source d'énergie redevient sinusoïdal. [3]

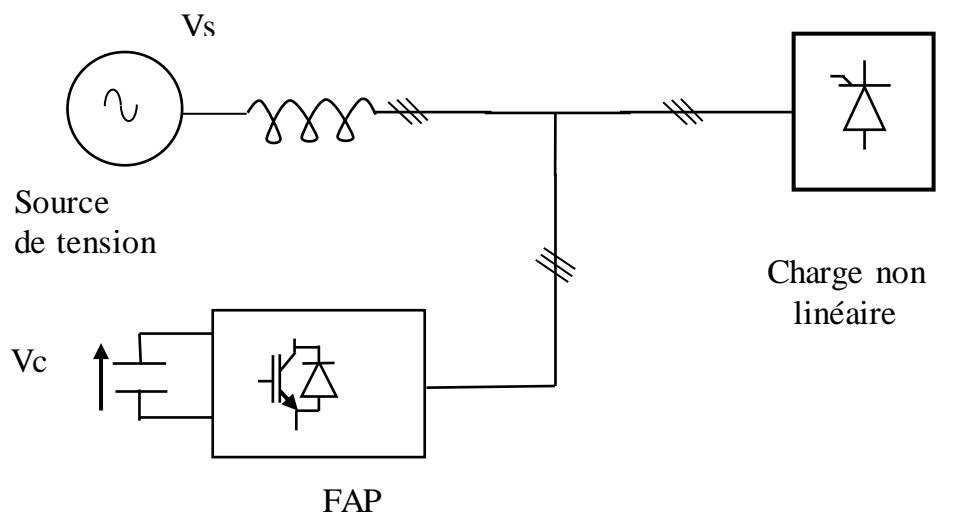
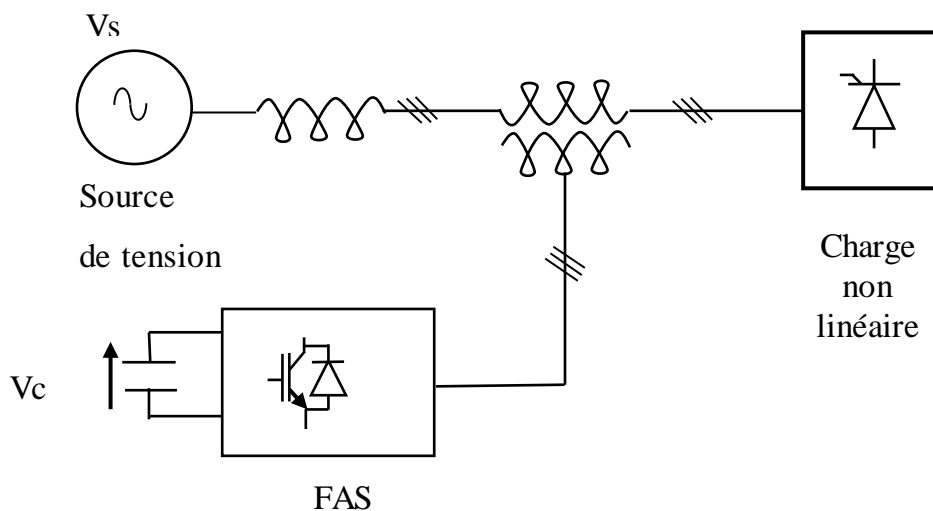


Figure I-5 : Filtre actif parallèle.

**I.4.2.2 Filtre actif série (F.A.S) :** Ce filtre est connecté en série sur le réseau *Figure I.6*, il se comporte soit comme une impédance infinie aux fréquences harmoniques et comme une impédance nulle à la fréquence fondamentale, soit comme un générateur de tension en opposition de phase avec la tension harmonique venant de la source. [1]

Il est destiné à protéger les installations sensibles aux perturbations provenant du réseau telles que les harmoniques en tension, déséquilibres et creux de tension. [19]



*Figure I-6 : filtre actif série.*

**I.4.2.3 Combinaison hybride active et passive :** Dans le but d'optimiser la performance et le coût, il existe des combinaisons mixtes de filtres actifs avec les filtres passifs, cette structure permet de réduire le coût du filtre actif en réduisant sa dimension, et d'optimiser ses performances grâce aux éléments passifs qui réduisent considérablement la puissance du convertisseur du filtre actif. [3] [10]

**I.4.2.3.1 Filtre actif de puissance série et filtre passif parallèle :** Le FAS est utilisé pour éliminer les problèmes engendrés par le filtre passif et améliorer les performances de compensation, il oblige les courants harmoniques à circuler dans le filtre passif. La *figure I.7* illustre cette topologie. [1] [9]

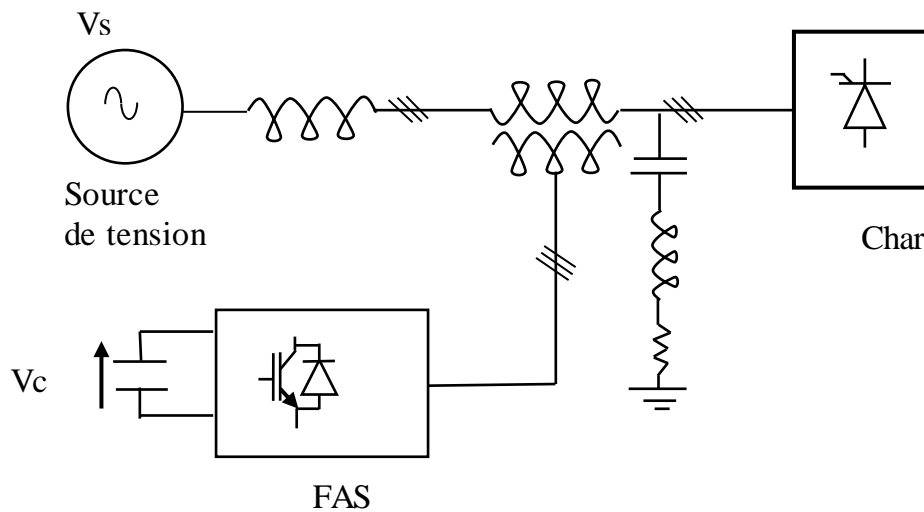


Figure I-7 : combinaison d'un filtre actifsérie avec un filtre passif parallèle.

I.4.2.3.2 **Filtre actif de puissance séries en série avec des filtres passifs parallèles :** Dans cette configuration le filtre actif est placée en série avec les filtres passifs parallèles, présentée en *figure I-8*, il a le même principe que la précédente avec l'avantage de réduire le dimensionnement du filtre actif série car le courant qui le traverse est plus faible, de plus en cas de court-circuit le filtre actif n'est pas affecter car ce dernier n'est plus connecté en série avec la charge. [1] [2] [3]

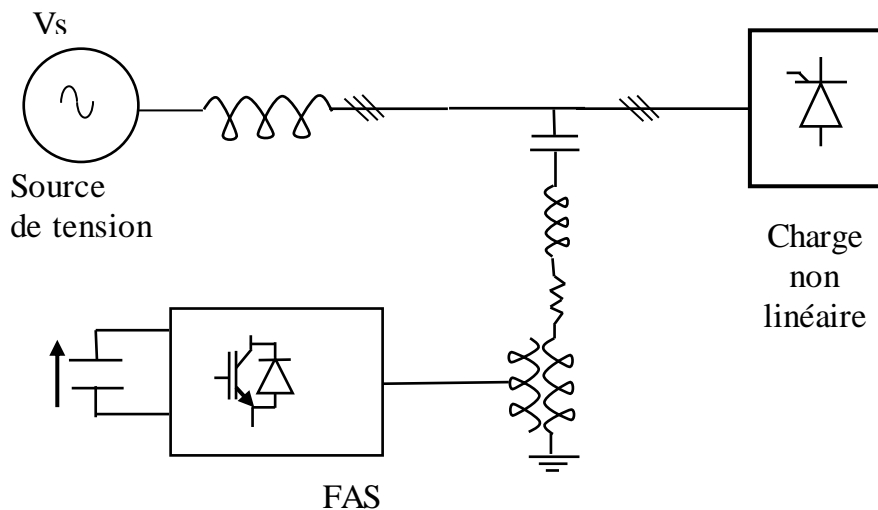
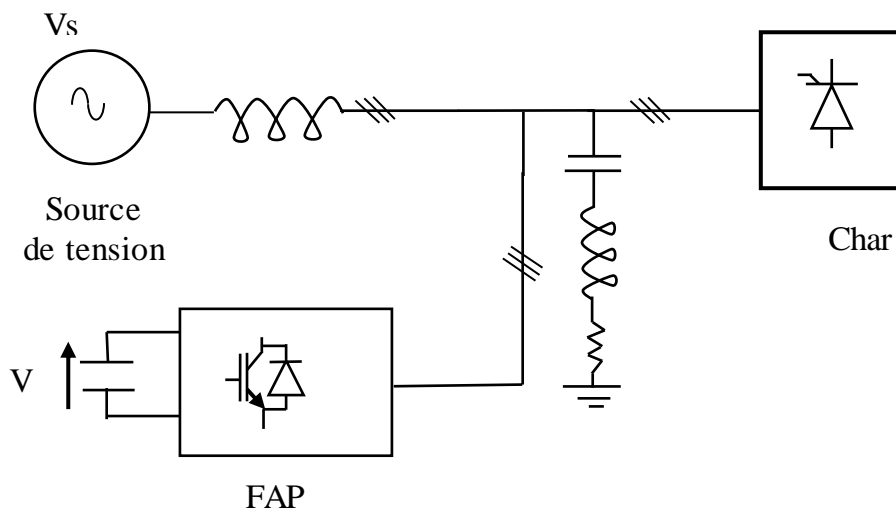


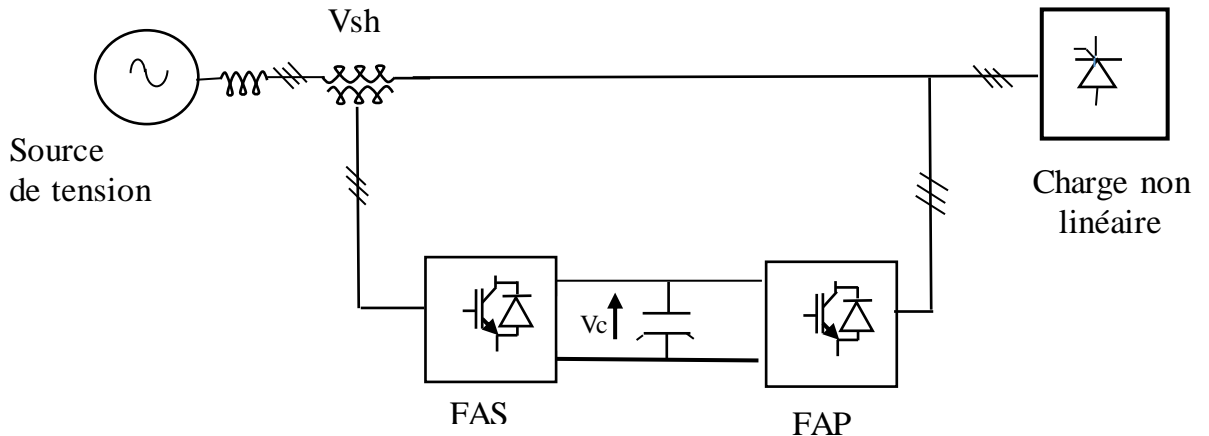
Figure I-8 : Filtre actifsérie connectée en série avec un filtre passif parallèle.

**I.4.2.3.3 Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle :** Dans cette configuration le filtre actif est placé en parallèle avec le filtre passif tous les deux sont connecté en parallèle avec la charge, comme le montre la *figure I-9*. Le filtre actif parallèle sert à compenser les courantes harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante alors que le filtre passif, accordé sur une fréquence harmonique élevée, permet de compenser les harmoniques hautes fréquences y compris ceux créés par le filtre actif parallèle. [3] [2]



*Figure I-9 : Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.*

**I.4.2.4 Conditionneur de puissance (UPQC) :** Le conditionneur de puissance « UPQC : Unified Power Quality Conditionner » est principalement la combinaison de deux filtres actifs série en assurant ainsi une tension réseau sinusoïdale et parallèle afin de maintenir le courant du réseau sinusoïdal qui partagent la même capacité sur le bus continu, comme la montre la *Figure I-10*.



*Figure I-10 : conditionneur actif de puissance.*

## I.5 Conclusion :

Après avoir présenté les différents types de perturbations qui peuvent apparaître dans les réseaux électriques, qu'elles soient de types courants ou tensions, ainsi que les normes relatives à la qualité de l'énergie pour le cas CEI et IEEE.

En se basant sur notre recherche bibliographique, nous avons présentés différentes topologies permettant d'éliminer ses différentes perturbation qu'elles soit traditionnels ou modernes, allant de l'emploi des inductances, capacités, transformateurs à l'utilisation des convertisseurs statique à travers les filtre actif parallèle, filtre actif série, combinaisons filtre actif parallèle/filtres passifs, filtre actif série/filtres passifs, pour enfin arrivé aux solutions universels pour compenser à la foi les perturbations de types courants et tensions : les conditionneurs de puissances « UPQC ».

Dans le chapitre suivant on se propose d'effectuer une étude détaillé sur les performances d'un filtre actif parallèle « étude et simulation d'un filtre actif parallèle ».



*Chapitre II*  
*Filtrage Actif de*  
*Puissance Parallèle*

## II.1 Introduction

Les nouvelles techniques de compensation des perturbations de types courants au niveau des réseaux électriques sont caractérisées principalement par les filtres actifs de puissance parallèles, à cet effet, nous nous proposons de faire la modélisation et la simulation d'un filtre actif de puissance parallèle sous environnement Matlab SimPower System.

## II.2 Filtre actif parallèle

Le filtre actif de puissance parallèle est une solution moderne et efficace pour restituer la forme sinusoïdale du courant provenant du réseau électrique lorsque celui-ci est déformé par une charge non linéaire. Il se comporte comme un générateur de courants harmoniques, commandé de façon à injecter au réseau des courants harmoniques égaux à ceux générés par la charge, mais de phase opposée. Le courant coté source sera ainsi sinusoïdal. [21]

## II.3 Structure générale du filtre actif parallèle

Le filtre actif parallèle en général est formé de deux parties essentielles une partie puissance et une partie contrôle commande *Figure II-1*. [3]

La partie puissance se compose de :

- Onduleur de tension.
- Circuit de stockage d'énergie.
- Filtre de sortie de nature inductive.

La partie contrôle se compose de :

- La commande de l'onduleur de tension.
- La régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie.
- Bloc d'identification de la perturbation des courants d'harmonique.

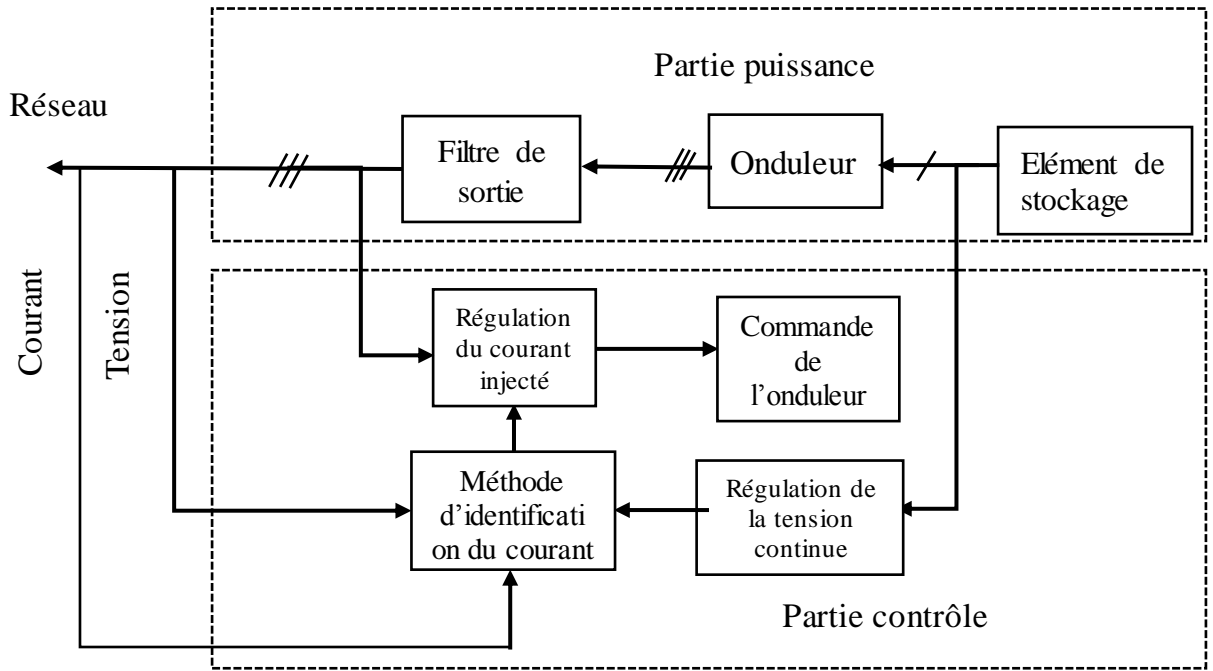


Figure II-1 : Structure générale du filtre actif.

## II.4 Partie puissance du filtre actif parallèle

Cette partie est constituée d'un onduleur de tension connecté en parallèle sur le réseau via un filtre de découplage ( $L_f, R_f$ ). La capacité  $C$  joue le rôle d'une source de tension continue. La tension  $V_{dc}$  aux bornes du condensateur doit être positive et maintenue constante par la commande. Ses fluctuations doivent être faibles d'une part pour ne pas dépasser la limite en tension des semi-conducteurs constituant les interrupteurs et d'autre part pour ne pas dégrader les performances du filtre actif. [18]

### II.4.1 Onduleur de tension

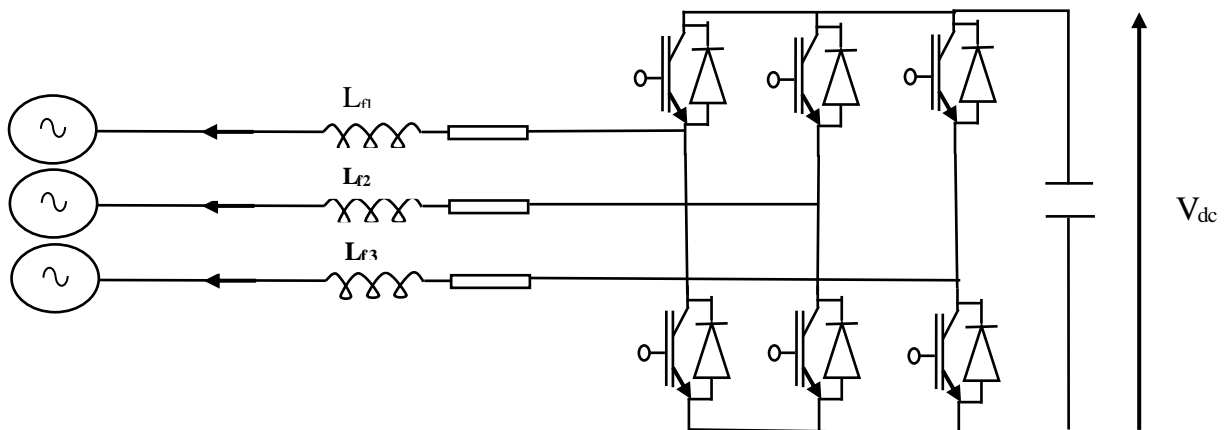


Figure II-2 : Onduleur de tension triphasé.

L'onduleur triphasé est constitué de six interrupteurs réversibles en courant. Ils sont réalisés par des semi-conducteurs commandables à l'ouverture et à la fermeture montés en antiparallèle avec une diode. [6] L'ouverture et la fermeture de ces interrupteurs dépendent de l'état des signaux de commande ( $S_1, S_2, S_3$ ) délivrés par le circuit de commande. [3]

$$\begin{aligned}
 S_1 &= \begin{cases} 1 & T_1 \text{ fermé et } T_4 \text{ ouvert} \\ 0 & T_1 \text{ ouvert et } T_4 \text{ fermé} \end{cases} \\
 S_2 &= \begin{cases} 1 & T_2 \text{ fermé et } T_5 \text{ ouvert} \\ 0 & T_2 \text{ ouvert et } T_5 \text{ fermé} \end{cases} \\
 S_3 &= \begin{cases} 1 & T_3 \text{ fermé et } T_6 \text{ ouvert} \\ 0 & T_3 \text{ ouvert et } T_6 \text{ fermé} \end{cases}
 \end{aligned} \tag{II.1}$$

Grâce au circuit de commande, une série d'impulsions rectangulaires à deux niveaux est générée pour alimenter la gâchette de notre onduleur.

#### II.4.2 Système de stockage de l'énergie

Le stockage de l'énergie est réalisé côté continu à l'aide d'un système de stockage capacitif, représenté par un condensateur  $C_{dc}$  qui joue le rôle d'une source de tension continue. [3]

Le choix des paramètres du système de stockage ( $V_{dc}$  et  $C_{dc}$ ) a une influence directe sur la dynamique du filtre actif de puissance parallèle et sur ses performances de compensation. [5]

### II.4.3 Filtre de sortie :

Le filtre de sortie d'un filtre actif de puissance parallèle est généralement un filtre du premier ordre ( $L_f, R_f$ ) qui se place entre l'onduleur et le réseau électrique « figure II.2 ». Ce filtre a un double rôle, il limite la dynamique du courant et réduit la propagation des perturbations sur le réseau électrique. [11]

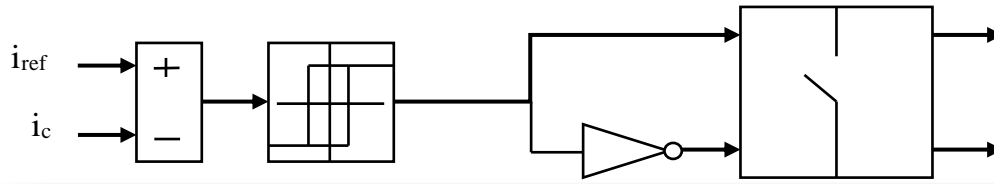
## II.5 Partie contrôle commande

On se propose d'étudier les éléments qui constituent la partie puissance du filtre actif parallèle.

### II.5.1 Commande de l'onduleur

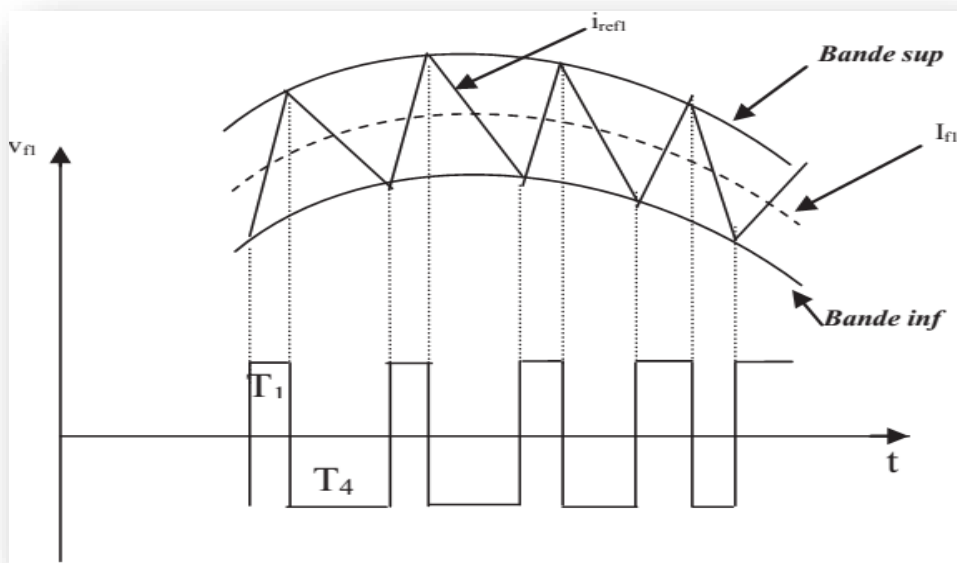
Le but de la commande de l'onduleur est le contrôle des courants à la sortie du filtre afin qu'ils suivent leurs références. Le principe est basé sur la comparaison entre les courants à la sortie du filtre actif et leurs références obtenues à partir des différentes méthodes d'extraction de ses courants. [13]

**Commande par hystérésis :** C'est une commande non-linéaire à fréquence de commutation variable permettant de fixer les ondulations de courants. Son objectif est de contrôler les courants de compensation en les forçant à suivre ceux de référence. Son principe consiste à établir dans un premier temps le signal d'erreur. L'erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis. Dès que l'erreur atteint la bande inférieure ou supérieure, un ordre de commande est envoyé de manière à rester à l'intérieur de la bande. Celui-ci peut être remédié par une autre version de contrôle par l'hystérésis avec une fréquence de commutation fixe. Un système de base pour le contrôle de la bande d'hystérésis est représenté sur la Figure II-3. [3]



**Figure II-3 : Commande par hystérésis.**

Cette technique peut être caractérisée par une bande d'hystérésis qui est le seul paramètre de contrôle de courant de chaque bras de l'onduleur. Les signaux de sortie des comparateurs à hystérésis sont utilisés pour commander l'ordre de commutation des interrupteurs de chaque bras de l'onduleur. Le courant de compensation va rester dans une bande autour du signal de référence Figure II-4. [12]



**Figure II-4 : Commande des interrupteurs par hystérésis.**

### II.5.2 Identification des courants perturbateurs

La théorie des puissances instantanées p-q est définie dans le domaine temporel. L'algorithme de la théorie de puissances instantanées est basée essentiellement sur le

principe de la puissance active  $p(t)$  et réactive  $q(t)$  instantanées afin d'extraire les composantes continue et oscillatoires. [22]

La théorie p-q est basée sur la transformation  $\alpha\beta 0$ , qui consiste en une matrice réelle pour transformer les tensions et courants du système triphasés équilibré (abc) à un système biphasé ( $\alpha\beta$ ) en appliquant la transformation de Concordia, ce qui permet d'écrire la relation des tensions suivante :

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

Et la relation des courants ci-dessous :

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

Et sa transformation inverse :

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

A partir des vecteurs  $[v_{\alpha, \beta}]$  et  $[i_{\alpha, \beta}]$  décrivant le système des tensions et courants dans le repère ( $\alpha$ - $\beta$ ). On introduit une décomposition de puissances instantanées dans le plan ( $\alpha$ - $\beta$ ). Les puissances réelle et imaginaire instantanées, sont définies par la relation suivante :

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

D'autre part, les puissances réelles et imaginaires peuvent être représentées comme suit:

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

Avec :

$\bar{p}, \bar{q}$ : Les composants continus de p et q.

$\tilde{p}, \tilde{q}$ : Les composants alternatifs de p et q.

A partir de l'équation (II.5), nous pouvons déduire les expressions des composantes du courant de charge selon les axes ( $\alpha$ - $\beta$ ) (II.7) :

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

Dans notre cas on va compenser les harmoniques de courant et l'énergie réactive, donc l'équation (II.7) devient :

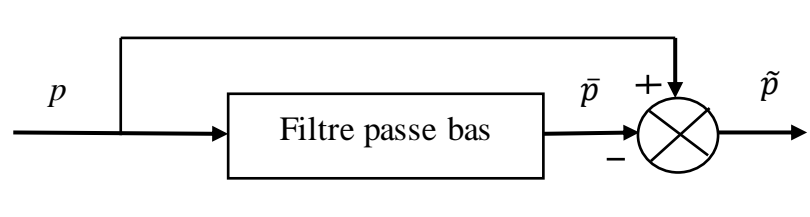
$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

Pour la séparation des composantes continues et oscillatoires de « p », on élimine la composante oscillatoire à l'aide d'un filtre passe haut FPH « figure II-4 », et après on ajout la puissance active  $p_c$  nécessaire à la régulation de la tension  $v_{dc}$  au borne de notre condensateur.

$$\begin{bmatrix} i_{ref\alpha} \\ i_{ref\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} + p_c \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

Enfin pour obtenir les courants de référence en repère (a, b, c) on utilise la transformation inverse de Concordia (II.4).

**Filtre passe bas :**



**Figure II-5 : Filtre passe haut équivalent.**

Nous avons choisi pour l'extraction des composants continue un filtre passe bas du second ordre pour séparer la composante continue de la composante oscillatoire de la puissance active instantanée [17].



$$F_{pb} = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (\text{II.10})$$

La figure II.6 illustre l'identification des courants de référence lors de la compensation simultanée des courants harmoniques et de l'énergie réactive par la méthode des puissances instantanées, la régulation de la tension continue de  $v_{dc}$  sera étudiée dans la section II.5.3 .

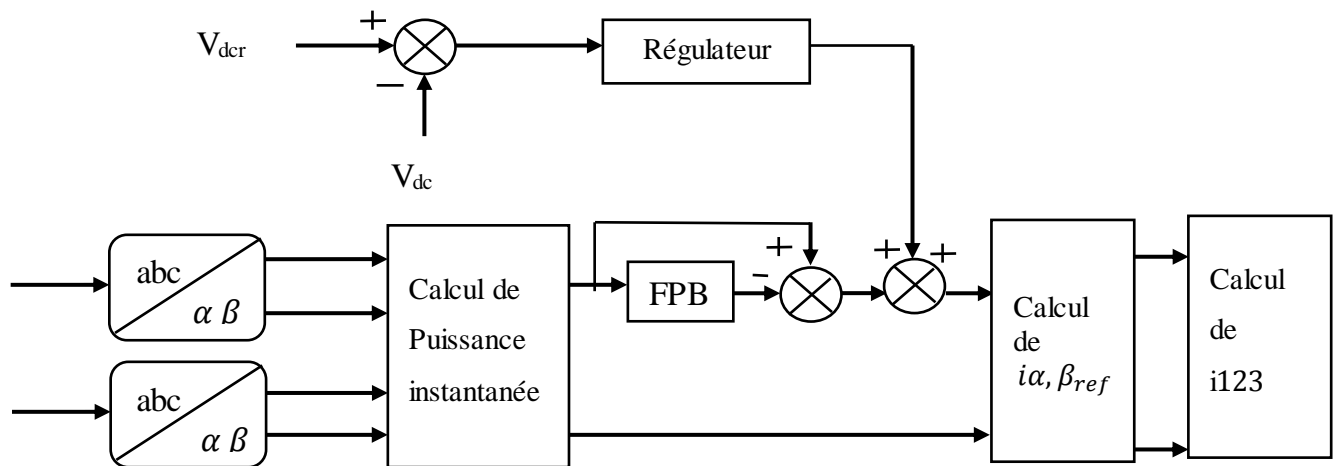


Figure II-6 : Schéma de principe de la méthode des puissances instantanées.

### II.5.3 Régulation de tension continue

La tension moyenne  $V_{dc}$  aux bornes du condensateur doit être maintenue à une valeur constante. Les principales causes susceptibles de la modifier sont les pertes dans le filtre actif. La régulation de la tension moyenne aux bornes du condensateur de stockage d'énergie doit se faire par l'adjonction des courants fondamentaux actifs dans les courants de référence. [3]

La puissance active  $p_f$  nécessaire pour rétablir la tension du filtre à une valeur constante est donnée par l'expression :

$$p_f = p_c - p_s \quad (\text{II.11})$$

Avec :  $p_f$  : Puissance instantanée injectée par le compensateur ;  $p_c$  : Puissance active consommée par la charge ;  $p_s$  : Puissance active délivrée par la source.

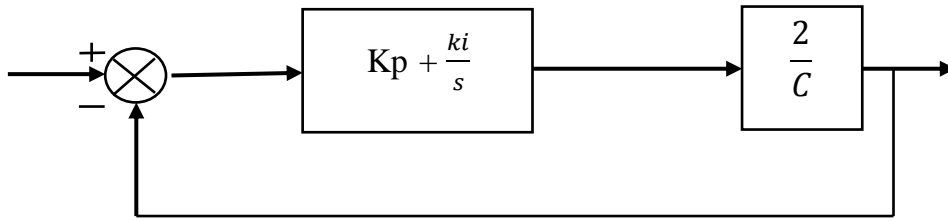


Figure II-7: Boucle de réglage de tension continu  $V_{dc}$

La fonction de transfert (régulateur plus système) en boucle fermée est :

$$F_{pb} = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (\text{II.11})$$

$$k_i = \frac{\omega_c^2 \times C}{2} \quad (\text{II.12})$$

$$K_p = \xi \times \omega_0 \times C \quad (\text{II.13})$$

## II.6 Description de simulation

Nous appliquons la loi de commande citée ci-dessus à un filtre actif de puissance parallèle pour éliminer les perturbations de type courant coter charge. La structure du schéma globale est constituée d'une source de tension triphasée avec une impédance  $R_s$ ,  $L_s$ , une charge non linéaire représentée par un pont redresseur à diodes débitant sur un circuit  $R_{ch}$ - $L_{ch}$  et un compensateur actif de puissance connecté en parallèle avec le réseau électrique.

## II.7 Simulation d'une charge triphasée équilibrée

Nous présentons dans cette partie les résultats des simulations d'un filtre actif parallèle avec la commande des puissances instantané.

## II.7.1 Avant filtrage

### II.7.1.1 Model de simulation

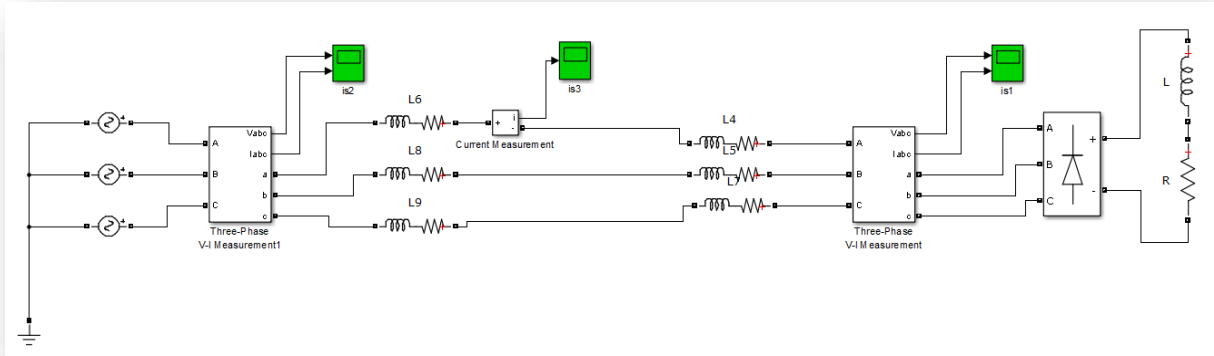


Figure II-8 : la source et la charge du réseau triphasé.

### II.7.1.2 Paramètre de simulation

Tableau II-1: paramètre du réseau électrique

$V_s$ (v)	$R_s$ (m $\Omega$ )	$L_s$ ( $\mu$ H)	$R_c$ (m $\Omega$ )	$L_c$ ( $\mu$ H)	$R_{ch}$ ( $\Omega$ )	$L_{ch}$ ( $\mu$ H)
230	1.59	45.56	2.73	23.19	0.79	2.6

### II.7.1.3 Résultat de simulation : La tension coté source est sinusoïdale et équilibré :

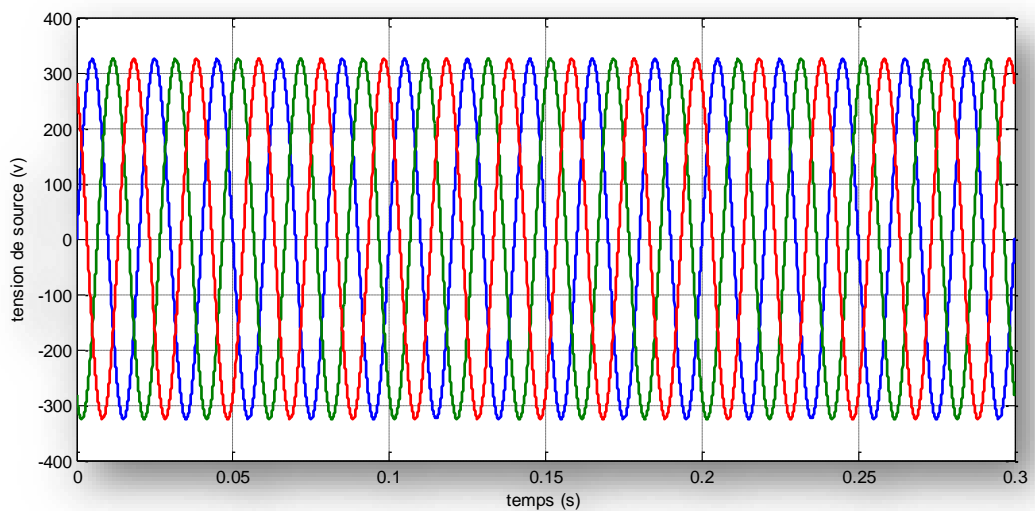
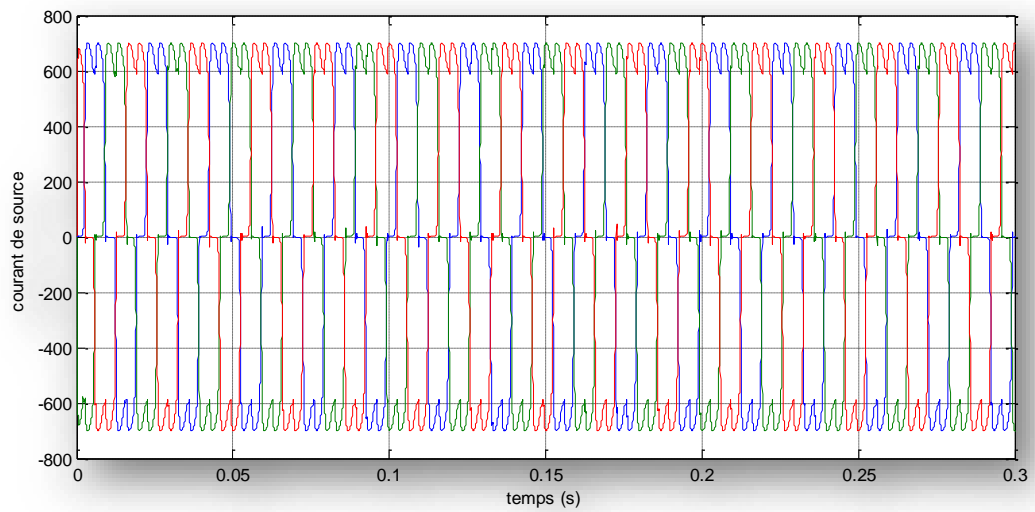
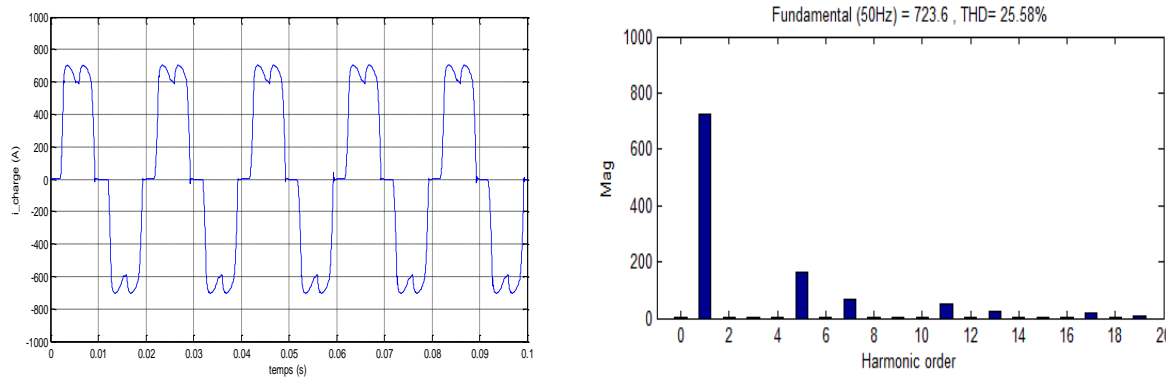


Figure II-9 : Tension triphasé côté source.

Le courant de source triphasé :



**Figure II-10 : courant de source triphasé.**



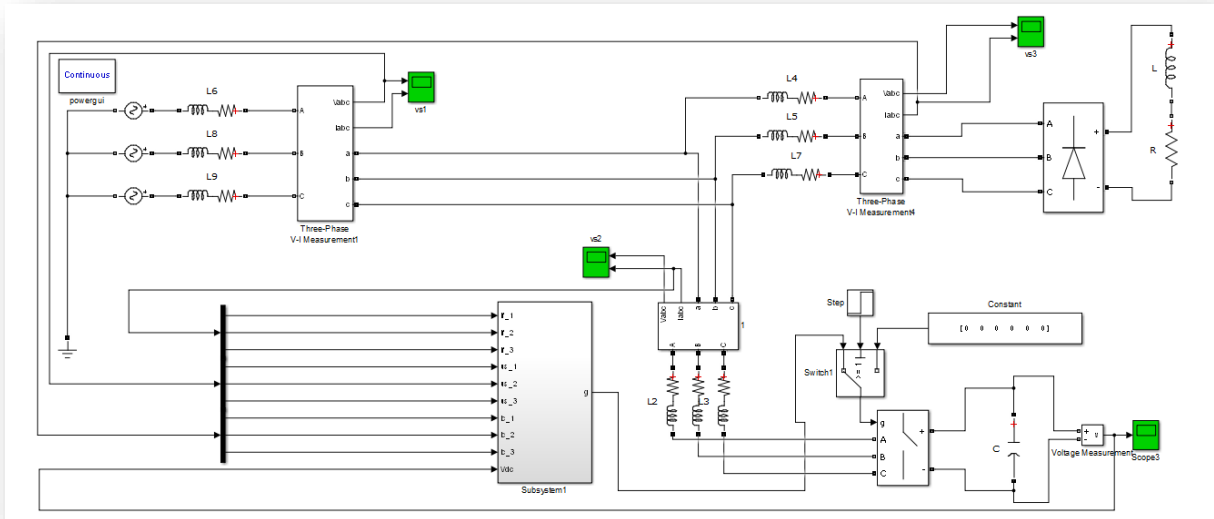
**Figure II-11 : Courant de la phase 1 et son spectre de THD.**

La figure précédente présente le courant de la charge *ich1* et son spectre harmonique. Le THD en courant pour cette charge est de 25,58 %. Le but du filtrage actif est de ramener ce THD à une valeur inférieure à 5 %, comme l'impose la norme CEI.

Maintenant, nous allons présenter les résultats de simulation avec le filtre actif de commande présenté auparavant.

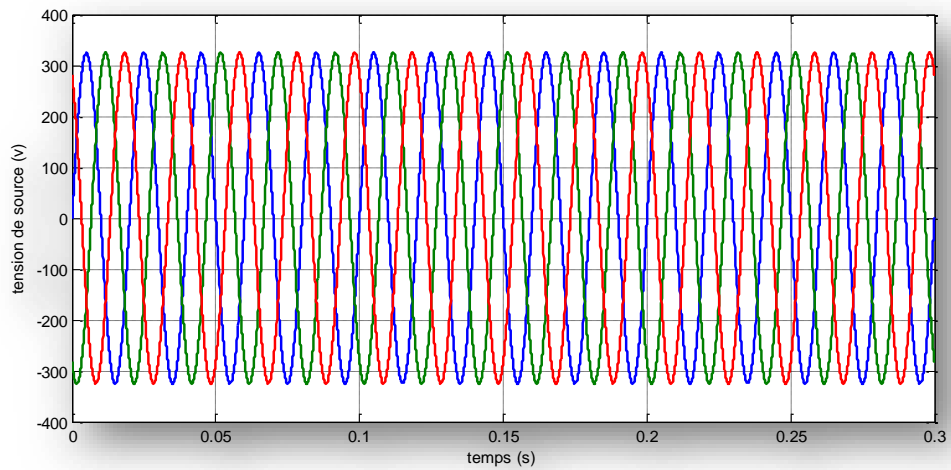
## II.7.2 Après filtrage

### II.7.2.1 Model de simulation

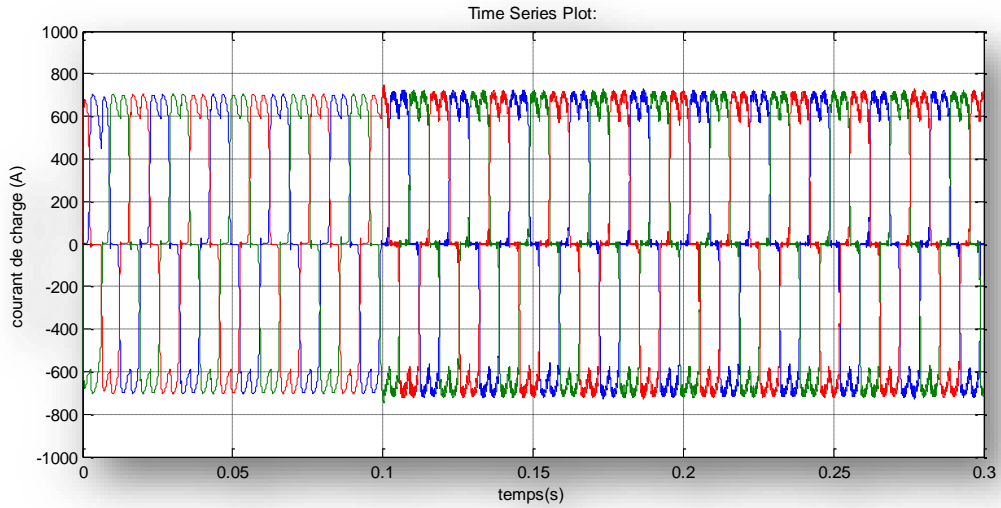


*Figure II-12 : Système complet la source, la charge et le filtre actif parallèle.*

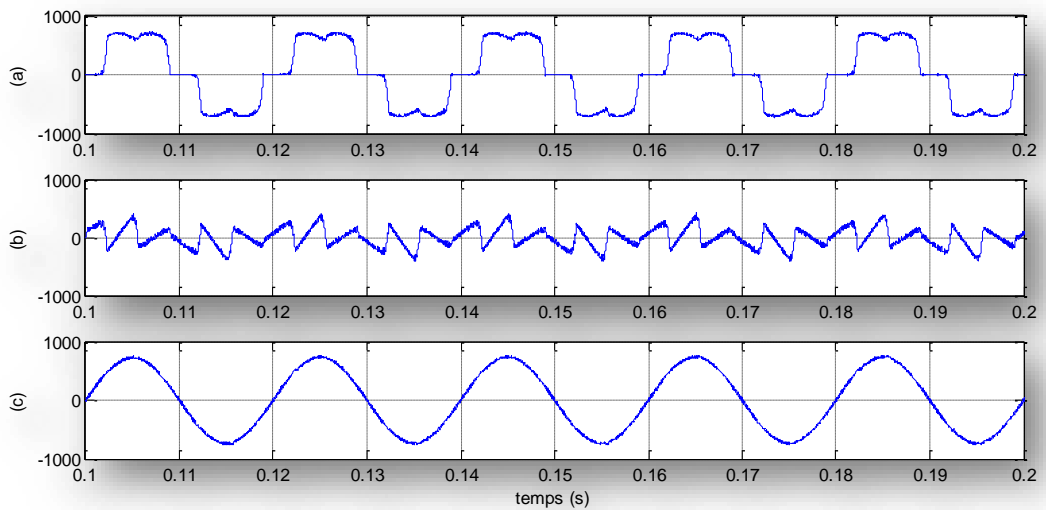
Les résultats de simulation que nous obtenons sont comme suite :



*Figure II-13 : Tension de source.*



**Figure II-14 : Courant de charge.**



**Figure II-15: (a) : courant de charge de la 1ère phase ; (b) courant injecté par le filtre ; (c) : courant de source de la 1ère phase.**

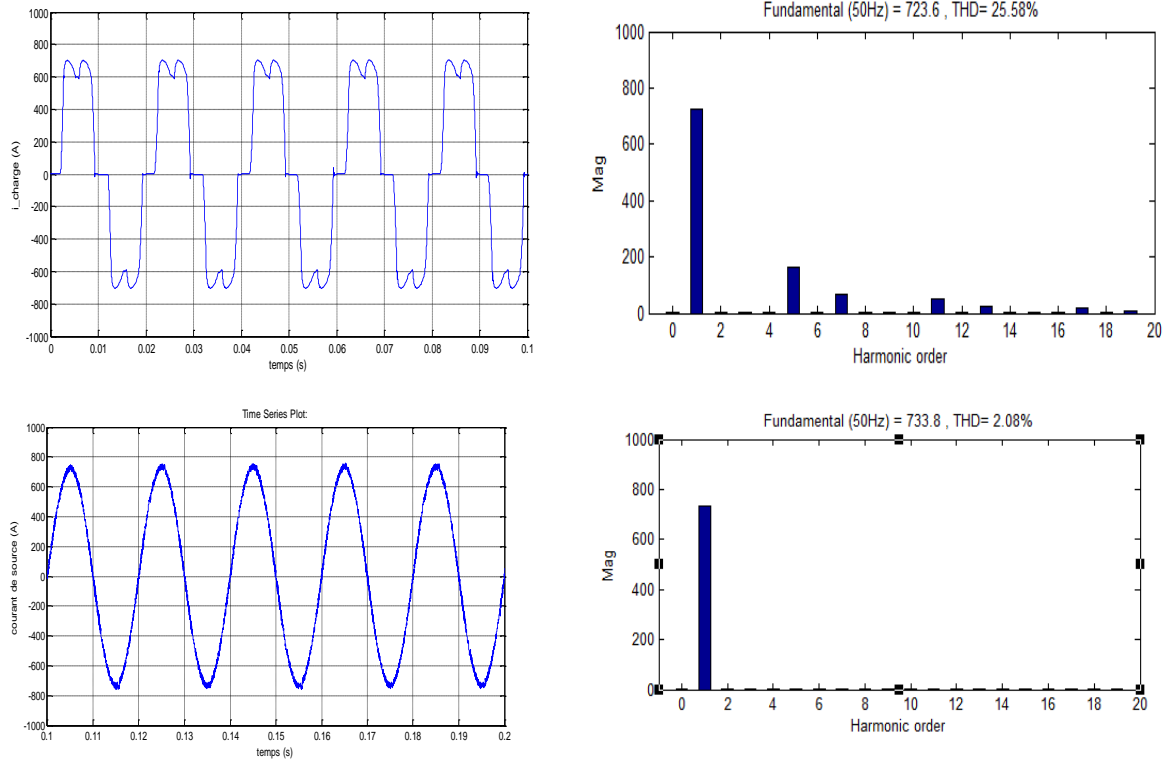


Figure II-16 : Courant de charge et source et leurs spectres de THD.

Ce filtre permet une réduction des harmoniques de courant. La valeur du THD est réduite à 2,08 % après filtrage. Nous remarquons que le filtre actif de puissance parallèle élimine très bien les harmoniques de courant.

## II.8 Simulation d'une charge triphasé déséquilibré

### II.8.1 Modèle de simulation

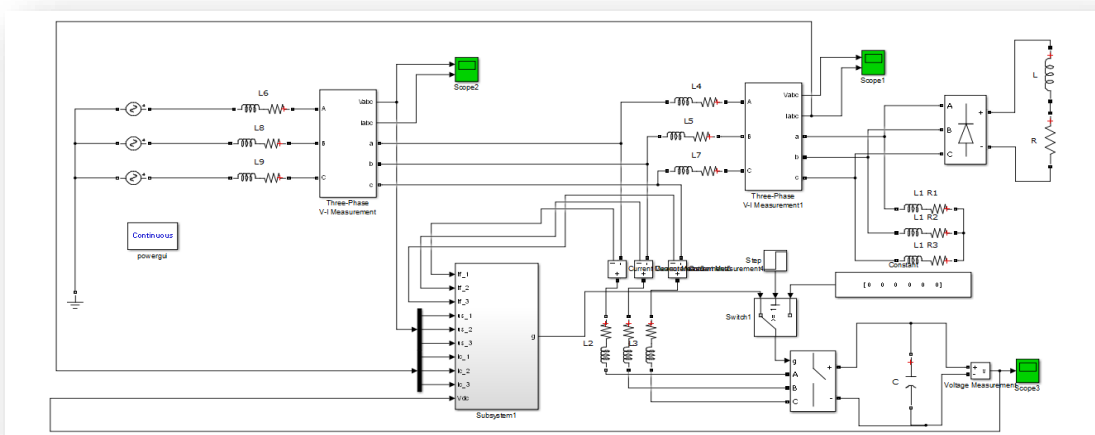


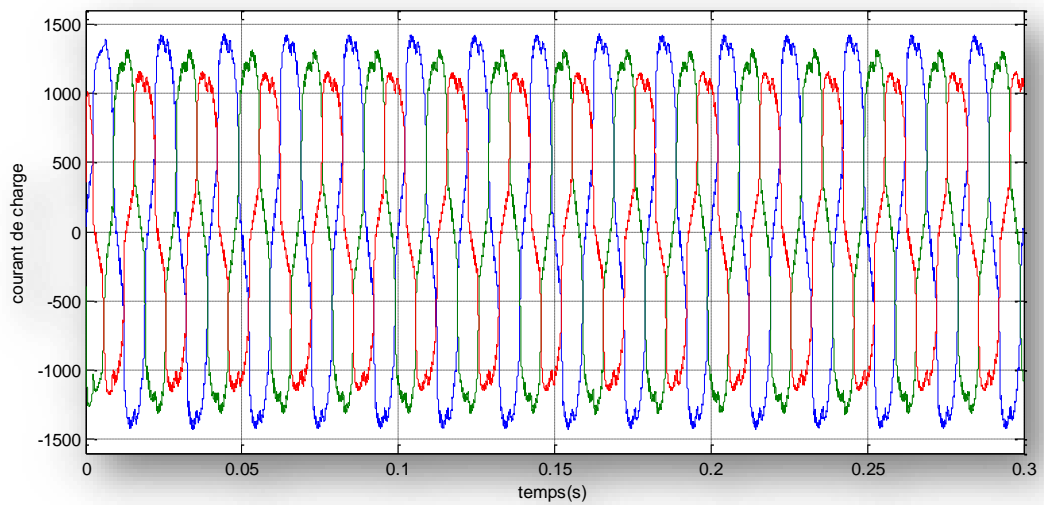
Figure II-17 : Système complet la source, la charge et le filtre actif parallèle.

## II.8.2 Paramètre de simulation

*Tableau II-2: paramètre du réseau électrique.*

$V_s$ (v)	$R_s$ (m $\Omega$ )	$L_s$ ( $\mu$ H)	$R_c$ (m $\Omega$ )	$L_c$ ( $\mu$ H)	$R_{ch}$ ( $\Omega$ )	$L_{ch}$ ( $\mu$ H)	$R_1$ ( $\Omega$ )	$R_2$ ( $\Omega$ )	$R_3$ ( $\Omega$ )	$L_{123}$ ( $\mu$ H)
230	1.59	45.56	2.73	23.19	0.79	2.6	0.3	0.6	0.9	23.19

## II.8.3 Résultat de simulation



*Figure II-18 : Courant de charge.*



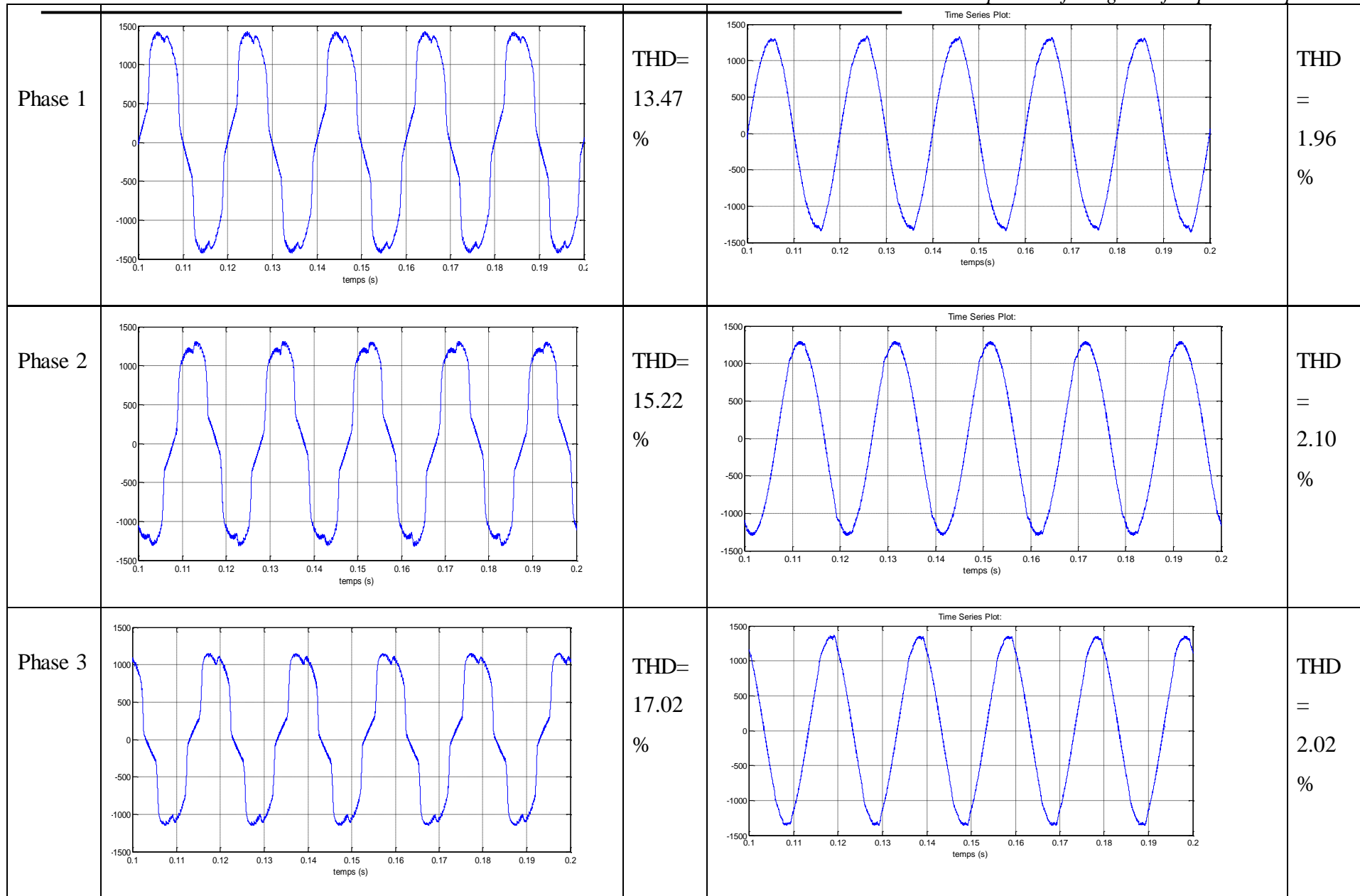


Figure II-19: courant de charge et source pour chaque phase.

Courant de source triphasé :

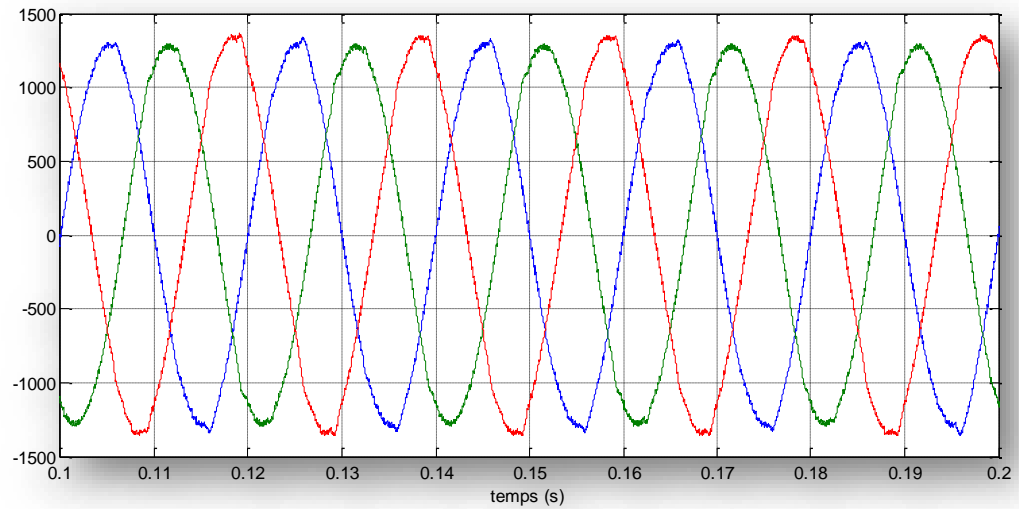


Figure II-20: courant de source

Ce filtre permet une réduction des harmoniques de courant pour les trois phases. La valeur du THD est réduite après filtrage. Nous remarquons que le filtre actif de puissance parallèle élimine très bien les harmoniques de courant et les rend plus équilibrés.

## II.9 Simulation des 3 charges monophasées équilibrées

### II.9.1 Modèle de simulation

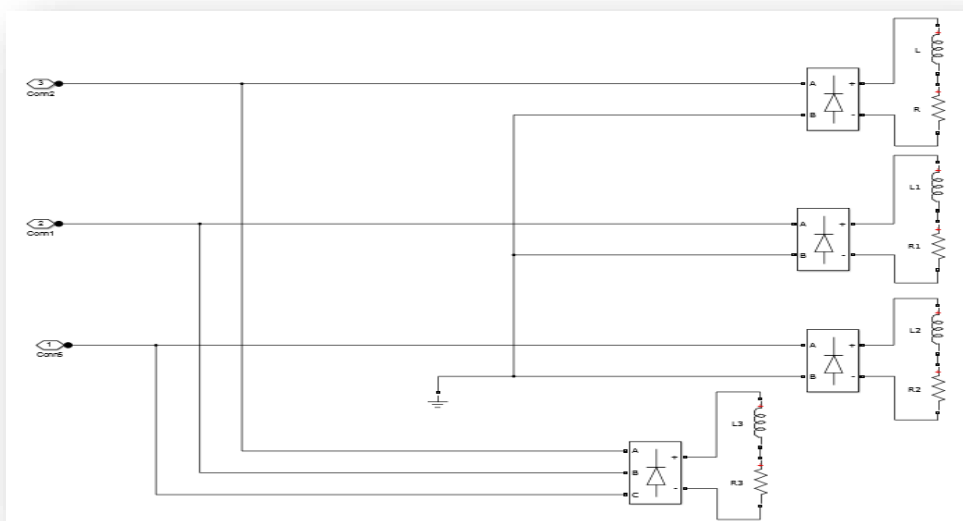


Figure II-21 : Modèle de charges.

## II.9.2 Résultat de simulation

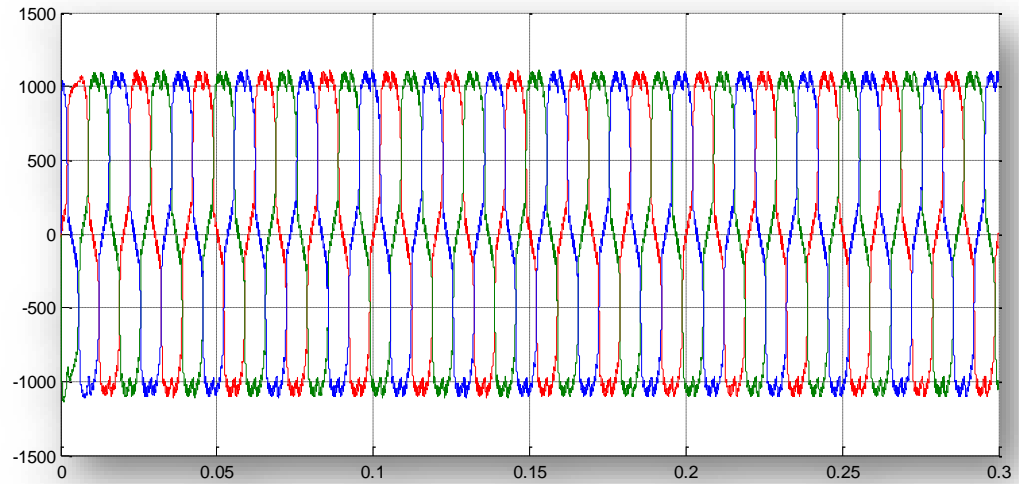


Figure II-22: Courant de charge pour les trois phases.

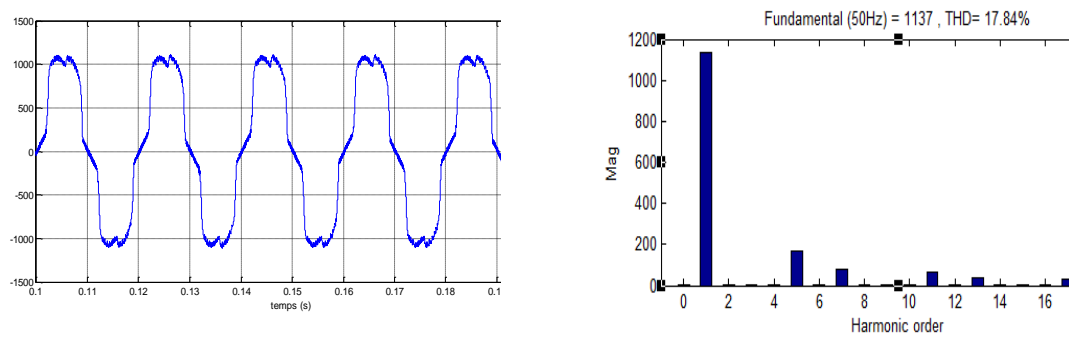


Figure II-23: Courant de charge (phase 1) et son spectre d'harmonique.

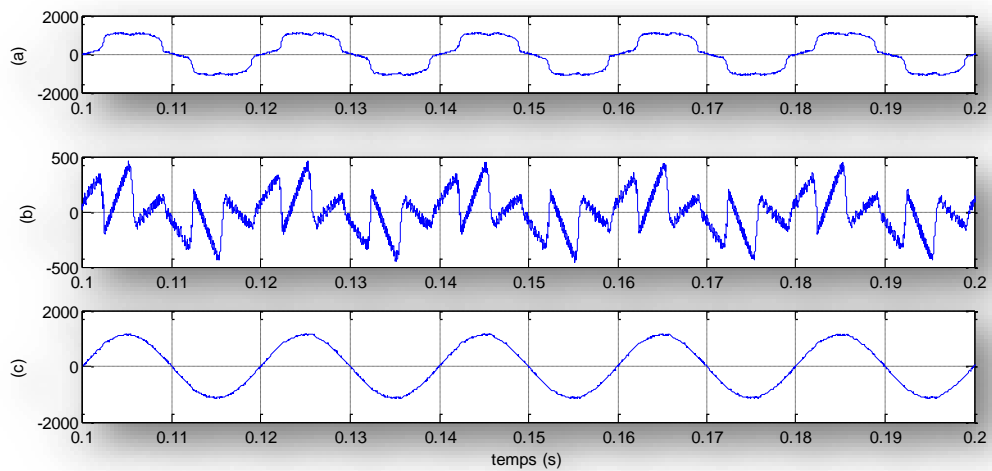
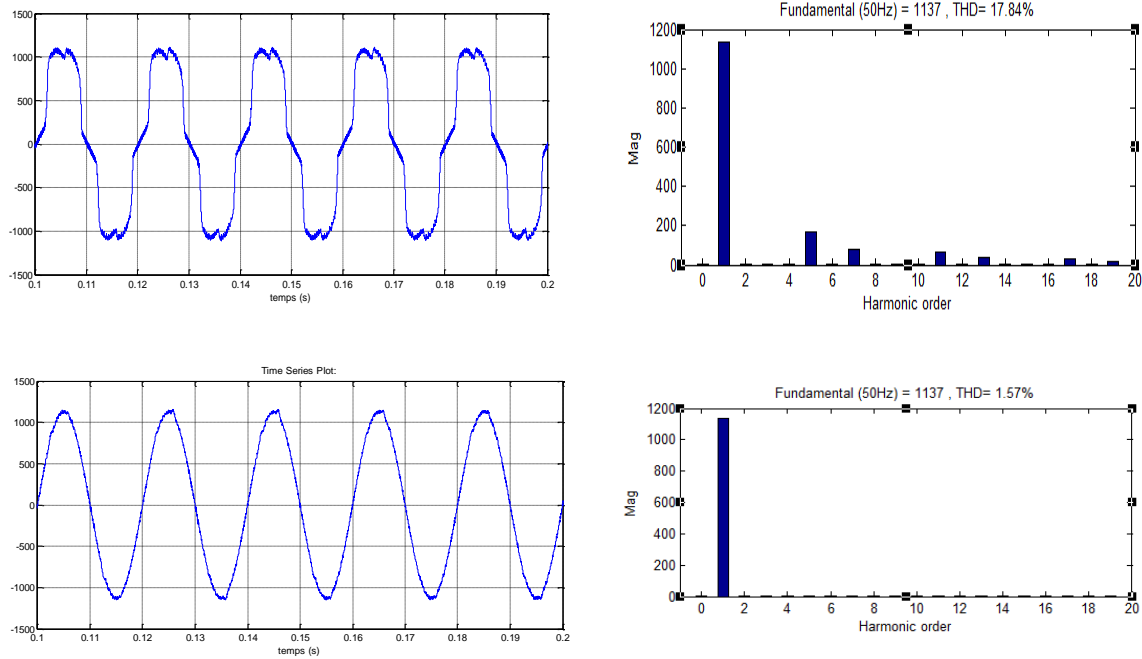


Figure II-24: (a) : courant de charge de la 1ère phase ; (b) courant injecté par le filtre ; (c) : courant de source de la 1ère phase.



**Figure II-25 : Courant de charge et son spectre harmonique et le courant de source et son spectre harmonique**

Ce filtre permet une réduction des harmoniques de courant. La valeur du THD est réduite à 1.57 % après filtrage. Nous remarquons que le filtre actif de puissance parallèle élimine très bien les harmoniques de courant.

**Tableau II-3 : Récapitulatif des résultats de simulation.**

	<b>THD (sans filtrage)</b>	<b>THD (avec filtrage)</b>
Charge triphasé équilibré	25.58%	2.08%
Charge triphasé déséquilibré	13.47%	1.96%
Charges monophasées équilibrées	17.84%	1.57%

## II.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté, la plupart des éléments constituant la structure du filtre actif parallèle. Cette structure a été partagée en deux parties à savoir la partie puissance et la partie contrôle-commande. Le choix des éléments de la partie contrôle-commande, tels que la méthode d'identification des courants perturbés, la commande de l'onduleur et la régulation de la tension continue, de même que ceux de la partie puissance, comme l'onduleur, l'élément de stockage et filtre de sortie ont été fixés.

Nous avons présenté aussi la stratégie de commande de l'onduleur « hystérésis », couramment utilisée dans les applications des filtres actifs.

Ce chapitre nous a permis de valider le modèle de notre filtre actif parallèle pour la suite de notre mémoire.

On se propose pour le troisième chapitre de le consacrer à l'étude de commande et simulation de filtre actif série.

*Chapitre III*  
*Filtrage actif de*  
*puissance série*

### **III.1 Introduction**

L'objectif de ce chapitre est d'effectuer la validation suite à l'étude et la simulation d'un filtre actif série «FAS». En vue de dépolluer les réseaux électriques de perturbations de type tension.

### **III.2 Filtre actif série**

Le filtre actif série est une solution adaptée pour protéger des charges sensibles contre les perturbations de tension du réseau électrique. Il s'insère entre le réseau perturbé et la charge à protéger par l'intermédiaire d'un transformateur d'injection de tension.

### **III.3 Principe de fonctionnement d'un Filtre Actif Série**

Le filtre actif série est une solution pour protéger des charges sensibles contre les perturbations de tension du réseau électrique. Il s'insère entre le réseau perturbé et la charge à protéger par l'intermédiaire d'un transformateur d'injection de tension. Le schéma de principe d'un filtre actif série est donné par la Figure III-1, il est composé principalement de deux blocs l'un de puissance l'autre de commande. Le bloc puissance est constitué le plus souvent d'un convertisseur de tension triphasé deux ou trois-niveaux, d'un système d'alimentation en tension continue, d'un filtre de sortie et de trois transformateurs monophasés d'injection de tension. Le bloc commande consiste en l'identification des tensions perturbatrices et du contrôle des tensions injectées au réseau. [11]

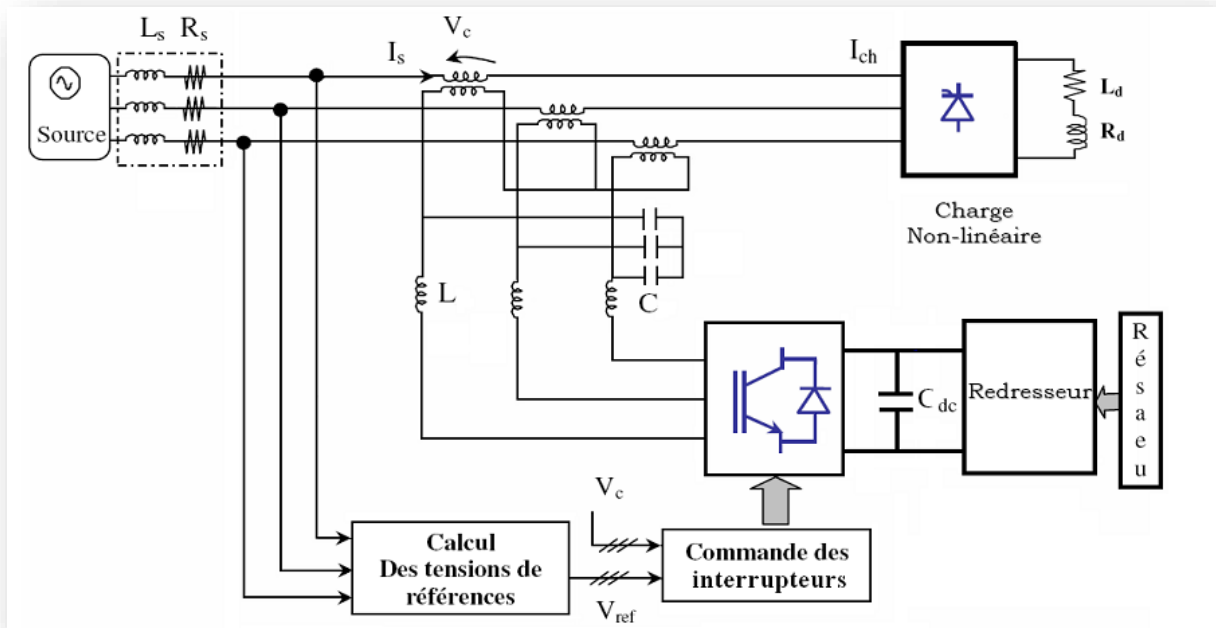


Figure III-1 : Schéma de principe d'un filtre actif de puissance série.

### III.4 Structure générale du filtre actif série

Le filtre actif série est connecté en série avec le réseau de distribution et permet de protéger la source vis-à-vis des différentes perturbations en provenance de la charge non-linéaire.

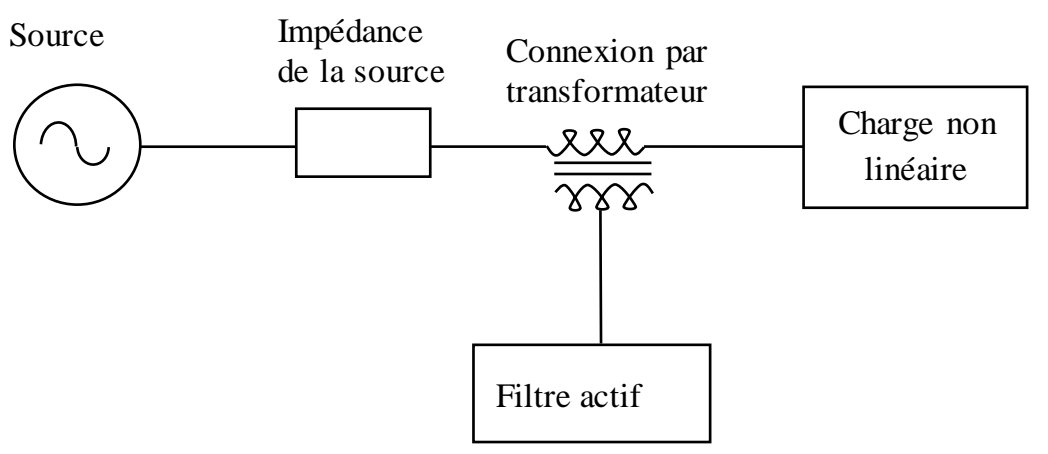


Figure III-2 : Principe du filtrage actif de puissance série.



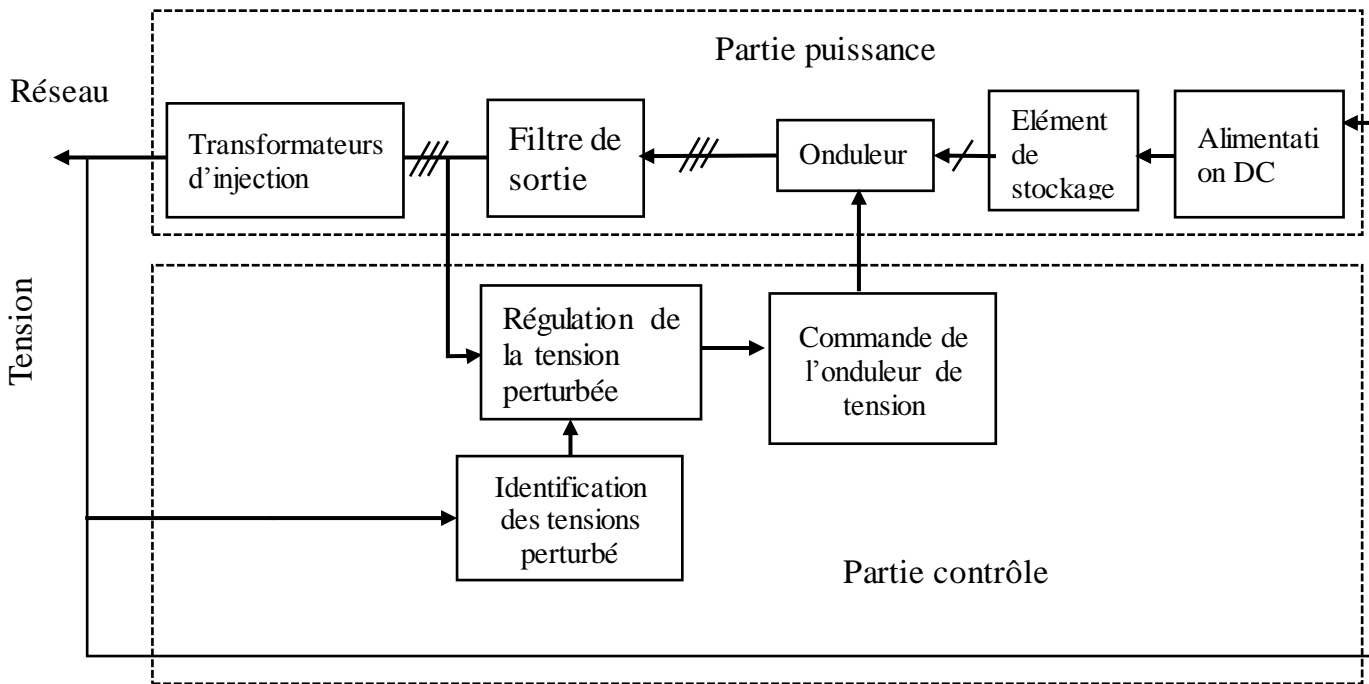


Figure III-3 : Structure générale du filtre actif de puissance série

Afin de mieux comprendre cette structure, les parties puissance et contrôle-commande sont les suivant :

### III.4.1 Partie puissance du filtre actifsérie

**III.4.1.1 Onduleur de tension :** L'onduleur de tension fait l'interface entre deux types de source :

- **Une source de courant côté alternatif :** la source de courant côté alternatif ne doit jamais être en circuit ouvert, le courant circulant doit toujours trouver un chemin libre d'où la mise en antiparallèle de diodes avec les interrupteurs.
- **Une source de tension côté continu :** la source de tension aux bornes de l'onduleur ne doit jamais être court-circuitée, les deux interrupteurs d'un même bras doivent donc avoir deux commandes complémentaires

La présence de ces deux sources implique de respecter, certaines règles de fonctionnement

**III.4.1.2 Transformateurs d'injection et protection du F.A.S :** Les transformateurs d'injection de tension permettent d'injecter en série avec le réseau électrique et avec le taux de transformation souhaité la tension produite par l'onduleur.

Ces transformateurs, considérés comme des transformateurs de courants, permettent de réduire, par leurs taux de transformation, le courant de la charge traversant l'onduleur de tension. [3]

Les désavantages de l'emploi de ces transformateurs sont leurs coûts élevés et la chute de tension occasionnée par leurs inductances de fuite ( $L$ ,  $R$ ) pour les systèmes de grande puissance.

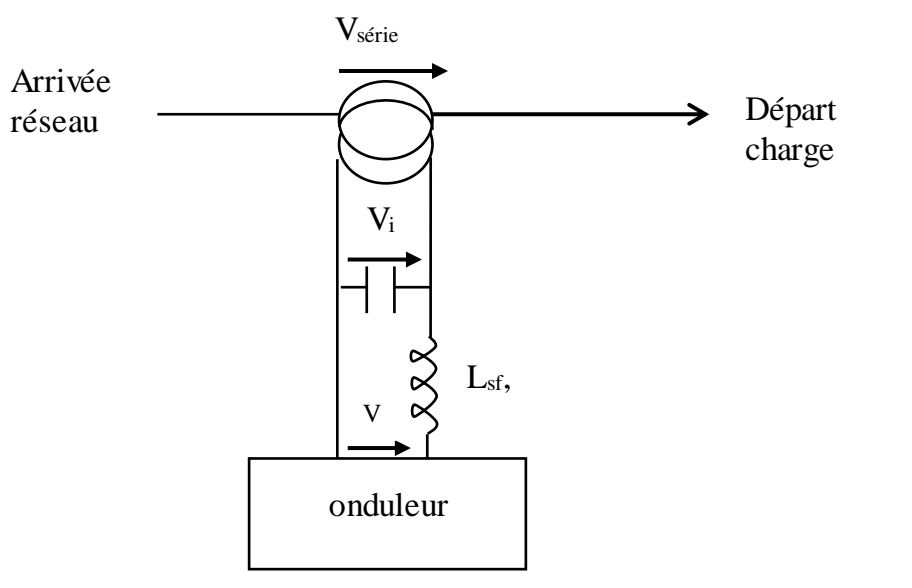
Le choix d'un filtre actif série sans transformateur d'injection nécessite l'emploi de trois onduleurs de tension monophasés avec trois sources continues indépendantes, cette solution augmentant l'énergie nécessaire pour compenser les mêmes creux de tension. [5]

**III.4.1.3 Système de stockage de l'énergie :** Le stockage de l'énergie est réalisé côté continu à l'aide d'un système de stockage capacitif, donne la possibilité de mesurer, aux bornes des condensateurs, une tension continue  $V_{dc}$  sans fluctuation. [5] [11]

Le choix des paramètres du système de stockage ( $V_{dc}$  et  $C_{dc}$ ) a une influence directe sur la dynamique du filtre actif série et sur ses performances de compensation.

D'une part, une tension  $V_{dc}$  élevée améliore la dynamique du filtre actif série. Une valeur élevée de  $C_{dc}$  réduit les ondulations de  $V_{dc}$  mais augmente le coût et la taille du filtre actif série. [5]

**III.4.1.4 Filtre de sortie :** Le filtre de sortie d'un filtre actif série est généralement un filtre passif du deuxième ordre ( $L_{sf}$ ,  $R_{sf}$ ,  $C_{sf}$ ), comme le montre la Figure III-3. L'ensemble onduleur/filtre de sortie se comportant comme une source de tension, il est placé à la sortie du convertisseur afin d'atténuer les ondulations à hautes fréquences à cause de la commutation et à l'obtention d'une tension de compensation de meilleure qualité, et d'autre part à connecter le filtre actif au réseau électrique. [3] [11]



*Figure III-4 : Schéma de modélisation du filtre de sortie.*

### III.4.2 Partie contrôle commande

Dans cette partie, nous allons présenter les principaux éléments de la partie contrôle commande du filtre actif série : Commande de l'onduleur, l'identification des tensions perturbatrices de la composante fondamentale directe de la tension du réseau électrique et la régulation des tensions injectées au réseau électrique.

**III.4.2.1 Commande de l'onduleur :** L'onduleur de tension est commandé par hystérésis, son objectif est de déterminer les instants d'ouverture et de fermeture des interrupteurs qui le composent de façon à obtenir une tension de sortie synthétisant les perturbations mais en opposition de phase.

Cette commande utilise l'erreur existante entre le signal de référence et la mesure du signal de sortie, on le compare avec la bande d'hystérésis, le choix de cette bande doit tenir compte d'un certain nombre de conditions liées au fonctionnement de l'onduleur.

Pour la simulation du filtre actif série, on va utiliser ce type de commande car sa simplicité et son temps de réponse réduit, donne de meilleures performances dynamiques et statiques.

**III.4.2.2 Identification des tensions perturbatrices :** L'identification des tensions est utilisée pour calculer les tensions qui sont injectées par le filtre actif série, plusieurs méthodes ont été étudiées parmi elles la théorie des puissances instantanées :

**III.4.2.2.1 Méthodes des puissances active et réactive instantanées (PQ) :** Dans chaque phase, la tension de référence est définie comme étant la différence entre les composantes harmoniques contenues dans la tension de source et celles de la charge non linéaire.

On utilise dans cette méthode les valeurs instantanées des tensions et courants mesurés, elle est basée sur la détermination de la tension fondamentale et de la tension harmonique d'une tension du réseau perturbé. [14]

Comme montré dans le chapitre précédent la théorie p-q est basée sur la transformation  $\alpha\beta_0$ , qui consiste en une matrice réelle pour transformer les tensions et courants triphasés équilibrés (abc) à un système biphasé ( $\alpha\beta$ ) en appliquant la transformation de Concordia, ce qui permet d'écrire la relation des tensions suivante :

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.1})$$

Et sa transformation inverse :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{-1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{-1}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{III.2})$$

A partir des résultats des expressions (III.1) et (III.2), on peut introduire Les puissances réelle et imaginaire instantanées dans le repère ( $\alpha$ - $\beta$ ) par la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_\alpha & i_\beta \\ i_\beta & -i_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{III.3})$$

D'autre part, les puissances réelles et imaginaires peuvent être représentées comme suit:

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

Avec :

$\bar{p}, \bar{q}$ : Les composants continus de p et q.

$\tilde{p}, \tilde{q}$ : Les composants alternatifs de p et q.

A partir de l'équation (III.3), nous pouvons déduire les expressions des composants du tension :

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{i_\alpha^2 + i_\beta^2} \begin{bmatrix} i_\alpha & i_\beta \\ i_\beta & -i_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{III.5})$$

Dans notre cas on va compenser les harmoniques de courant et l'énergie réactive, donc l'équation (III.5) devient :

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{i_\alpha^2 + i_\beta^2} \begin{bmatrix} i_\alpha & i_\beta \\ i_\beta & -i_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{III.6})$$

Pour la séparation des composantes continues et oscillatoires  $p$ , on élimine la composante continue à l'aide d'un filtre passe haut (figure III-4), et après on ajoute la composante de la puissance active  $p_c$  nécessaire à la régulation de la tension continue  $v_{dc}$ .

$$\begin{bmatrix} v_{ref\alpha} \\ v_{ref\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{i_\alpha^2 + i_\beta^2} \begin{bmatrix} i_\alpha & i_\beta \\ i_\beta & -i_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} + p_c \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{III.7})$$

Enfin pour obtenir les courants de référence en repère (a, b, c), on utilise la transformation inverse de Concordia (III.2).

Filtre passe bas :

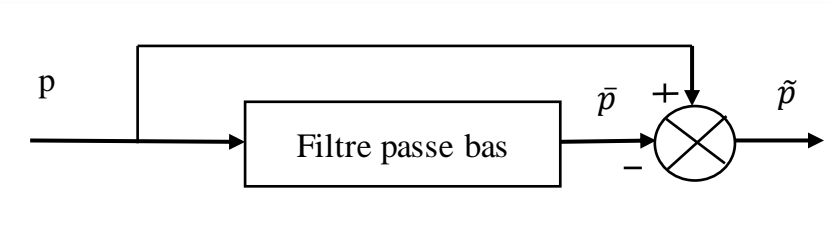


Figure III-5: Filtre passe haut équivalent.

Nous avons choisi pour l'extraction des composantes continue, un filtre du second ordre pour séparer la composante continue de la composante harmonique de puissance active [17].

$$F_{pb} = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (\text{II.10})$$

La figure III.6 illustre l'identification des tensions de référence lors de la compensation simultanée des tensions harmoniques et de l'énergie réactive par la méthode des puissances instantanées, la régulation de la tension continue de  $V_{dc}$  sera étudié dans la section III.3.2.3.

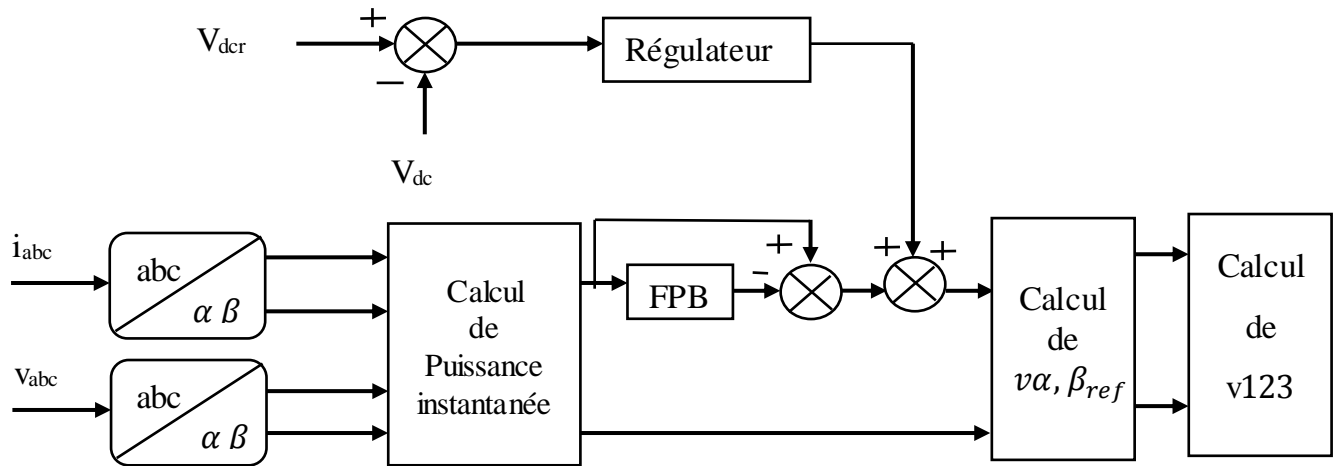


Figure III-6: Schéma de principe de la méthode des puissances instantanées.

### III.4.2.2.2 Méthodes des puissances actives et réactive instantanées p-q modifié :

Pour tout qui suit dans notre travail on va utiliser cette méthode, elle est basée sur la méthode des puissances instantanées. [1]

Pour les transformations triphasé/diphassé et diphassé/triphassé ainsi que pour le calcul des puissances instantanée p et q, on garde tous les matrices et les équations montré précédemment, la seule différence entre les deux méthodes réside dans l'introduction d'une PLL (figure III-9) qui est utilisée pour extraire la phase de la composante fondamentale directe de tension  $V_d$ .

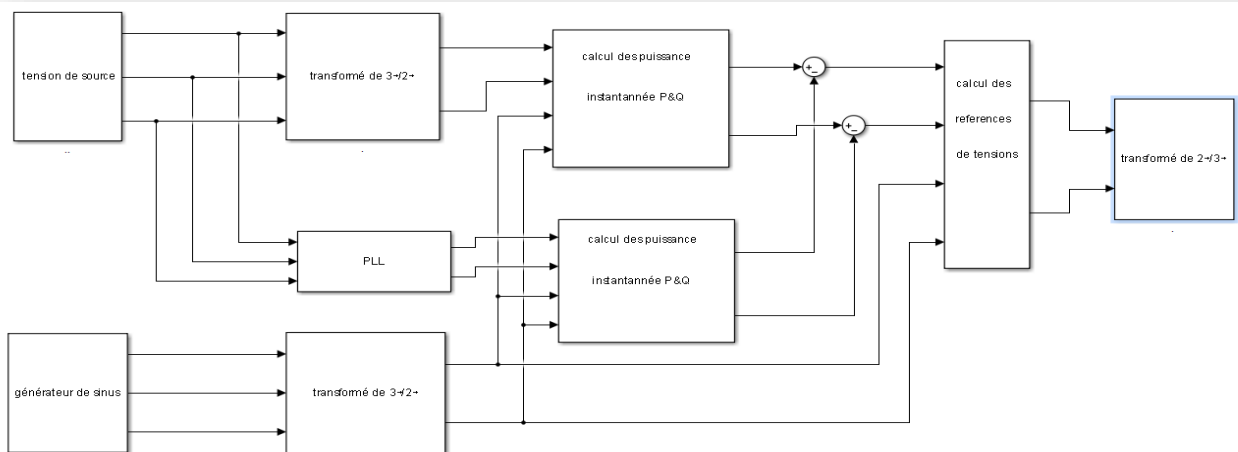


Figure III-7: Schéma de principe de la méthode d'identification.

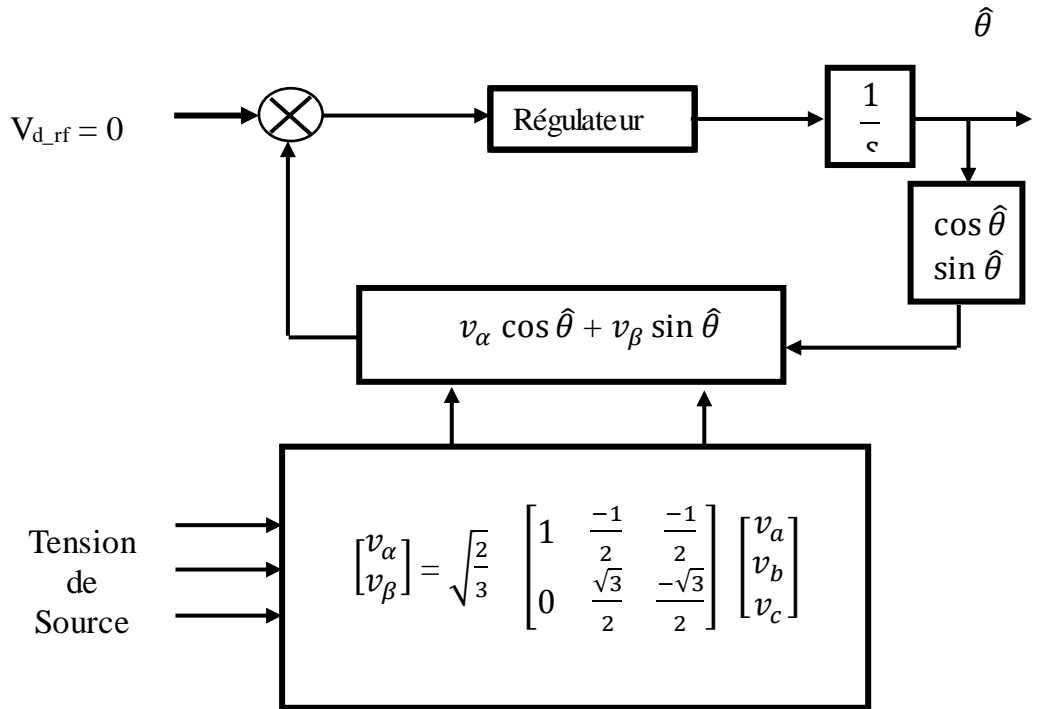


Figure III-8 : Schéma de principe d'un PLL classique.

**III.4.2.3 Régulation de tension continue :** Afin de maintenir la tension continue aux bornes du condensateur à un niveau relativement constant pour le bon fonctionnement du filtre actif en assurant une compensation des pertes dans le filtre actif et limiter ses variations en régime dynamique, Cette tension est affectée par les perturbations continue et harmonique c'est pour ces raisons la régulation de la tension continue est nécessaire.

La puissance active  $p_f$  nécessaire pour rétablir la tension du filtre à une valeur constante est donnée par l'expression :

$$p_f = p_c - p_s \quad (\text{III.1})$$

Cette équation exprime l'échange de puissance active entre la charge polluante ( $P_c$ ), le réseau ( $P_s$ ) et le filtre actif ( $P_f$ ).



En négligeant les pertes de commutations dans l'onduleur ainsi que l'énergie stockée dans l'inductance du filtre de sortie, la relation entre la puissance absorbée par le filtre actif et la tension aux bornes du condensateur peut s'écrire sous la forme suivante [3] :

$$p_f = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} c v_{dc}^2 \right) \quad (\text{III.2})$$

$$v_{dc} = \frac{1}{c} \int i_{dc} dt \quad (\text{III.3})$$

Pour une bonne régulation, on utilise le régulateur PI car il permet de minimiser l'erreur statique.

L'expression générale du régulateur PI est donnée par la relation suivante : [23]

$$K(s) = \frac{k_p \cdot s + k_i}{s} \quad (\text{III.4})$$

Avec :

$K_p$  : gain proportionnel du régulateur.

$K_i$  : gain intégral du régulateur.

Figure III-10 présente le schéma de la régulation de  $V_{dc}$  :

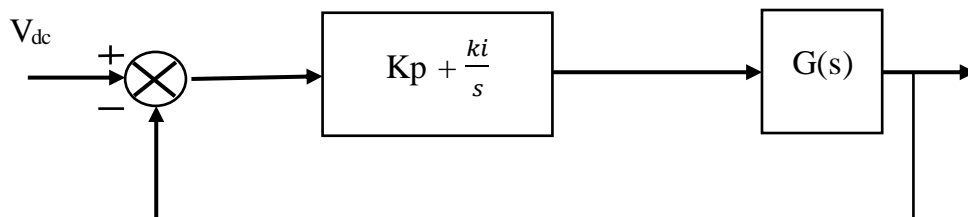


Figure III-9: Boucle de réglage de tension continu  $V_{dc}$

Avec :

$$G(s) = \frac{1}{c \cdot s} \quad (\text{III.5})$$

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée par :

$$F(s) = \frac{(1 + \frac{k_p}{k_i} s) \frac{k_i}{C}}{s^2 + \frac{k_p}{C} s + \frac{k_i}{C}} \quad (\text{III.6})$$

L'expression générale d'une fonction de transfert du second ordre est :

$$F(s) = \frac{(1 + \frac{k_p}{k_i} s) \omega_0^2}{s^2 + 2\xi \omega_0 s + \omega_0^2} \quad (\text{III.7})$$

Après l'identification avec l'équation (III.6), on trouve :

$$K_i = \omega_0^2 \times C ;$$

$$K_p = 2\xi \sqrt{k_i C}$$

### III.5 Description de la simulation

Le filtre actif série est une source de tension placée en série entre le réseau et la charge, Cette source de tension correspond à un onduleur triphasé avec un filtre LC de sortie connectée au réseau au travers d'une transformateurs triphasé d'injection de tension.

#### III.5.1 Simulation d'un FAS en présence de perturbation coté source

Nous appliquons la loi de commande citer ci-dessus à un filtre actif de puissance série pour éliminer les perturbations de type tension coté source représenté sous forme des tensions harmoniques d'ordre 5.

### III.5.1.1 Avant filtrage

- Modèle de simulation

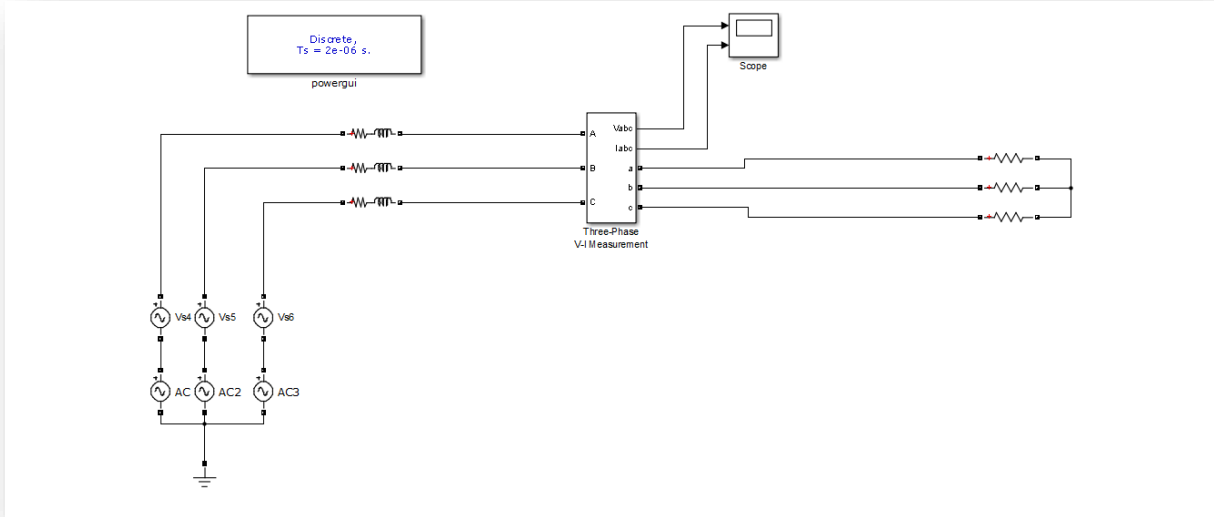


Figure III-10: Modèle de simulation (source-charge).

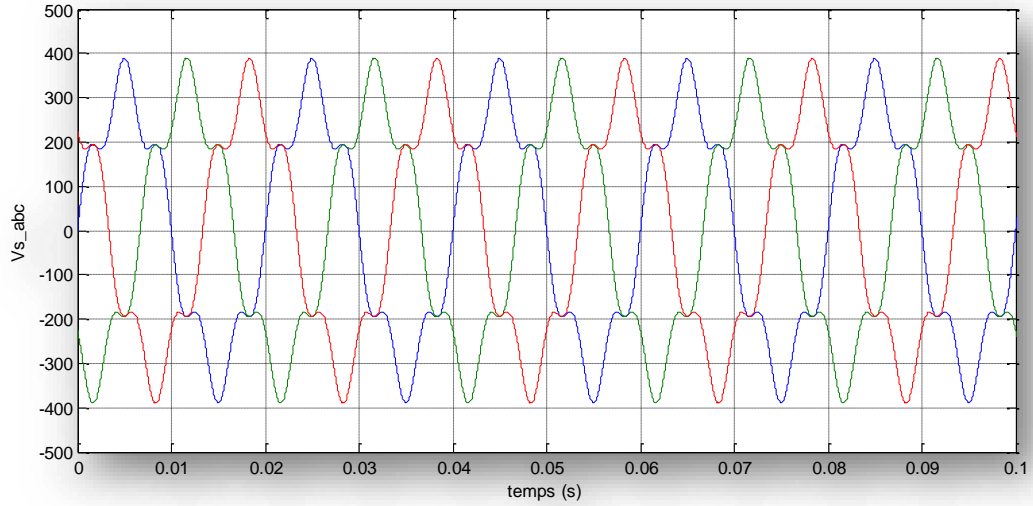
- Paramètres de simulation :

Tableau III-1: paramètre du réseau électrique

$V_s$ (v)	$R_s$ (m $\Omega$ )	$L_s$ ( $\mu$ H)	$R_c$ (m $\Omega$ )	$L_c$ ( $\mu$ H)	$R_{ch1,2,3}$ ( $\Omega$ )
230	1.59	45.56	2.73	23.19	1

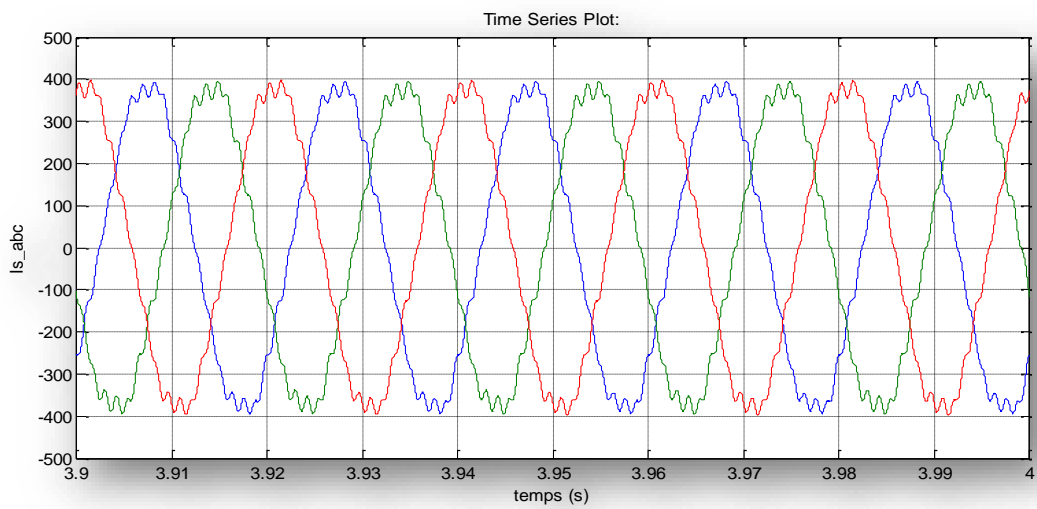
- Résultat de simulation :

La tension de la source perturbée :

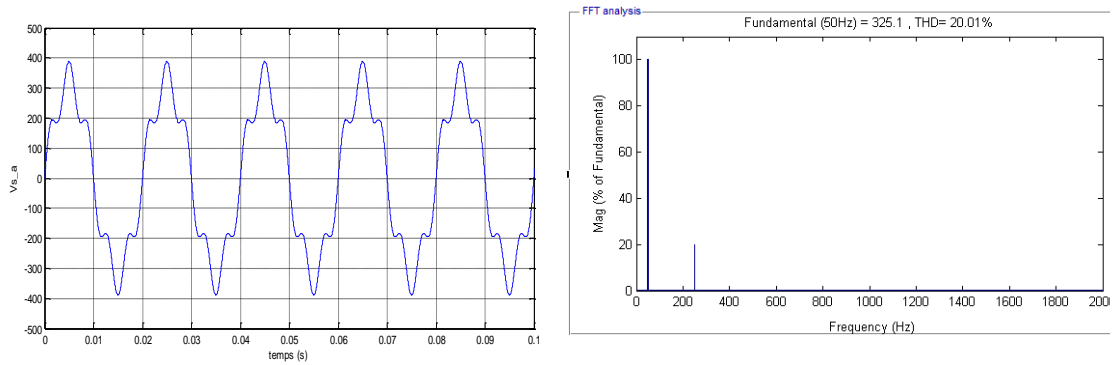


**Figure III-11: Tension coté source**

Et le courant de source :



**Figure III-12: Courant coté source**



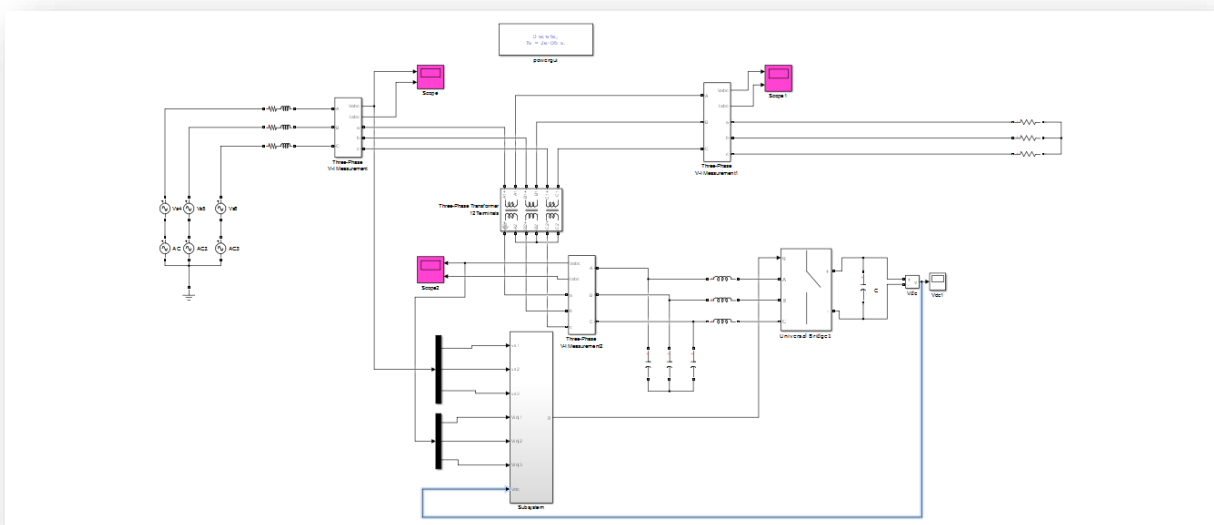
**Figure III-13: Tension de la phase 1 et son spectre de THD**

La figure précédente présente la tension de la source Vs1 et son spectre harmonique. Le THD en tension pour cette source est de 22,01 %. Le but du filtrage actif est de ramener ce THD à une valeur inférieure à 6 %, comme l'impose la norme CEI.

Maintenant, nous allons présenter les résultats de simulation avec le filtre actif de commande présenté auparavant.

### III.5.1.2 Après le filtrage

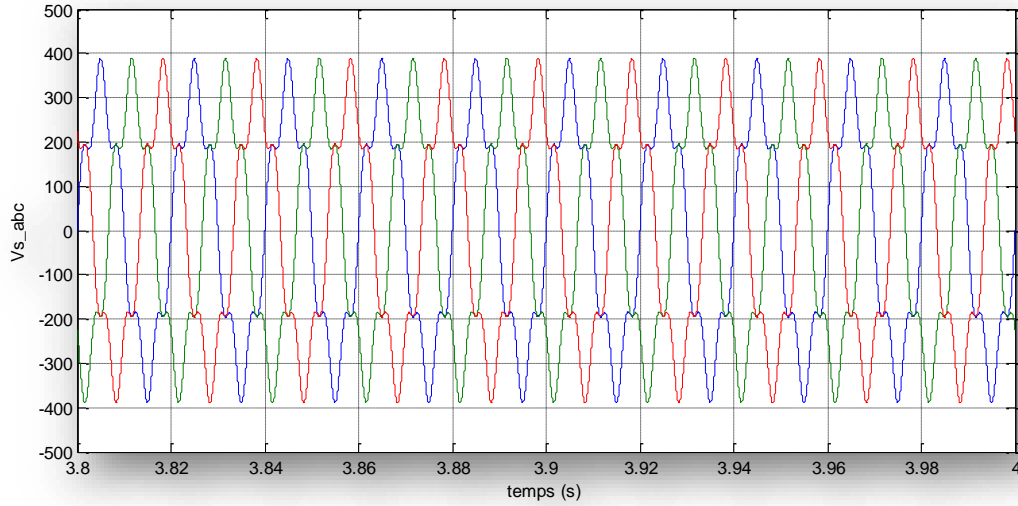
- Modèle de simulation



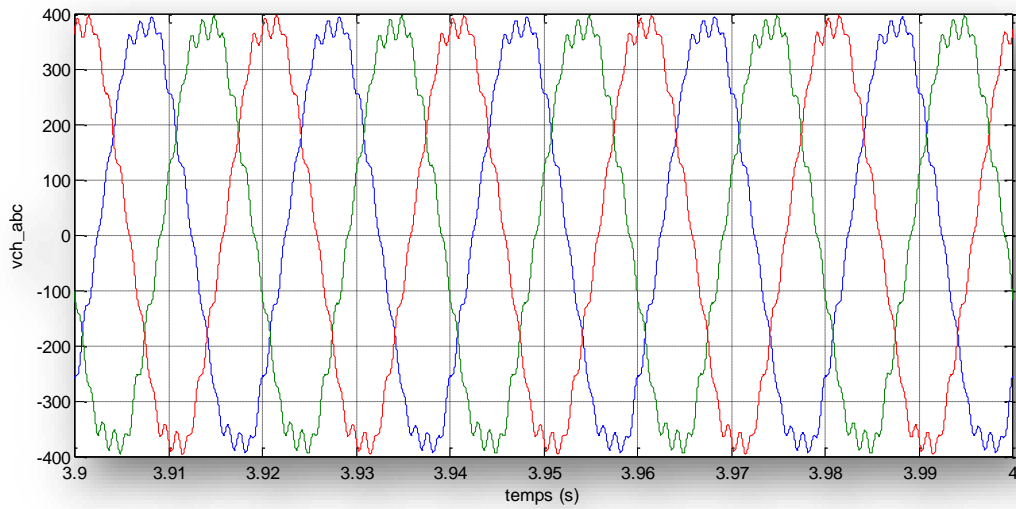
**Figure III-14 : Système complet la source, la charge et le filtre actifsérie.**

- Résultat de simulation

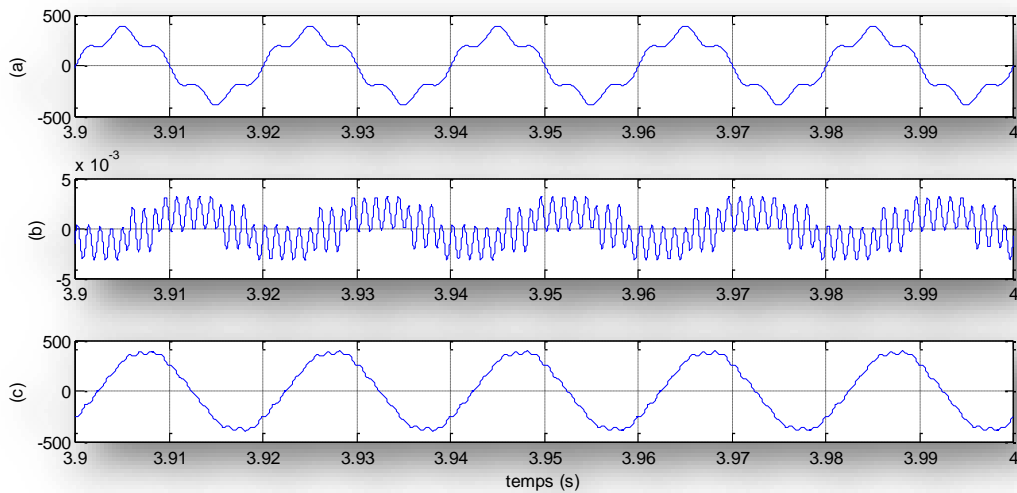
Les résultats de simulation que nous obtenons sont comme suite :



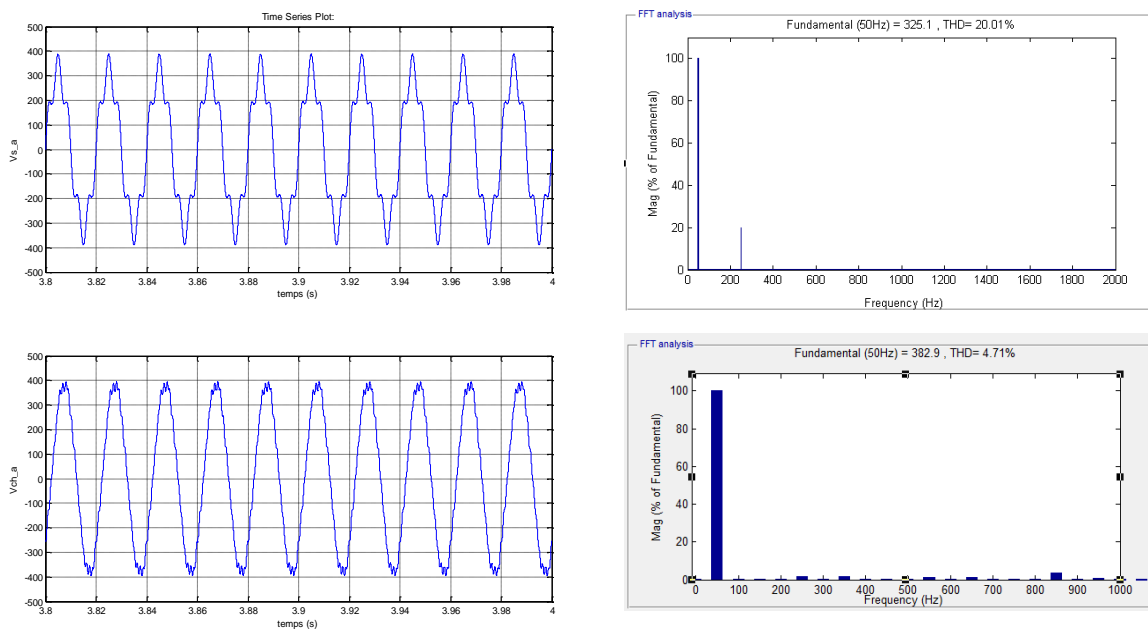
**Figure III-15 : Tension de source**



**Figure III-16 : Courant de source**



**Figure III-17 : (a) : tension de source de la 1ère phase ;  
(b) tension injectée par le filtre ; (c) : tension de charge de la 1ère phase.**



**Figure III-18 : courant de charge et source et leurs spectres de THD.**

Ce filtre permet une réduction des harmoniques de tension. La valeur du THD est réduite à 4.71% après filtrage qui est conforme aux normes. Nous remarquons que le filtre actif de puissance série élimine très bien les harmoniques de tension.

### III.5.2 Simulation d'un FAS en présence de perturbation cotée charge

Pour cette partie, notre objectif est d'éliminer les perturbations de type tension cotée charge crée par les courant perturbé qui sont générés à cause d'une charge non linéaire représentée par un pont redresseur à diodes sur une charge représentée par un circuit  $R_{ch}, L_{ch}$ .

#### III.5.2.1 Avant filtrage

- Modèle de simulation

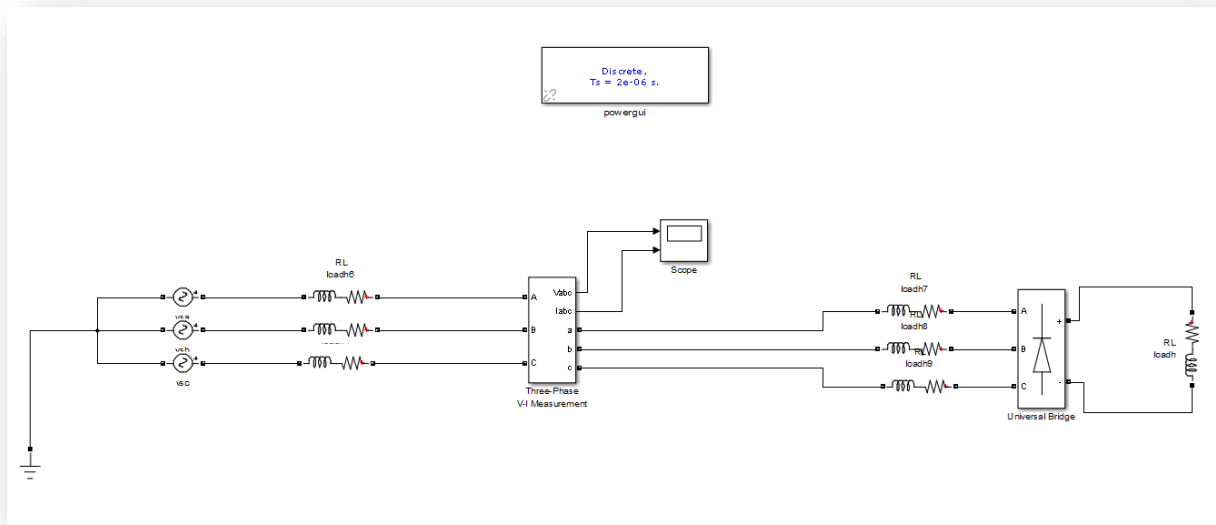


Figure III-19 : modèle de simulation (source-charge).

- Paramètre de simulation :

$V_s$ (v)	$R_s$ (m $\Omega$ )	$L_s$ ( $\mu$ H)	$R_c$ (m $\Omega$ )	$L_c$ ( $\mu$ H)	$L_{ch}$ (mH)	$R_{ch}$ ( $\Omega$ )
230	1.59	45.56	2.73	23.19	16	15



- Résultat de simulation :

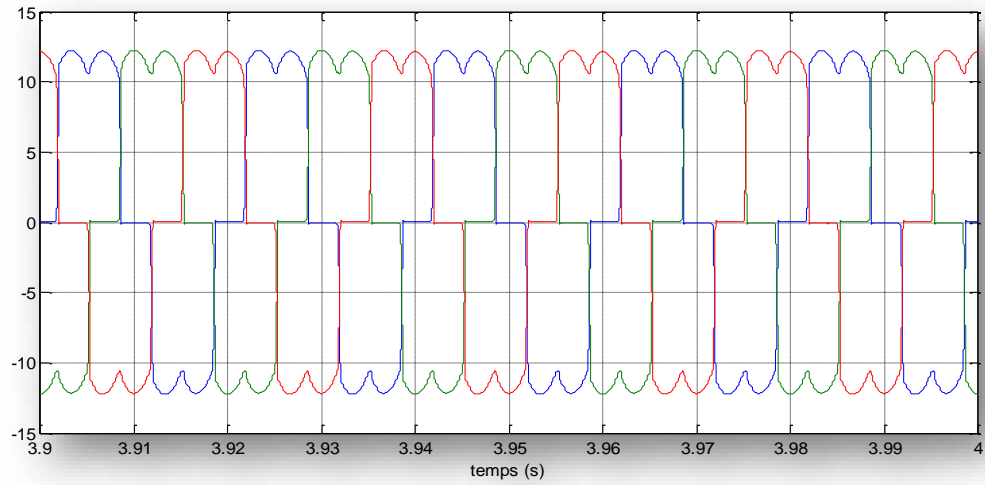


Figure III-20 : Courant de charge.

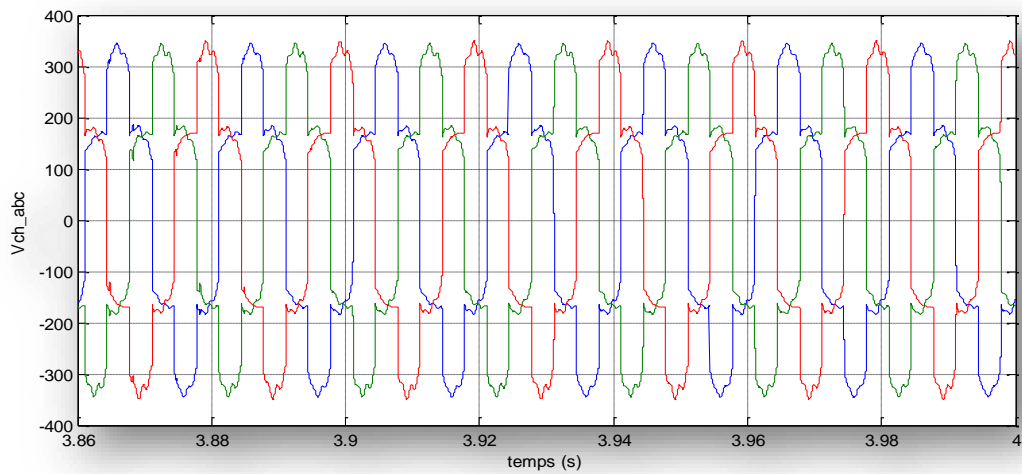


Figure III-21 : Tension de la charge.

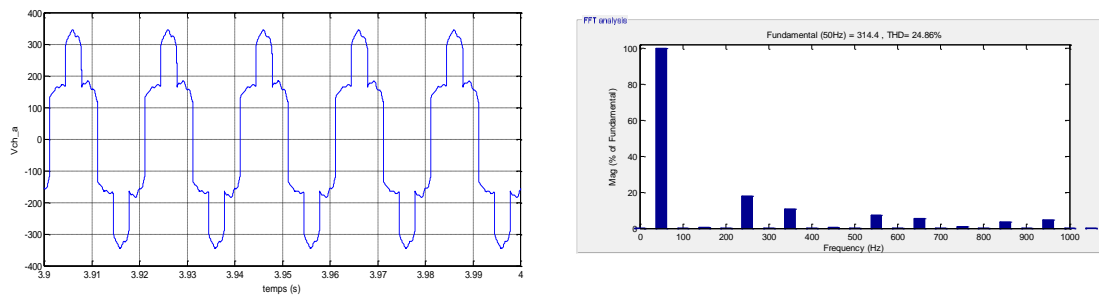


Figure III-22 : Tension de charge de la phase 1 et son spectre THD.

La figure précédente présente la tension de la charge  $V_{ch1}$  et son spectre harmonique. Le THD pour cette charge est de 24,86 %. Le but du filtrage actif est de ramener ce THD à une valeur inférieure à 6 %, comme l'impose la norme CEI.

Maintenant, nous allons présenter les résultats de simulation avec le filtre actif de puissance série.

### III.5.2.2 Après le filtrage

- Modèle de simulation

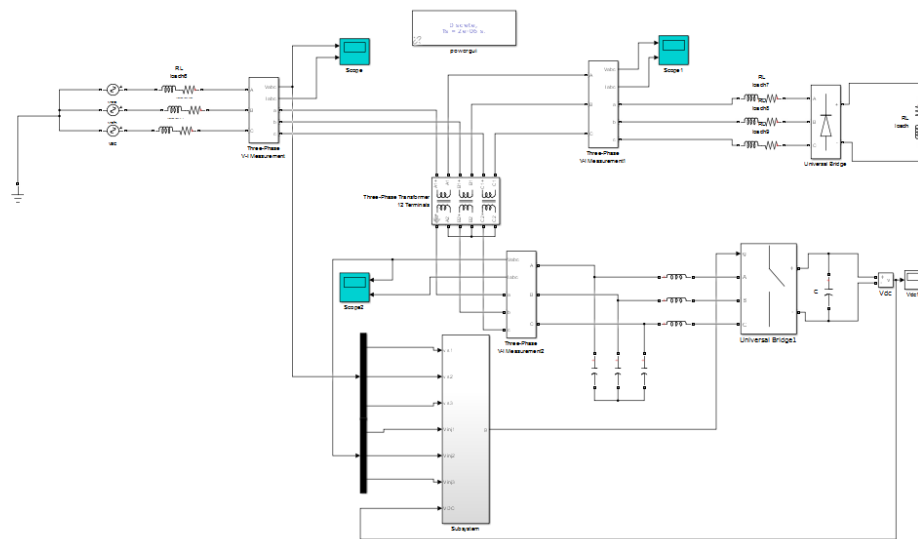


Figure III-23 : Système complet la source, la charge et le filtre actif série.

- Résultat de simulation

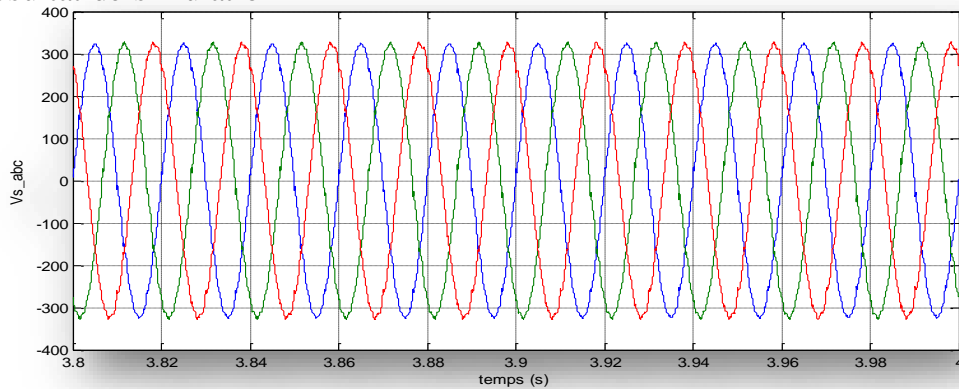


Figure III-24 : tension de la source.

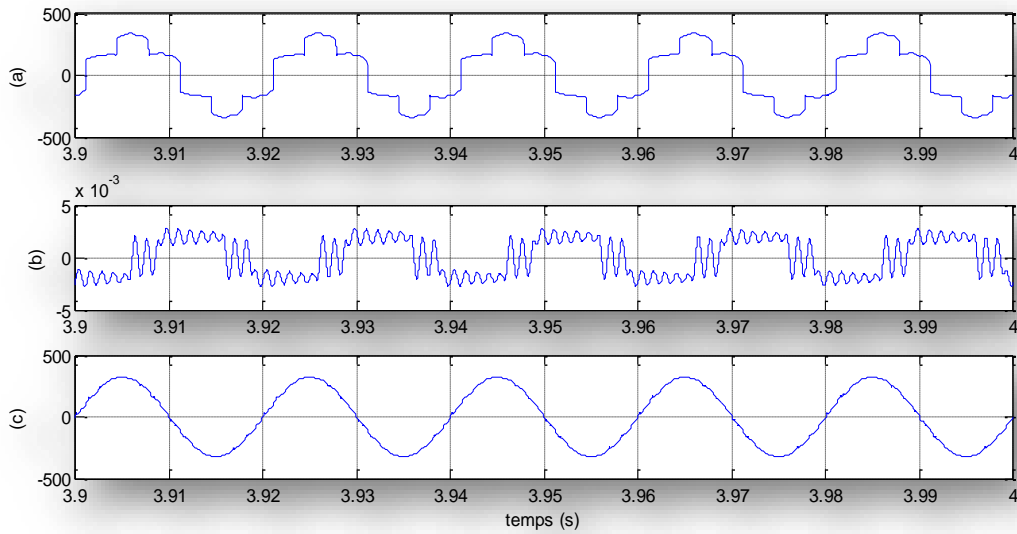


Figure III-25 : (a) : tension de charge de la 1ère phase ; (b) tension injectée par le filtre ; (c) : tension de source de la 1 er phase.

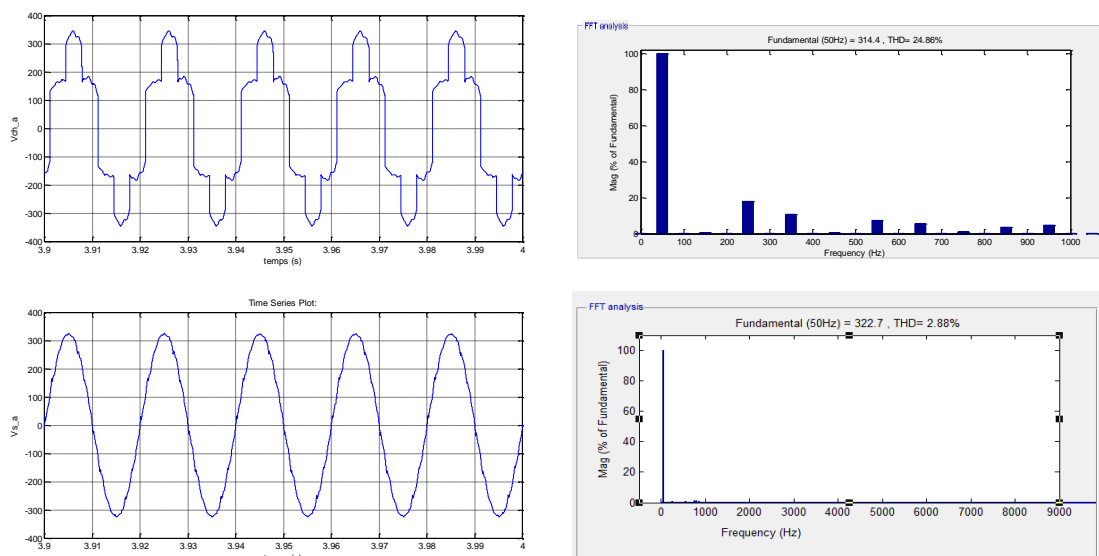


Figure III-26 : Courant de charge et source et leurs spectres de THD.

Pour ce modèle, notre filtre permet une réduction des harmoniques de tension. La valeur du THD est réduite à 2.88% après filtrage. Nous remarquons que le filtre actif de puissance série élimine sensiblement les harmoniques de tension.

### **III.6 Conclusion**

Après avoir établie une étude du FAS avec sa commande et suite à la simulation réaliser qui a confirmé l'efficacité de ce filtre pour éliminer les perturbations de types de tensions que ce soit au niveau de la charge ou coté source. Ce qui nous a permis de valider notre modèle de filtre active de puissance FAS, pour être utiliser dans le chapitre suivant.

***CHAPITRE IV***  
***Conditionneur de***  
***Puissance - UPQC***

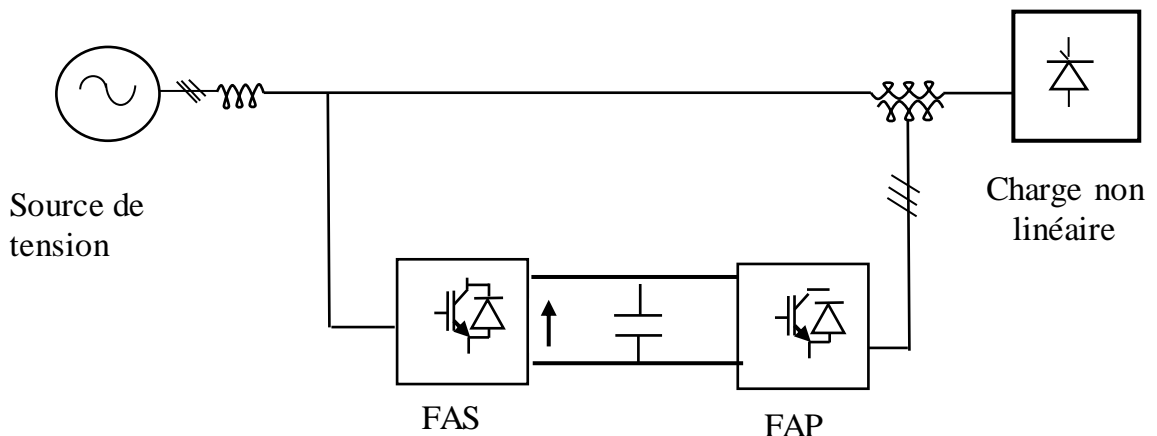
## IV.1 Introduction

En se basant sur les deux études précédentes où nous avons pu valider les deux filtres actifs de puissance parallèle et série. Cependant, chacune des deux structures précédentes ne prenait en charge qu'un seul type de perturbation (courant ou tension), ce qui nous a emmené à établir une étude sur une structure universelle qui puisse prendre en charge les deux à la fois, en développant la structure d'un « Unified Power Quality Conditionner » UPQC.

Pour notre système nous avons opté pour la méthode des puissances instantanées p-q pour l'identification à la fois des courants de référence pour le FAP et tensions de références pour le FAS, en présence d'une charge non-linéaire. Afin de compenser toutes les perturbations courants et/ou tension générés par la charge non linéaire dans le but d'isoler le côté source vis-à-vis des perturbations générées côté charge.

## IV.2 Conditionneur de puissance

L'objectif principal d'un UPQC est de compenser les problèmes de qualité d'énergie type de tension, tels que les contraintes, les hesses, le déséquilibre, scintillement, harmoniques et pour la qualité d'énergie type courant de charge problèmes, tels que les harmoniques, le déséquilibre et le courant réactif.



*Figure IV-1 : Conditionneur actif de puissance.*

### IV.3 Structure générale de conditionneur de puissance

La structure générale de ce système contient les composants suivant :

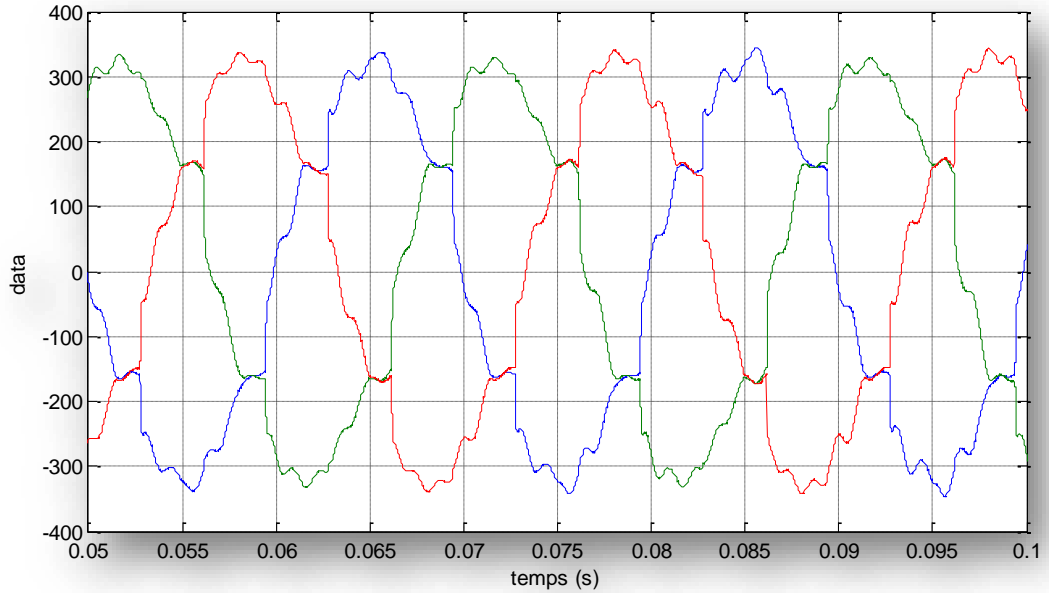
- **Deux onduleurs** : un connecté à travers la charge qui agit comme une dérivation APF et d'autres connectés en série avec la ligne de la série APF.
- **L'inducteur de couplage parallèle  $L_{fp}$**  est utilisé pour connecter l'onduleur parallèle au réseau. Cela contribue également à Lissant la forme de l'onde du courant.
- **Une source continue commun dc**. Dans la Fig. 1, le lien dc est réalisé en utilisant un condensateur qui interconnecte les deux onduleurs et maintient également en constant la tension  $V_{dc}$  à travers elle.
- **Un filtre LC** qui sert de filtre passif passe bas (LPF) et aide à éliminer les ondulations à hautes fréquences à cause de la commutation sur la sortie de l'onduleur générée la tension (filtre actif série).
- **Transformateur d'injection** : est utilisé pour connecter l'onduleur série dans le réseau. Un taux de rotation approprié est souvent considéré comme réduisant le courant de la charge qui traversent l'onduleur série.

Dans notre cas d'étude, il nous est possible d'établir deux topologies de notre « UPQC », axée sur la position d'un des deux filtres actifs de puissance par apport à l'autre filtre de puissance : FAP-FAS ou FAS-FAP :

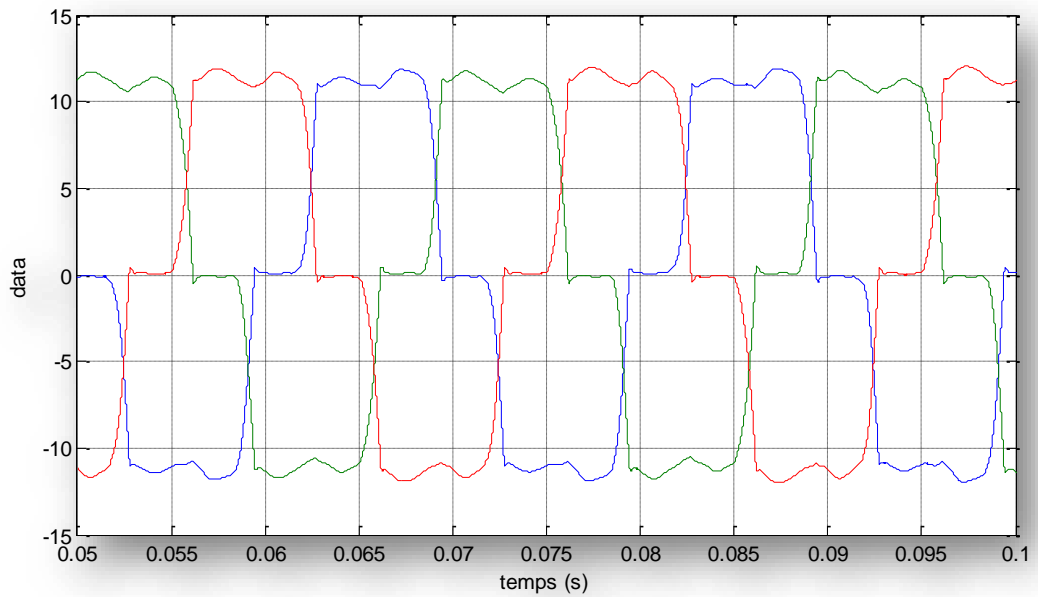
- La première, le FAP est placé côté source, seul le courant de la charge passe en premier à travers le FAS, l'ondulation du courant, causée par les commutations du convertisseur du FAP ne traverse pas l'inductance du transformateur série et la tension au point de raccordement sera moins perturbée.
- La seconde, le FAP est placé côté charge. Dans ce cas, le FAP compense les courants harmoniques et les puissances réactifs de la charge non linéaire. Le FAS ne voit qu'une charge linéaire équilibrée résistive. Le FAS à son tour permet la compensation des perturbations côté réseau électrique, telles que, les harmoniques de tension et les creux de tensions, etc... Ce qui aboutit à l'obtention d'une tension sinusoïdale au point de raccordement du FAP coté charge. [11]

## IV.4 Résultat de simulation

### IV.4.1 Avant filtrage



*Figure IV-2: Tension de charge  $V_{ch}$ .*



*Figure IV-3 : Courant de charge.*



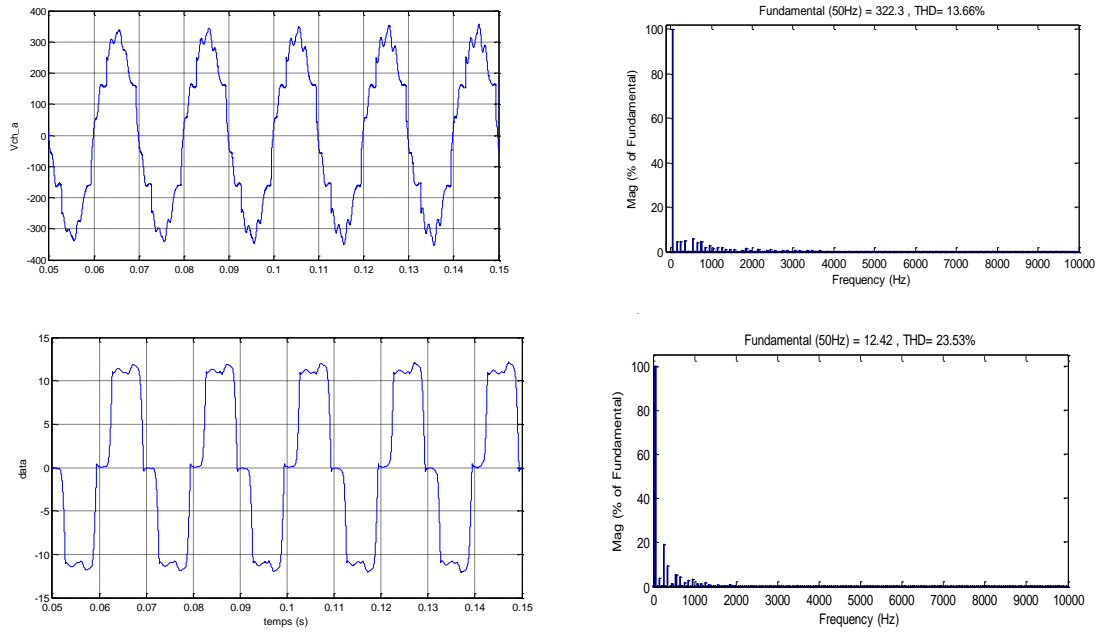


Figure IV-4 : la tension et le courant de charge et leur spectre de THD.

#### IV.4.2 Après validation du FAS

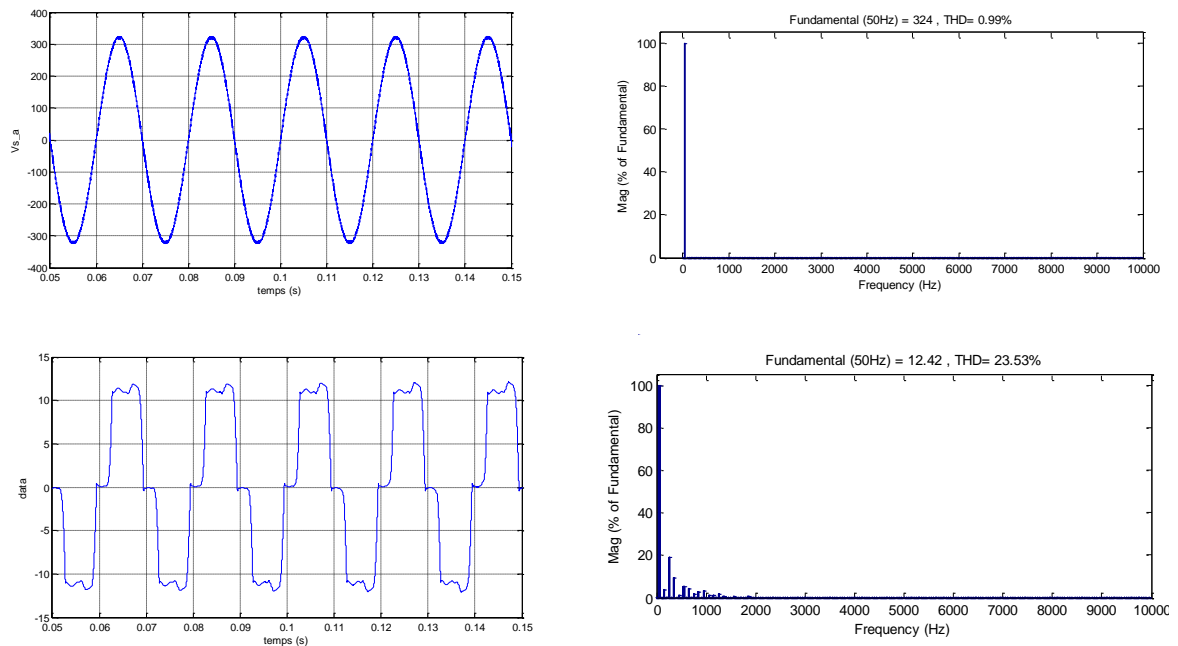
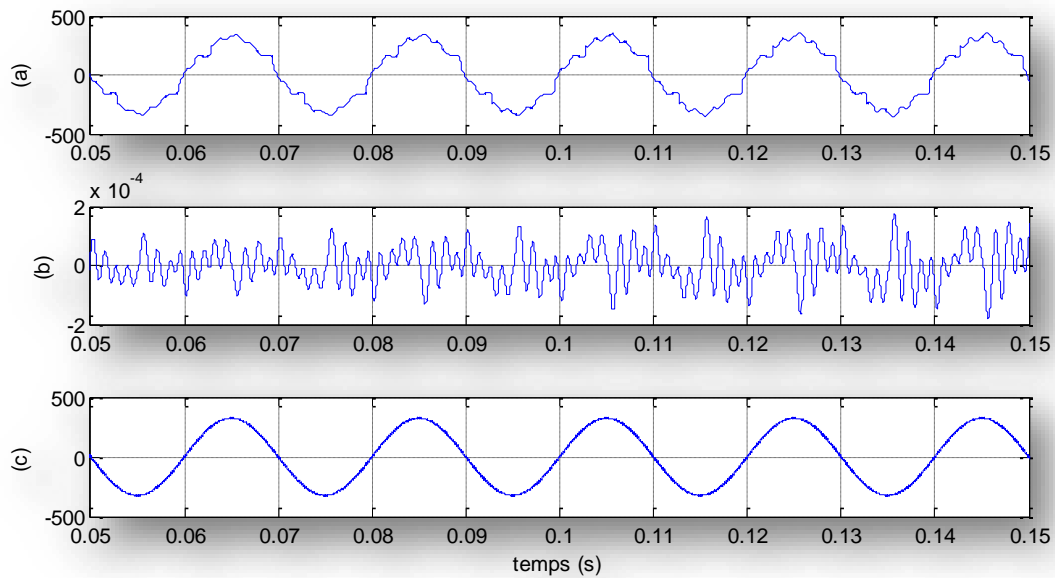
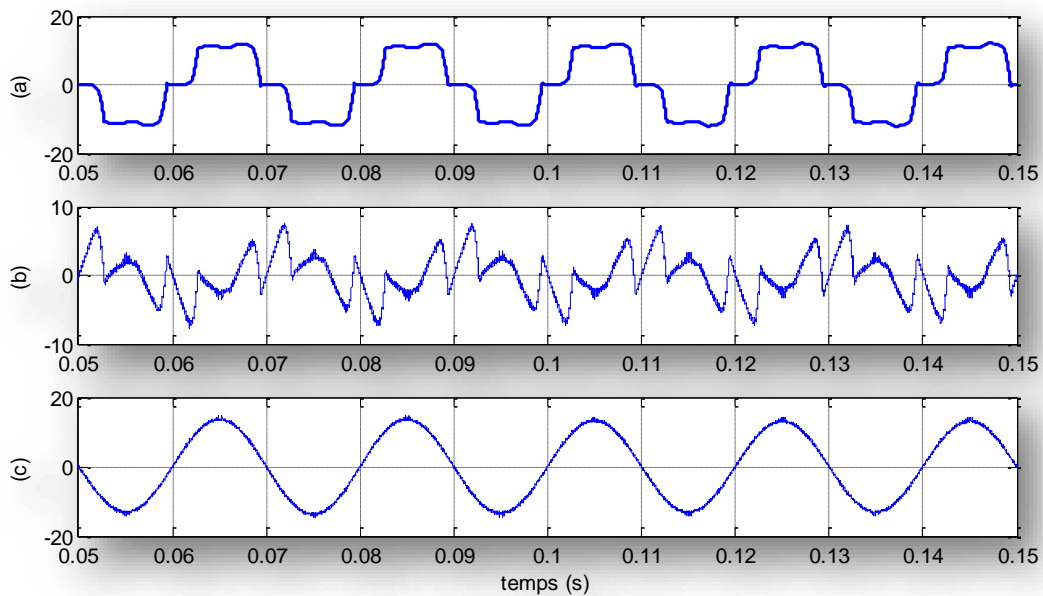


Figure IV-5 : la tension et le courant après la validation du FAS et leurs THD.

### IV.4.3 Après filtrage de UPQC



**Figure IV-6:** (a) : tension de charge de la 1ère phase ;  
(b) tension injectée par le filtre ;(c) : tension de source de la 1ère phase.



**Figure IV-7:**(a) : courant de charge de la 1ère phase ;  
(b) courant injecté par le filtre ;(c) : courant de source de la 1ère phase.

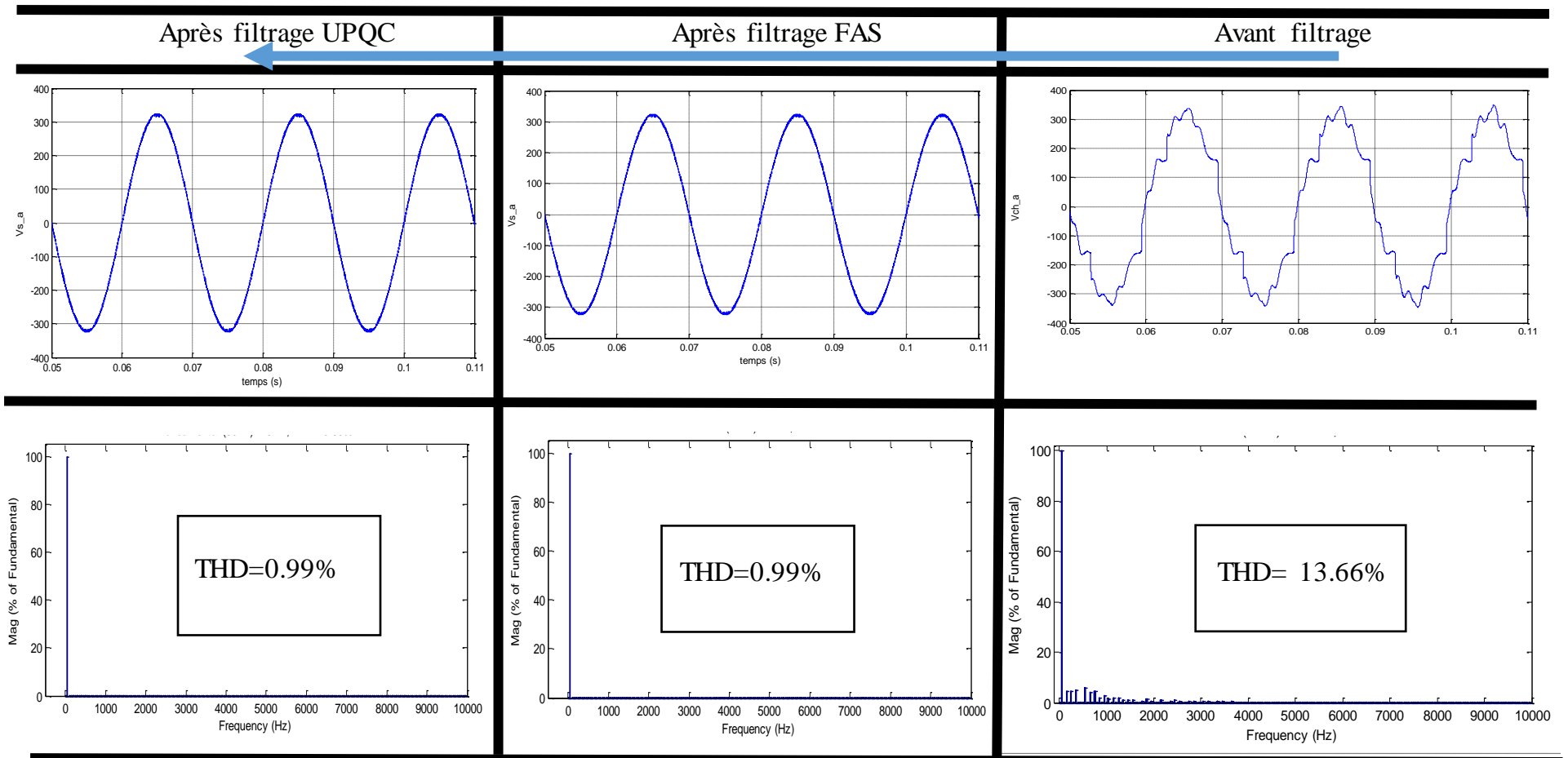


Figure IV-8 : Représentation du processus de filtrage des tensions de charge en présence d'un UPQC

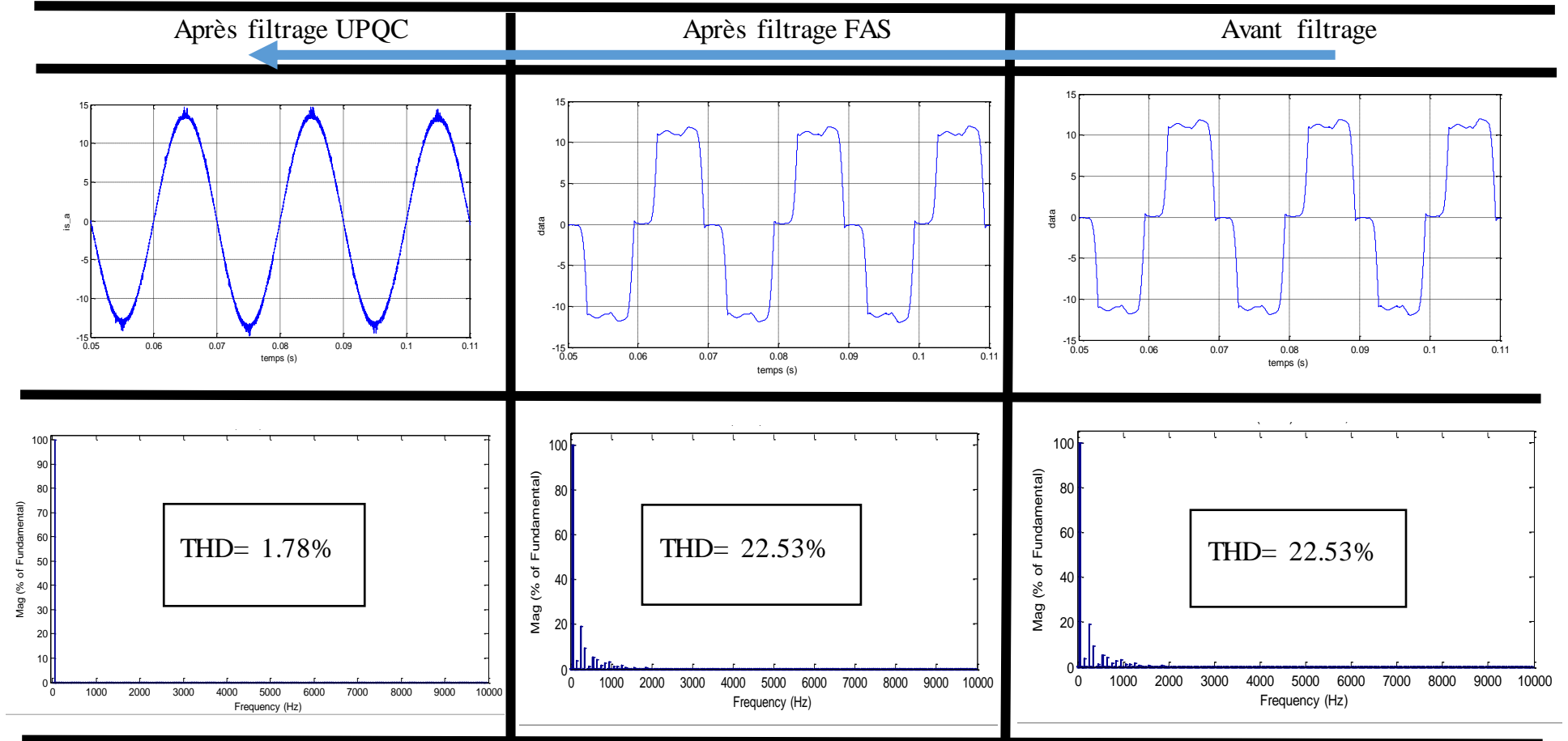
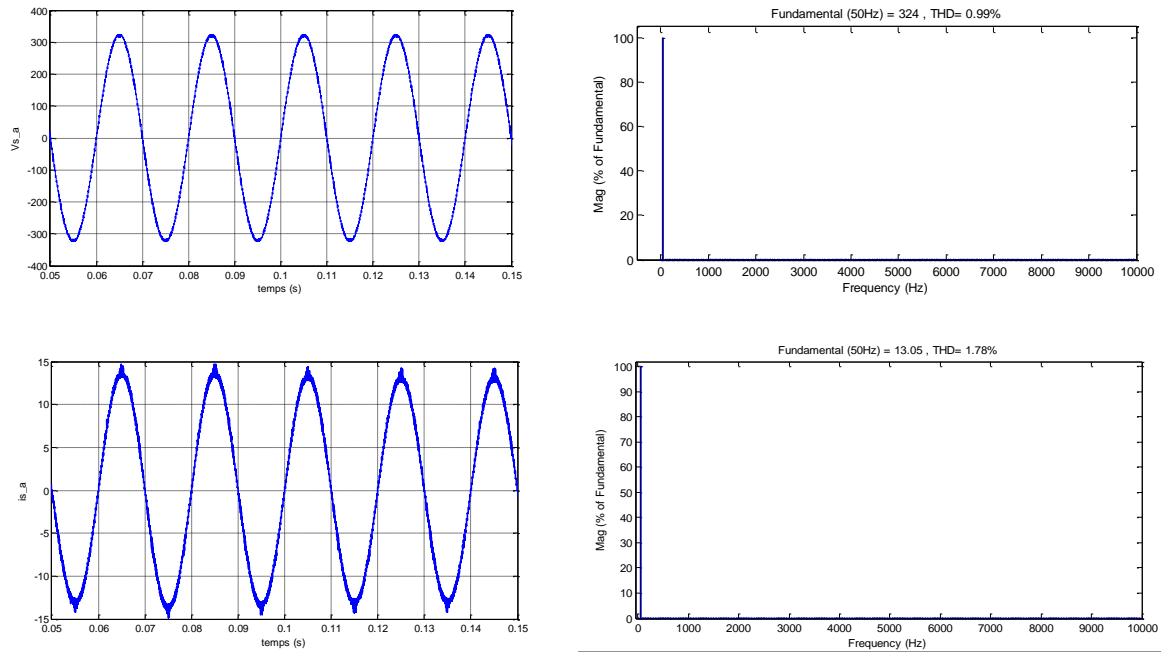


Figure IV-9 : Représentation du processus de filtrage des courants de charge en présence d'un UPQC



**Figure IV-10 : la tension de source et son spectre harmonique et le courant de source et son spectre harmonique.**

Notre UPQC permet une réduction des harmoniques de tension la valeur du THD est réduite à 0.99 % et pour le courant son valeur du THD est réduite à 1.78% après filtrage. Nous remarquons que le conditionneur de puissance élimine très bien les harmoniques de tension et de courant généré par la charge non linéaire.

#### IV.5 Conclusion

Après avoir étudié les filtres actifs parallèle et série dans les chapitres précédents, nous sommes intéressés à l'étude de l'association de ces deux techniques de filtrages afin d'aboutir à la solution universel UPQC.

Ce dispositif nous a permis de compenser à la fois les perturbations de type courant et tension généré par les charges non linéaire, ce qui a préservé notre source. Les résultats des différents THD en tensions et courants ont été conforme aux normes internationales.

En adoptant une stratégie de contrôle « p-q modifier » pour le FAS et « p-q » pour le FAP.

## *Conclusion générale*

Dans ce mémoire de fin d'étude, nous avons confirmé que l'UPQC représente une solution universelle pour la compensation de tous les types de perturbation. Ainsi, nous avons proposé de faire l'étude des différentes stratégies de commande appliqué à la fois aux deux types de filtres de puissance (FAP et FAS) pour constituer notre conditionneur de puissance.

Nous avons dans un premier temps validé notre modèle de FAP à la suite d'une série de simulation qui a permis d'améliorer de façon sensible la qualité des courants de source avec des THD inférieur à 5%.

Dans une seconde phase, nous nous sommes intéressés à la structure d'un FAS où nous avons travaillé sur deux modèles afin d'éliminer les perturbations produites par la source pour le premier modèle et celle produite par la charge pour le second modèle où les THDs des tensions de sources ou charges ainsi obtenues sont inférieures à 6%. Suite à quoi nous avons pu valider notre FAS.

En dernier, nous avons développé un filtre actif combiné série-parallèle (UPQC) comme étant une solution générale pour la compensation de toutes les perturbations de courants et de tensions. Les résultats de simulation ont montré la prise en charge de ce type de structure (UPQC) pour la compensation simultanée des perturbations de courant et de tension au niveau des réseaux électriques.

## *Bibliographie*

- [1] M.C BENHBIB, « Nouvelle stratégie de commande d'un conditionneur actif de puissance », Magistère (USTO), 1998.
- [2] B. BOUGHAZI, « Etude et réalisation d'un filtre actif parallèle de puissance », (USTO), 2013.
- [3] M.A. ALALI, « Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques » ; thèse de Doctorat en génie électrique, Université Louis Pasteur ULP, 2002.
- [4] A. CHAOUI, « filtrage actif triphasé pour charges non linéaires », Thèse de doctorat, l'université de Ferhat Abbas de Sétif, 2010.
- [5] H. KOUARA « l'application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un réseau basse tension » mémoire de magister en électrotechnique, université de Batna, 2006.
- [6] M.C. BENHBIB, « Contribution à l'étude des différentes topologies et commandes des filtres actifs parallèles à structure tension : Modélisation, simulation et validation expérimentale de la commande », Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, 2004.
- [7] D. KAMEL, « études des filtres actifs pour réseaux déséquilibrés et distordus », thèse de doctorat université Ferhat Abbas Sétif 1, 2015.
- [8] A. OMEIRI, « Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant », Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, 2007.
- [9] A. BOUCIF, « Filtrage actif d'un réseau Électrique », Université Mohamed Khider Biskra, 2014.
- [10] S. KEBIRI, « Modélisation et simulation d'un filtre actif multiniveaux », université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2009.

- [11] S. CHENNAI, « Etude, Modélisation & Commande des Filtres Actifs : Apport des Techniques de l'Intelligence Artificielle », Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2013.
- [12] D. NEKKAR, « Contribution à l'étude des Stratégies de Commande des Filtres Actifs Triphasés », Université Mohamed Chérif Messaadia de Souk-Ahras, 2013.
- [13] I. GHADBANE, « Etude et réalisation d'un filtre actif parallèle en utilisant différentes stratégies de contrôle », Université Mohamed Khider – Biskra, 2016.
- [14] H. DJEGHLOUD, « filtrage actif de puissance », thèse de doctorat, université Mentouri Constantine, 2007.
- [15] D. OULD-ABDESLAM ; Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension ; Thèse de Doctorat, Université de Haute-Alsace. 2005.
- [16] H. SALEM, « Commande d'un Filtre actif parallèle à quatre bras par des techniques avancées », Université Mohamed Khider – Biskra, 2009.
- [17] I. BOUZEGAG, F. SALHI, « Contrôle Direct de puissance appliqué au Filtre Actif Parallèle », Université d'EL-Oued, 2007.
- [18] Z. CHELLI, « amélioration de la qualité de l'énergie électrique par un filtre actif d'harmonique », thèse de doctorat de l'université Badji Mokhtar Annaba, 2015.
- [19] A. CHAOUI, J.P. GAUBERT, « Filtre actif parallèle pour l'amélioration de la qualité de l'énergie », éditions universitaires européennes, 2010.
- [20] Ph. Ferracci , « Cahier technique n°199 : la qualité de l'énergie électrique » ; Cahier Technique Schneider Electric.
- [21] <http://www.futura-sciences.com/maison/definitions/maison-surintensite-10924>
- [22] [https://archive.org/stream/IJRST020119/IJRST020119\\_djvu.txt](https://archive.org/stream/IJRST020119/IJRST020119_djvu.txt)
- [23] M.M. ABDUSALAM, « structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales », thèse de doctorat, université Henri Poincaré, 2008.
- [24] N.H MENDALEK, « Qualité de l'onde électrique et moyens de mitigation », thèse de doctorat, université Québec, 2003.



## Annexe A

La CEI (Commission Électrotechnique Internationale) est l'un des principaux organismes de normalisation internationaux dans le domaine de l'électrotechnique. Au niveau international, les normes CEI 61000 publiées dans le domaine de la compatibilité électromagnétique (CEM)

- CEI 61000-3-4 : Entrée en vigueur dans l'Union Européenne en janvier 2001, elle traite de la limitation des courants harmoniques injectés dans le réseau public d'alimentation pour des appareils consommant des courants supérieurs à 16A par phase. Elle définit les limites des harmoniques du courant d'entrée qui peuvent être produit par le matériel soumis à l'essai dans des conditions spécifiées. Cette norme prend en compte aussi le rapport de court-circuit ( $R_{SCC}$ ). [11] [24]

Tableau 0-1 : Limites pour une charge triphasée selon IEC 61000-3-4

$R_{SCC}$ minimal	Limites supérieures pour les facteurs de distorsion harmonique		Limites individuelles des harmoniques en % de $I_1$			
	THD	PWHD	$I_5$	$I_7$	$I_{11}$	$I_{13}$
66	17	22	12	10	9	6
120	18	29	15	12	12	8
175	25	33	20	14	12	8
250	35	39	30	18	13	8
350	48	46	40	25	15	10
450	58	51	50	35	20	15
>600	70	57	60	40	25	18

- CEI 61000-3-2 : Elle définit des limites d'émission de courant harmonique par les appareils consommant moins de 16 A par phase. [11] [24]

**Tableau 0-2: Limites des harmoniques selon IEC 61000-3-2 classe D**

Rang harmonique n	Courant harmonique maximal permis par watt (mA/W)	Courant harmonique maximal permis (A)
3	3.4	2.3
5	1.9	1.14
7	1.0	0.77
9	0.5	0.4
11	0.35	0.33
13	0.29	0.21
$15 \leq n \leq 39$ (rangs impairs)	$\frac{3.85}{n}$	$\frac{2.25}{n}$

Les normes CEI-1000 définissent les niveaux des courants et des tensions harmoniques à respecter.

- Le tableau I.1 présente la norme CEI-1000- 3-2 qui fixe la limitation des courants injectés dans un réseau public basse tension pour des équipements dont le courant par phase est inférieur à 16A. Il s'agit là des appareils du domaine domestique. Aussi, du fait de leur puissance, les équipements industriels sont exclus du champ d'application de cette norme. [9]

**Tableau 0-3 : Limites des composantes harmoniques en courant.**

Harmoniques impairs		Harmoniques pairs	
Rang	Courant harmonique admissible maximale (A)	Rang	Courant harmonique admissible maximale (A)
3	2.30	2	1.08
5	1.14	4	0.43
7	0.77	6	0.30
9	0.40	8≤h≤40	0.23*8/h
11	0.33		
13	0.21		
15≤h≤39	0.15*15/h		

- La norme (CEI-1000-3-4) spécifie les limites d'émissions de courants harmoniques des équipements individuels d'intensité assignée supérieure à 16A et jusqu'à 75A. Ces limites s'appliquent aux réseaux publics de tensions nominales comprises entre 230 V (monophasé) et 600 V (triphasé). [9] [24]

**Tableau 0-4 : Limites des émissions de courants harmoniques.**

Rang	Courant harmonique en % du fondamental
3	21.6
5	10.7
7	7.2
9	3.8
11	3.1
13	2.0
15	0.7
17	1.2
19	1.1
21	$\leq 0.6$
23	0.9
25	0.8
27	$\leq 0.6$
29	0.7
31	0.7
$\geq 33$	$\leq 0.6$
pairs	$\leq 0.6$ ou 0.158/h

Les normes CEI-1000-2-2 et CEI-1000-2-4 précisent le niveau des harmoniques de tension à respecter au point de raccordement sur les réseaux de distribution basse tension, public et industriel respectivement. Le tableau I.4 présente les niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques sur les réseaux publics basse tension. [9]

**Tableau 0-5: Niveaux de compatibilité des harmoniques de tension (CEI-1000-2-2).**

Harmoniques impairs non multiples de 3		Harmoniques impairs multiples de 3		Harmoniques pairs	
Rang	Tension harmonique en % du fondamental	Rang	Tension harmonique en % du fondamental	Rang	Tension harmonique en % du fondamental
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	$0.2+0.5*25/k$				

L'I.E.E.E (Institute of Electrical and Electronics Engineers) cet organisme réalise la principale activité de normalisation dans le domaine des perturbation électriques au niveau mondial mais n'ont pas une uniformité de critères en ce qui concerne la définition des interactions entre le réseau et les charges connectées, ses deux normes principales sont : [11]

- IEEE 519 : 1992, Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Power Systems : Cette norme détermine la procédure pour contrôler les harmoniques présents sur le réseau électrique ainsi que les limites recommandées de la pollution harmonique générée par les clients et de distorsion harmonique totale sur le réseau.

## Résumé

Les perturbations de types courants ou tension dans les réseaux électriques sont de plus en plus présente du fait de phénomènes naturels (foudre, ...) ou dû à l'accroissement de l'usage de charges non-linéaires et l'interconnexion avec les réseaux décentralisés sans oublier les effets pouvant survenir lors des perturbations des sources de productions d'énergie.

Pour résoudre ce type de problème, nous nous proposons d'établir une étude suivie de simulations sur les performances d'un filtre actif de puissance parallèle ainsi qu'un filtre de puissance série. Après validation de ces deux types de filtres nous proposons une solution universelle à travers un compensateur d'énergie de puissance qui associe le FAP et FAS pour compenser les perturbations de types courant et tension.

Suites à nos simulations de nos filtres actifs de puissances (FAP, FAS, UPQC) sous environnement Matlab/SimPower System que ce soit en régime équilibré ou déséquilibré cela nous a permis d'aboutir à de bons résultats avec des THDs de signaux conformes aux normes en vigueur.

**Mots clés :** filtre actif parallèle, filtre actif série, conditionneur de puissance, les harmoniques.

### ملخص:

الاضطرابات من نوع توتر أو تيار بالشبكات الكهربائية في تزايد مستمر بسبب الظواهر الطبيعية (كالبرق)، بالإضافة إلى زيادة استخدام الأحمال غير الخطية والربط مع الشبكات اللامركزية دون نسيان تأثير الاضطرابات الناجمة عن مصادر إنتاج الطاقة.

كحل لهذه المشكلة، نقترح إنشاء دراسة مرفقة بمحاكاة لاختبار أداء مرشح على التفرع وآخر على التسلسل. بعد اثبات هذين النوعين من المرشح، نقترح حلاً شاملاً عن طريق معوض طاقي الذي يدمج كلا المرشحين سالف ذكرهما التفرعي والتسلسلي لتعويض جل الاضطرابات وأنجزنا سلسلة من المحاكات بنسق متوازن وغير متوازن، باستعمال برنامج Matlab/SimPower ما سمح لنا بالحصول على نتائج جيدة.

الكلمات المفتاحية: التلوث التوافقي، المرشح الفعال على التفرع، المرشح الفعال على التسلسل،

### Abstract:

Disturbances of current types or voltage in electrical networks are increasingly worrying due to natural phenomena (lightning, ...) or due to the increase in the use of non-linear loads and the interconnection with the decentralized networks without forget the effects that can occur during disturbances of sources of energy production.

To solve this type of problem, we propose to establish a study followed by simulations on the performance of a parallel active power filter as well as a serial active power filter. After validation of these two types of APF we propose an universal solution through a power energy compensator which associates the FAP and the FAS to compensate current and voltage disturbances.

Following our simulations of our active power filters (FAP, FAS, UPQC) under a Matlab / SimPower System environment, whether in balanced or unbalanced conditions, we achieved good results with THDs that respect the norms.

**Keys word:** harmonic, shunt active filter, serie active filter, power conditioner.