



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique Et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي - تبسة  
Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa  
معهد المناجم  
Institut des Mines  
قسم الإلكتروميكانيك  
Département Electromécanique



## MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention d'un diplôme de Master

Filière : Electromécanique

Option : Electromécanique

### Méthodes d'identification des harmoniques générées par une charge polluante

*Réalisé Par:*

**SELATNIA Melek**

Devant le jury :

Houam Ala	MCB	Président	Université Echahid Cheikh Larbi TebessiTébessa
Zaamouche Fares	MCA	Encadreur	Université Echahid Cheikh Larbi TebessiTébessa
Fares Nour Eddine	MAA	Examineur	Université Echahid Cheikh Larbi TebessiTébessa

Promotion 2022-2023

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

مؤسسة التعليم العالي : جامعة العربي التبسي - تبسة

تصريح شرفي  
خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لانجاز بحث

أنا الممضي أدناه،

السيد (ة) سلا حنيّة ملال ..... الصفة : طالب، أستاذ باحث، باحث دائم : طالب .....

الحامل لبطاقة التعريف الوطنية رقم : 404814098 ..... و الصادرة بتاريخ 2023.02.20 .....

المسجل بمعهد الناجم ..... قسم الكيمياء .....

و المكلف بانجاز أعمال بحث (مذكرة التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، أطروحة دكتوراه)، عنوانها :

Méthodes d'identification des harmoniques générées  
par une charge polluante .....

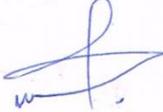
أصرح بشرفي أنني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية و المنهجية و معايير الأخلاقيات المهنية و النزاهة الأكاديمية

المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

2023 07 07

التاريخ: 2023.06.07 .....

إمضاء المعني (ة)





عن رئيس المجلس الشعبي البلدي  
و بتفويض من  
إمضاء العون، فوسم نوارة



Année universitaire : 2022-2023

Tébessa le : 06/06/2023

### Lettre de soutenabilité

Noms et prénoms des étudiants :

1- SELATNIA MALEK  
2- /  
3- /

Niveau : Master(02) Option : Electromécanique

Thème : Méthodes d'identification des harmoniques  
générées par une charge polluante.

Nom et prénom de l'encadreur : Dr. ZAMOUCHTE Fares

Chapitres réalisés	Signature de l'encadreur
Introduction générale	
CHAPITRE (01)	
CHAPITRE (02)	
CHAPITRE (03)	
CHAPITRE (04)	
conclusion générale	

## Remerciement

*Je désire exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à Allah, le Tout-Puissant, pour la volonté, la santé, le courage et la patience qu'Il m'a accordés tout au long de ces nombreuses années.*

*Je souhaite exprimer ma vive reconnaissance envers mon encadreur, M. ZAAMOUCHE Fares, pour sa disponibilité constante tout au long de ce travail. Je le remercie chaleureusement pour son aide inestimable en termes de conseils et d'orientations.*

*Je tiens également à exprimer ma gratitude envers Monsieur HOUAM Ala pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le jury d'examen de ce mémoire.*

*Je tiens également à exprimer ma reconnaissance envers Monsieur FARES Noredin pour avoir accepté d'examiner mon travail.*

*Et tiens à exprimer mes sincères remerciements à tous Les enseignants du département d'électromécanique M SOUDENI, ATTIA, MOGHERRANI pour leur soutien.*

*J'adresse un grand merci à tout le personnel de l'unité Anabibe Elmalabiod, en particulier aux services électronique, électrotechnique et bureau technique, pour leur précieuse contribution.*

*Je souhaite exprimer ma profonde gratitude envers toutes les personnes qui nous ont apporté leur aide dans l'élaboration et la réalisation de ce mémoire. Nous remercions sincèrement tous ceux qui, de près ou de loin, nous ont soutenus dans cette tâche.*

*Je souhaite exprimer ma profonde gratitude envers tous mes amis et collègues pour le soutien moral inestimable qu'ils m'ont apporté.*

## *Dédicace*

*À ma mère bien-aimée, tu es ma source d'amour et de soutien inébranlable. Ta présence illumine ma vie et ta force m'inspire chaque jour. Je te chéris et t'honore pour toujours : ABDELATIF Mamia*

*Aussi à mon père regretté, ta présence me manque chaque jour. Ton amour et ta sagesse restent gravés à jamais dans mon cœur. Tu vivras toujours dans mes souvenirs les plus précieux : SELATNIA ABDELAZIZ*

*À mes frères adorés, vous êtes mes anges gardiens sur cette terre :*

*AKRAM et Amjed*

*À mes précieuses copines, votre présence est mon bonheur quotidien et votre amour remplit nos cœurs d'une joie infinie : SAFA, NOURELHOUDA, SELSABILE.*

*À CHOVAIB, cher à ma mémoire, cette dédicace spéciale témoigne de ma gratitude éternelle. Que ton souvenir demeure gravé dans ma mémoire à jamais.*

*À mes collègues, complices de mes souvenirs professionnels les plus mémorables, cette dédicace leur est dédiée en témoignage de notre collaboration précieuse. Vos contributions resteront à jamais gravées dans les annales de ma mémoire :*

*ABDERRAHMAN, AYOUB, CHAIMA*

*À ma famille, pilier de mes souvenirs les plus précieux, cette dédicace est une expression de mon amour et de ma reconnaissance infinie. Votre présence restera à jamais gravée dans les recoins les plus profonds de ma mémoire et spécialement mes oncles.*

## **Résumé**

Le domaine électrique a connu un développement majeur avec l'utilisation de plus en plus répandue des convertisseurs statiques. Cependant, il convient de noter que ces convertisseurs peuvent générer des charges non linéaires et entraîner une pollution. Malheureusement, cette évolution a également entraîné une détérioration de la qualité du courant ou de la tension.

Cette tâche vise à examiner comment améliorer la qualité du courant à la source en éliminant le courant polluant, également connu sous le nom de courant harmonique, dans les réseaux électriques. Cette étude se concentre spécifiquement sur l'utilisation d'un dispositif appelé filtre actif parallèle (FAP) à trois fils. C'est l'utilisation de techniques d'identification du courant harmonique pour réduire le taux de distorsion harmonique (THD).

Le schéma proposé est soumis à une validation par simulation dans l'environnement MATLAB Simulink. Les résultats obtenus indiquent que le FAP présente une grande efficacité et une importance considérable dans l'amélioration du facteur de puissance et la réduction des harmoniques de courant, comparé aux méthodes de filtrage classiques basées sur l'utilisation de condensateurs.

### **Mots-clefs :**

Filtre actif – Harmonique - Filtre passif - Méthode des puissances instantanées - Compensation d'énergie - Perturbations harmoniques - Onduleur.

## **Abstract**

The electrical domain has experienced significant development with the increasingly widespread use of static converters. However, it should be noted that these converters can generate nonlinear loads and lead to pollution. Unfortunately, this evolution has also led to a deterioration in the quality of current or voltage.

This task aims to examine how to improve the quality of current at the source by eliminating polluting current, also known as harmonic current, in electrical networks. This study specifically focuses on the use of a device called a three-wire active parallel filter (APF). It involves using harmonic current identification techniques to reduce the total harmonic distortion (THD) rate.

The proposed scheme undergoes simulation validation in the MATLAB Simulink environment. The obtained results indicate that the APF demonstrates high efficiency and significant importance in improving power factor and reducing current harmonics compared to conventional filtering methods based on the use of capacitors.

### **Keywords :**

Active filter – Harmonic - Passive filter - Instantaneous power method - Energy compensation - Harmonic disturbances - Inverter.

## المخلص:

شهد المجال الكهربائي تطورًا كبيرًا مع الاستخدام الواسع النطاق للمحولات الثابتة. ومع ذلك ، تجدر الإشارة إلى أن هذه المحولات يمكن أن تولد أحمالًا غير خطية وتؤدي إلى التلوث. لسوء الحظ ، أدى هذا التطور أيضًا إلى تدهور جودة التيار أو الجهد.

تهدف هذه المهمة إلى دراسة كيفية تحسين جودة التيار عند المصدر من خلال القضاء على التيار الملوث ، المعروف أيضًا باسم التيار التوافقي ، في الشبكات الكهربائية.

تركز هذه الدراسة بشكل خاص على استخدام جهاز يسمى مرشح نشط متوازي بثلاثة أسلاك (PAF). إنه استخدام تقنيات تحديد التيار التوافقي لتقليل معدل التشويه التوافقي (THD).

يتم تقديم المخطط المقترح للتحقق من صحته عن طريق المحاكاة في بيئة محاكاة MATLAB. تشير النتائج التي تم الحصول عليها إلى أن FAP تقدم كفاءة كبيرة وأهمية كبيرة في تحسين عامل القدرة وتقليل التوافقيات الحالية ، مقارنة بطرق الترشيح الكلاسيكية القائمة على استخدام المكثفات.

## الكلمات المفتاحية :

المرشح النشط - المتوازي - المرشح السلبي - طريقة الطاقة اللحظية - تعويض الطاقة - الاضطرابات التوافقية - العاكس.

Remerciement	
Dédicace	
Résumé	
Table de matière	
Liste de figures	
List de tableaux	
Liste des symboles	

### *Sommaire*

Introduction générale.....	1
<b><u>Chapitre I: Les perturbations dans le réseau électrique et stratégies de dépollution</u></b>	
I.1 Introduction.....	4
I.2 Paramètres de la qualité de l'énergie électrique .....	4
I.2.1 Creux et coupures de tensions .....	4
I.2.2 Fluctuations de tension .....	5
I.2.2.1 Variation Lentes de la Tension.....	5
I.2.2.2 Variation rapide de la Tension .....	5
I.2.3 Déséquilibre du système triphasé de tension .....	5
I.2.4 Variation de fréquence .....	6
I.2.5 Charges linéaires et non linéaires .....	6
I.3 Les harmoniques .....	7
I.3.1 Effets des harmoniques .....	7
I.3.1.1 La résonance .....	7
I.3.1.2 L'effet des harmoniques sur les machines tournantes .....	7
I.4 Source des harmoniques .....	8
I.5 Les Caractéristiques de perturbation harmoniques .....	8
I.5.1 Grandeur harmonique.....	9
I.5.2 Rang de l'harmonique .....	9
I.5.3 Valeur efficace d'une grandeur alternative .....	9
I.5.4 Série de Fourier .....	9
I.5.5 Taux d'harmonique de distorsion.....	10
I.5.5.1 Le taux Individuel de distorsion .....	10

## *Table de Matière*

I.5.5.2 Le taux Global de distorsion.....	10
I.5.6 Facteur de puissance Fp .....	11
I.5.7 Spectre de fréquence .....	11
I.6 Influence des harmoniques sur le facteur de puissance Fp .....	12
I.7 Les solutions traditionnelles .....	13
I.7.1 Utilisation d'inductance anti-harmonique .....	13
I.7.2 Augmentation de la puissance de court-circuit .....	13
I.7.3 Les filtres passifs .....	13
I.7.3.1 Filtres passifs résonant.....	14
I.7.3.2 Filtres passifs amorti.....	14
I.8 Les avantages et les inconvénients des filtres passifs .....	15
 <b><u>Chapitre II solutions modernes et modélisation d'un filtre actif parallèle</u></b> 	
II.1 Introduction .....	19
II.2.1 Le filtre actif .....	19
II.2.1.1 Filtre actif parallèle (FAP) .....	19
II.2.1.2 Filtre actif série (FAS).....	20
II.2.1.3 Combinaison filtre actif série-parallèle .....	21
II.2.1.4 Filtrage hybride .....	21
II.2.2 Les avantages et les inconvénients des filtres actifs .....	21
II.3 Le rôle du filtre actif .....	22
II.4 Structure générale d'un filtre actif parallèle .....	22
II.5 Système de régulation du filtre actif parallèle .....	23
II.6 Définition de l'onduleur .....	24
II.6.1 Commande de l'onduleur.....	25
II.6.1.1 La commande par hystérésis .....	25
II.6.1.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI).....	26
II.6.1.3 La commande par hystérésis modulé .....	27
II.6.2 Structure générale de l'onduleur de tension à deux niveaux .....	28
II.6.3 Modélisation de l'onduleur triphasé a deux niveaux .....	30
II.6.3.1 Système de stockage de l'énergie.....	32
II.6.3.2 Filtre de sortie.....	32
II.6.3.3 La charge polluante .....	33
II.7 Schéma synoptique de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle et charge polluante .....	33
II.8 Modélisation de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle et charge polluante .....	34

## *Table de Matière*

---

II.8.1 Modélisation du réseau .....	34
II.9 Conclusion .....	35

### *Chapitre III : méthodes d'identification des harmoniques*

III.1 Introduction .....	37
III.2 Généralités sur les méthodes d'identification .....	37
III.3 Stratégie de l'identification .....	38
III.4 Méthode des puissances active et réactive instantanées p-q .....	38
III.4.1 Définition et principe .....	38
III.4.2 Analyse physique des différentes composantes de la puissance .....	39
III.4.3 Principes de fonctionnement de la méthode des puissances instantanées .....	40
III.4.3.1 Calcul des courants perturbateurs .....	42
III Conclusion .....	43

### *Chapitre IV : simulation et discussion*

IV.1 Introduction .....	45
IV.2 Les éléments de configuration utilisés pour la simulation .....	45
IV.3 Test du filtre avec la charge polluante N°01 .....	45
IV.3.1 L'association entre le réseau et la charge polluante avant l'ajout d'un filtre .....	46
IV.3.2 L'association filtre actif -réseau-charge polluante après filtrage .....	49
IV.4 Test du filtre avec la charge polluante N°02 .....	52
IV.4.1 L'association entre le réseau et la charge polluante avant l'ajout d'un filtre .....	52
IV.5 Test du filtrage avec une méthode classique de la charge polluante N°01 .....	58
IV.5.1 L'association entre le réseau et la charge polluante avec une batterie de condensateur .....	58
IV.6 Test du filtrage avec une méthode classique de la charge polluante N°02 .....	60
IV.6.1 L'association entre le réseau et la charge polluante avec une batterie de condensateur .....	60
IV.7 Conclusion .....	63
Conclusion générale .....	65

**Liste des figures**

<b>Figure (1.1)</b> : creux de tensions.....	05
<b>Figure (1.2)</b> : les harmoniques .....	07
<b>Figure (1.3)</b> : Le spectre harmonique du courant de charge polluante.....	11
<b>Figure (1.4)</b> : Diagramme de Fresnel des puissances.....	12
<b>Figure (1.5)</b> : Branchement d'un filtre résonant.....	14
<b>Figure (1.6)</b> : Branchement d'un filtre amorti.....	15
<b>Figure (2.1)</b> : Filtrage actif parallèle.....	20
<b>Figure (2.2)</b> : Filtrage actif série.....	20
<b>Figure (2.3)</b> : Combinaison des filtres actifs série et parallèle.....	21
<b>Figure (2.4)</b> : Structure générale d'un FAP à structure tension.....	23
<b>Figure (2.5)</b> : schéma de principe d'onduleur.....	24
<b>Figure (2.6)</b> : Principe de la commande des courants par hystérésis.....	25
<b>Figure (2.7)</b> : Commande par hystérésis.....	26
<b>Figure (2.8)</b> : Principe de commande des courants par MLI.....	26
<b>Figure (2.9)</b> : Commande par modulation de largeur d'impulsions (a) signal de référence et de porteuse, (b) tension de sortie.....	27
<b>Figure (2.10)</b> : Principe de la commande hystérésis modulée.....	28
<b>Figure (2.11)</b> : Structure de l'onduleur de tension à deux niveaux.....	29
<b>Figure (2.12)</b> : Schéma de liaison entre l'onduleur de tension et le réseau.....	29
<b>Figure (2.13)</b> : représentation vectorielle des tensions de l'onduleur.....	31
<b>Figure (2.14)</b> : Schéma d'un onduleur de tension triphasé.....	32
<b>Figure (2.15)</b> : Schéma synoptique d'un pont redresseur.....	33
<b>Figure (2.16)</b> : Schéma synoptique de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle et charge polluante.....	34
<b>Figure (2.17)</b> : Schéma synoptique d'un réseau triphasé.....	35
<b>Figure (4.1)</b> : Tension de ligne 220 V/50Hz.....	45
<b>Figure (4.2)</b> : Schéma bloc de l'association réseau-charge polluante.....	46

## *Liste des figures*

<b>Figure (4.3)</b> : La tension à la borne de la charge RL.....	46
<b>Figure (4.4)</b> : Le courant au niveau de la charge RL.....	47
<b>Figure (4.5)</b> : Les courants à l'entrée de la charge polluante.....	47
<b>Figure (4.6)</b> : Le courant $I_a$ dans la phase (a).....	47
<b>Figure (4.7)</b> : Le spectre d'harmonique du courant $I_a$ avant filtre.....	48
<b>Figure (4.8)</b> : Schéma Bloc de l'association filtre actif-réseau-charge polluante.....	49
<b>Figure (4.9)</b> : Le courant à l'entrée de la charge polluante.....	49
<b>Figure (4.10)</b> : Le courant identifié ou le courant harmonique.....	50
<b>Figure (4.11)</b> : Le courant du filtre.....	50
<b>Figure (4.12)</b> : Les courants du réseau.....	50
<b>Figure (4.13)</b> : Le courant $I_a$ de la phase (a) du réseau.....	51
<b>Figure (4.14)</b> : Le spectre d'harmonique du courant après filtre.....	51
<b>Figure (4.15)</b> : Schéma bloc de l'association réseau-charge polluante.....	52
<b>Figure (4.16)</b> : La tension à la borne de la charge RL.....	53
<b>Figure (4.17)</b> : Le courant dans la charge RL.....	53
<b>Figure (4.18)</b> : Les courants à l'entrée de la charge polluante.....	53
<b>Figure (4.19)</b> : Le courant $I_a$ de la phase (a).....	54
<b>Figure (4.20)</b> : Le spectre d'harmonique du courant $I_a$ .....	54
<b>Figure (4.21)</b> : Schéma bloc de l'association filtre actif-réseau-charge polluante.....	55
<b>Figure (4.22)</b> : Le courant à l'entrée de la charge polluante.....	55
<b>Figure (4.23)</b> : Le courant identifié ou le courant harmonique.....	56
<b>Figure (4.24)</b> : Le courant du filtre.....	56
<b>Figure (4.25)</b> : Les courants du réseau.....	56
<b>Figure (4.26)</b> : Le courant $I_a$ de la phase (a) du réseau.....	57
<b>Figure (4.27)</b> : Le spectre d'harmonique du courant.....	57
<b>Figure (4.28)</b> : schéma bloc de L'association entre le réseau et la charge polluante avec une batterie de condensateur.....	58
<b>Figure (4.29)</b> : Les courants de ligne (A) .....	59

*Liste des figures*

---

<b>Figure (4.30) :</b> Le courant $I_a$ dans la phase (a).....	59
<b>Figure (4.31) :</b> Le spectre d'harmonique du courant $I_a$ .....	59
<b>Figure (4.32) :</b> schéma bloc de l'association entre le réseau et la charge polluante avec une batterie de condensateur.....	61
<b>Figure (4.33) :</b> Les courants de ligne (A).....	61
<b>Figure (4.34) :</b> Le courant $I_a$ dans la phase (a).....	61
<b>Figure (4.35) :</b> Le spectre d'harmonique du courant $I_a$ .....	62

**List des tableaux**

**Tableau (2.1)** : Tensions en sortie de l'onduleur.....31

**Tableau (4.1)** : Le rang d'harmonique et Son amplitude par rapport à la fondamentale (%).....48

**Tableau (4.2)** : Le rang d'harmonique et Son amplitude par rapport à la fondamentale (%).....51

**Tableau (4.3)** : Le rang d'harmonique et Son amplitude par rapport à la fondamentale (%).....54

**Tableau (4.4)** : Le rang d'harmonique et Son amplitude par rapport à la fondamentale (%).....57

**Tableau (4.5)** : Le rang d'harmonique et Son amplitude par rapport à la fondamentale (%).....60

**Tableau (4.6)** : Le rang d'harmonique et Son amplitude par rapport à la fondamentale (%).....62

**Tableau (4.7)** : les résultats de la simulation.....63

## Liste des symboles

<b>THD</b>	Taux de distorsion harmonique
<b>S</b>	la puissance apparente
<b>P</b>	la puissance active
<b>Q</b>	la puissance réactive
<b>D</b>	la puissance déformante
<b>FP</b>	le facteur de puissance
<b>FAP</b>	filtre actif parallèle.
<b>FAS</b>	Filtre actif série.
<b>MLI</b>	Modulation de largeur d'impulsions
<b>IGBT</b>	Le transistor bipolaire à grille isolée, en anglais InsulatedGateBipolar Transistor.
<b>L</b>	Inductance
<b>R</b>	Résistance
<b>If</b>	Courant efficace du filtre actif
<b>I<sub>ch</sub></b>	Courant efficace de la charge non linéaire
<b>V<sub>dc</sub></b>	Tension aux bornes du condensateur
<b><i>p(t)</i></b>	Puissance réelle instantanée
<b><i>p<sub>0</sub>(t)</i></b>	Puissance homopolaire instantanée
<b><math>\bar{p}</math></b>	Puissance continue liée à la composante fondamentale active
<b><math>\bar{q}</math></b>	Puissance continue liée à la composante fondamentale réactive
<b><math>\tilde{p}</math> et <math>\tilde{q}</math></b>	Puissances alternatives liées à la somme des composantes perturbatrices
<b><math>I_\alpha, I_\beta</math></b>	Courants perturbateurs calculés dans le repère $\alpha$ - $\beta$

## **Introduction générale**

Au cours des dernières décennies, les convertisseurs statiques et d'autres systèmes basés sur l'électronique de puissance ont été largement adoptés, l'utilisation répandue de ces dispositifs basés sur l'électronique de puissance a entraîné une détérioration notable de la qualité de l'énergie électrique, ces équipements étant considérés comme des charges perturbatrices.

Les appareils électriques non linéaires tels que les redresseurs à diodes et à thyristors, les gradateurs, les ordinateurs avec leurs périphériques, ainsi que les équipements de climatisation et d'éclairage utilisant des tubes fluorescents, génèrent une consommation de courant non sinusoïdal. Même lorsqu'ils sont alimentés par une tension sinusoïdale, ces appareils absorbent des courants qui ne sont pas sinusoïdaux, ce qui entraîne l'apparition de pollutions harmoniques dans les courants et les tensions des réseaux de distribution électrique.

Pour remédier à cette situation, diverses mesures ont été mises en œuvre pour atténuer les effets des harmoniques. Cependant, les premières solutions traditionnelles qui ont été appliquées se sont révélées insuffisantes et incapables de s'ajuster efficacement à certaines contraintes spécifiques.

Avec l'émergence de l'électronique de puissance, notamment des composants de puissance tels que les IGBT, de nouveaux dispositifs modernes ont été développés pour répondre aux besoins spécifiques et résoudre les problèmes liés aux harmoniques [1]. La découverte du filtre actif de puissance a véritablement révolutionné le domaine de l'énergie. Ce dispositif, qui existe sous différentes formes telles que le filtre actif parallèle, le filtre actif série et les filtres hybrides, a ouvert de nouvelles perspectives ; ces filtres actifs de puissance présentent une meilleure réponse aux contraintes industrielles et sont capables de s'adapter aux variations de l'impédance du réseau et de la charge de manière plus efficace. Actuellement, le filtre actif parallèle est considéré comme une solution moderne, appropriée et hautement efficace pour remédier à la pollution harmonique, dans le but de rétablir la forme sinusoïdale du courant dans le réseau électrique de distribution de l'énergie.

L'objectif de cette tâche est d'examiner comment filtrer les harmoniques de courant à l'aide d'un filtre actif parallèle, et de déterminer les harmoniques en les identifiant par le biais de simulations.

Le mémoire est organisé en quatre chapitres :

## *Introduction générale*

---

Dans le premier chapitre de notre travail, nous avons étudié les perturbations potentielles dans un réseau électrique basse tension sont répertoriées, leurs causes et conséquences sont exposées. Les solutions de dépollution disponibles.

Dans le deuxième chapitre, l'accent sera mis sur l'étude de la commande du filtre actif parallèle et la présentation du modèle mathématique associé.

Dans le troisième chapitre, nous avons introduit et défini la méthode d'identification des courants harmoniques en utilisant les calculs des puissances réelle et imaginaire instantanées. Cette méthode s'est avérée la plus efficace, la plus simple à mettre en œuvre et particulièrement adaptée pour détecter d'autres formes de perturbations.

Dans le quatrième chapitre de notre étude, nous avons entrepris l'étude de la simulation de l'ensemble comprenant le réseau, la charge non linéaire, le filtre actif parallèle ainsi que les batteries de condensateurs. Nous avons utilisé l'environnement Matlab/Simulink pour mener ces simulations. Ensuite, nous avons comparé les résultats obtenus entre l'utilisation du filtre actif parallèle et l'utilisation des batteries de condensateurs. Dans la suite de ce chapitre, nous présentons les résultats détaillés de ces simulations.

**CHAPITRE 1**

**LES PERTURBATIONS**

**DANS LE RÉSEAU**

**ÉLECTRIQUE ET**

**STRATÉGIES DE**

**DÉPOLLUTION**

## I.1 Introduction

Ces dernières années, la croissance de l'utilisation des équipements électriques a contribué de manière significative à la détérioration de la qualité de l'énergie dans les réseaux électriques. Cette tendance s'explique notamment par l'essor des convertisseurs statiques, tels que les semi-conducteurs, les micro-ordinateurs et les variateurs de vitesse, tant dans le secteur industriel que résidentiel. L'ajout de ces convertisseurs dans les installations de conversion d'énergie électrique a engendré de nombreuses applications qui améliorent le service offert aux clients.

Une onde de courant sinusoïdale d'amplitude et de fréquence constante est caractérisée d'une bonne qualité d'énergie. Toutefois, les convertisseurs ont un impact sur la qualité des courants et des tensions des réseaux de distribution, les rendant non sinusoïdaux.

Même lorsqu'ils sont alimentés par une source de tension sinusoïdale, ces systèmes sont considérés comme des charges non-linéaires qui consomment des courants non-sinusoïdaux.

## I.2 Paramètres de la qualité de l'énergie électrique

Les paramètres de la qualité de l'énergie électrique peuvent inclure plusieurs mesures, telles que les tensions et courants harmoniques, les déséquilibres de tension, les transitoires de tension, les variations de tension et les interruptions de courant.

### I.2.1 Creux et coupures de tensions

Le creux de tension est une diminution de son amplitude (entre 10% à 90% de la tension nominale) pendant un temps de 10 millisecondes jusqu'à quelques secondes.

Les creux de tension sont dus en général à des défauts dans les réseaux publics ou ceux des utilisateurs. Ils apparaissent aussi lors des manœuvres d'enclenchement mettant en jeu des courants de fortes intensités (moteurs, transformateurs, etc.) [1].

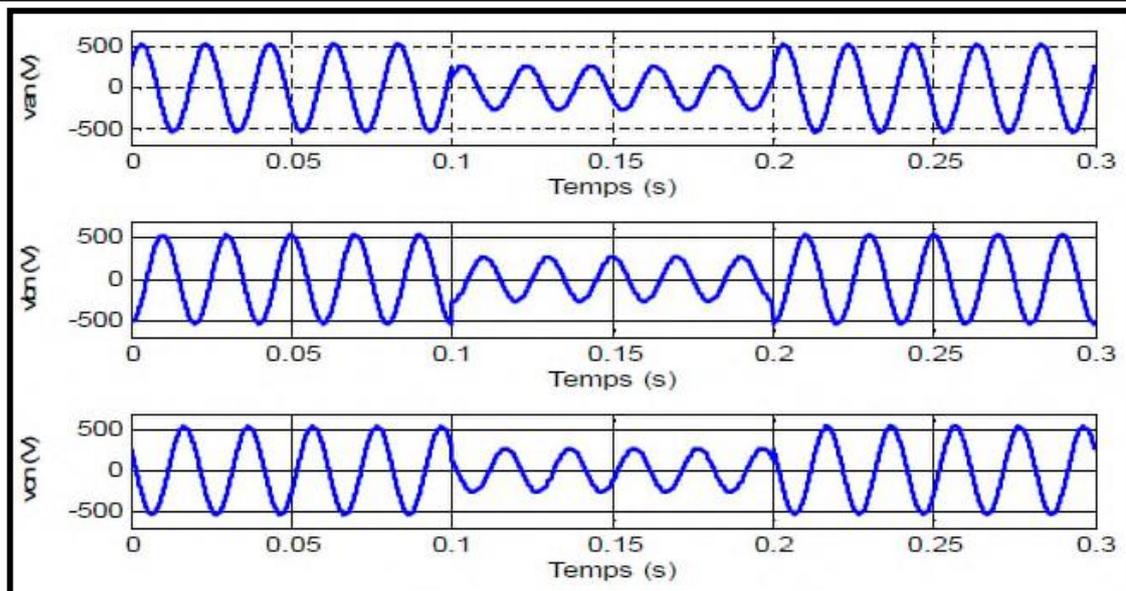


Figure (1.1) : creux de tensions.

## I.2.2 Fluctuations de tension

### I.2.2.1 Variation Lentes de la Tension

Augmentation ou diminution de tension provoquée par la variation de la charge totale du réseau de distribution ou une partie de ce réseau.

Ces variations sont souvent acceptables pour les équipements. Et ces origines c'est l'élévation ou baisse de la charge électrique (variation) sur le réseau électrique [2].

### I.2.2.2 Variation rapide de la Tension

Papillotement (flicker) : Impression d'instabilité de la tension visuelle due à un stimulus lumineux dont la luminosité ou la répartition spectrale fluctuent dans le temps.

Une variation de tension de 0,5 %, 6 à 8 fois par seconde, engendre un flicker visible ! Le flicker ne perturbe que rarement les machines [2].

## I.2.3 Déséquilibre du système triphasé de tension

Le déséquilibre d'un système triphasé s'observe lorsque les trois tensions ne sont pas égales en amplitude et/ou ne sont pas déphasées régulièrement de  $120^\circ$  les unes par rapport aux autres. Le taux de déséquilibre dans un système triphasé est défini par le rapport d'amplitude de la séquence négative sur l'amplitude de la séquence positive, exprimé en pourcentage. Cette définition peut être appliquée pour la tension ou le courant. Typiquement le déséquilibre des tensions d'un réseau triphasé est moins de 3 %. Le déséquilibre des courants peut être considérablement plus important,

particulièrement dans la présence des charges monophasées. Analytiquement, le taux du déséquilibre de tension est représenté par l'équation (1.1) [3] :

$$\text{VUF (Voltage Un balance Factor)} = \frac{V_n}{V_p} 100\% \dots (1.1)$$

Avec  $V_n$  et  $V_p$  sont les amplitudes des séquences négative et positive respectivement.

## I.2.4 Variation de fréquence

Les variations de fréquence sont très faibles (moins de 1 %) au sein du réseau synchrone en régime normal de fonctionnement et ne causent généralement pas de préjudice aux équipements électriques ou électroniques.

La situation peut être différente dans un petit réseau isolé. Certains processus industriels nécessitent un réglage très précis de la vitesse des moteurs et peuvent subir des dysfonctionnements en cas d'alimentation par un groupe de secours mal conçu [4].

## I.2.5 Charges linéaires et non linéaires

Les récepteurs peuvent être classés en deux familles principales :

- Les récepteurs linéaires (ou charges linéaires).
- Les récepteurs non-linéaires (ou charges non-linéaires). [5]

Une charge est dite linéaire si, alimentée par une tension sinusoïdale, elle consomme un courant sinusoïdal. Cependant, le courant et la tension peuvent être déphasés. Les charges linéaires couramment utilisées sont constituées de résistances, de capacités et d'inductances.

Une charge non linéaire est considérée comme des générateurs de courants harmoniques (pour les rangs  $p \geq 2$ ). Ces courants sont modélisés par des sources de courant injectées dans le réseau. Un tel récepteur alimenté par une tension sinusoïdale, consomme un courant non-sinusoïdal. Typiquement, les charges utilisant l'électronique de puissance sont non-linéaires. Or, elles sont de plus en plus nombreuses et leur part dans la consommation d'électricité ne cesse de croître [6].

## I.3 Les harmoniques

Une harmonique se réfère à une sinusoïde qui est présente dans une onde périodique et dont la fréquence est un multiple entier de la fréquence fondamentale. L'analyse des harmoniques se concentre généralement sur une plage de fréquences entre 100 Hz et 2000 Hz. Il est également possible qu'il y ait des fréquences intermédiaires, appelées inter-harmoniques.

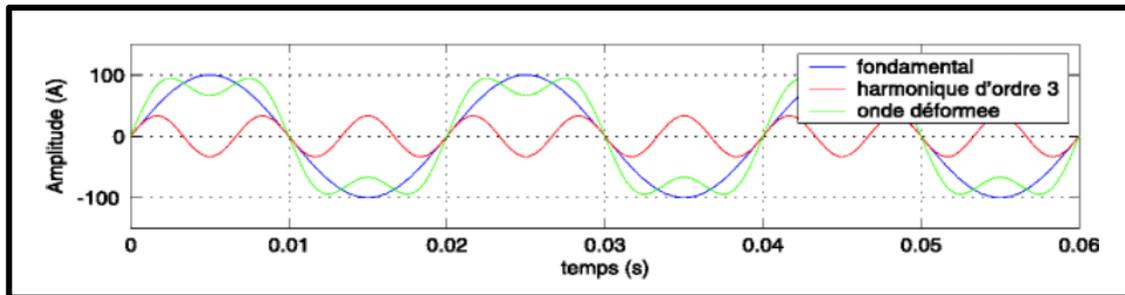


Figure (1.2) : les harmoniques

### I.3.1 Effets des harmoniques

Après avoir identifié clairement les sources d'harmoniques, il est nécessaire d'analyser les conséquences de leur présence sur les équipements et les installations électriques.

#### I.3.1.1 La résonance

La présence des condensateurs, comme ceux utilisés pour la compensation du facteur de puissance peut avoir comme effet le phénomène de résonances, qui va créer en conséquence des courants excessifs et probablement endommager ces condensateurs.

Diverses formes de résonances ont été examinées dans la littérature, notamment les résonances parallèles et les résonances en série [2].

#### I.3.1.2 L'effet des harmoniques sur les machines tournantes

Les tensions non sinusoïdales appliquées aux machines électriques peuvent causer un sur-échauffement de ces dernières.

Les moteurs fonctionnent couramment à condition que la déformation harmonique reste dans le 5% recommandé par les règlements, au-dessus de cette limite ils rencontreront souvent des problèmes d'échauffement excessif.

Les tensions ou les courants harmoniques provoquent des pertes additionnelles dans les enroulements du stator et du rotor. Les pertes dans les conducteurs du stator et du rotor sont plus grandes que celles liées à l'effet Joule en raison des courants de Foucault et de l'effet de peau [2].

## I.4 Source des harmoniques

La prolifération des équipements électriques utilisant des convertisseurs statiques entraîné ces dernières années une augmentation sensible du niveau de pollution harmonique des réseaux électriques. Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale, ou parfois à des fréquences quelconques. Le passage de ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peut entraîner des tensions harmoniques aux points de raccordement et ainsi polluer les consommateurs alimentés par tensions harmoniques [7].

## I.5 Les Caractéristiques de perturbation harmoniques

Les perturbations harmoniques altèrent les signaux électriques alternatifs en présentant des composantes de fréquences qui sont des multiples de la fréquence fondamentale du signal, ci-dessous se trouvent les caractéristiques clés des perturbations harmoniques :

### ➤ Amplitude

Les fluctuations de tension et de courant résultant des perturbations harmoniques peuvent provoquer des dommages aux équipements électriques. L'ampleur de ces perturbations est proportionnelle à l'importance de la perturbation harmonique. En d'autres termes, plus la perturbation harmonique est importante, plus l'amplitude de la tension ou du courant est susceptible d'être perturbée.

### ➤ Fréquence

Les perturbations harmoniques se réfèrent à des fréquences qui sont des multiples de la fréquence fondamentale, et leur ordre harmonique peut être déterminé (2ème, 3ème, 4ème, etc.).

### ➤ Distorsion

Cette onde n'est alors plus sinusoïdale, et peut être considérée comme représentable par une onde fondamentale à 50 Hz, associée soit à des harmoniques de fréquence multiple entier de 50 Hz, soit même parfois à des ondes de fréquence quelconque [8].

### ➤ La dissymétrie du système triphasé

Que l'on appelle déséquilibre

### I.5.1 Grandeur harmonique

C'est l'une des composantes sinusoïdales de la variation de la grandeur physique possédant une fréquence multiple de celle de la composante fondamentale. L'amplitude de l'harmonique est généralement de quelques pour cent de celle du fondamental [9].

### I.5.2 Rang de l'harmonique

Le terme "rang de l'harmonique" désigne l'ordre séquentiel d'une harmonique en relation avec le fondamental. Pour illustrer, si le fondamental a une fréquence de 50 Hz et que la troisième harmonique a une fréquence de 150 Hz, alors on peut dire que le rang de cette harmonique est de 3.

### I.5.3 Valeur efficace d'une grandeur alternative

La valeur efficace, également connue sous le nom de valeur RMS (Root Mean Square) en anglais, est une mesure statistique qui permet de déterminer la valeur moyenne d'une grandeur alternative qui fluctue dans le temps.

On calcule la valeur efficace en prenant la racine carrée de la moyenne des carrés des valeurs d'une grandeur alternative sur une période donnée. Cette mesure est couramment employée pour quantifier la puissance d'un signal alternatif.

La valeur efficace est largement employée en électricité pour évaluer la puissance moyenne d'un signal alternatif. Elle permet également de comparer des signaux ayant des formes et des amplitudes différentes, en supposant qu'ils ont une puissance efficace identique.

### I.5.4 Série de Fourier

Ceci revient à dire que : « tout signaux, périodique de période  $T=1/f$ , peut se décomposer en une somme infinie de termes sinus et cosinus de fréquences multiples de  $f$  [10].

Mathématiquement, cela s'écrit :

$$s(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (1.2)$$

La valeur  $a_0$  représente la valeur moyenne de  $s(t)$ .

On calcule les coefficients  $a_n$  et  $b_n$  avec les formules suivantes :

$$a_n = \frac{2}{T} \cdot \int_0^T f(t) \cdot \cos(n\omega t) dt \quad \text{Et} \quad b_n = \frac{2}{T} \cdot \int_0^T f(t) \cdot \sin(n\omega t) dt \quad (1.3)$$

De plus, il existe quelques prés requis qui permettent de ne pas faire de calculs inutiles :

- Si la fonction est paire, les coefficients  $b_n$  sont nuls.
- Si la fonction est impaire, les coefficients  $a_n$  sont nuls.
- Si la fonction possède une symétrie sur ses deux demi-périodes, les termes d'indice pairs sont nuls [11].

## I.5.5 Taux d'harmonique de distorsion

### I.5.5.1 Le taux Individuel de distorsion

Mesure l'importance de chaque rang par rapport au fondamental [12].

$$D (\%) = \frac{Y_n}{Y_1} \cdot 100 \quad (1.4)$$

### I.5.5.2 Le taux Global de distorsion

Le taux global de distorsion en courant ou THDI (Total Harmonic Distorsion - I pour courant), mesure l'importance des harmoniques de tous les rangs par rapport au fondamental [12].

$$THD (\%) = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n Y_n^2}}{Y_1} \times 100 \quad (1.5)$$

- $Y_1$  : La valeur efficace de la composante fondamentale (du courant ou de la tension).
- $Y_n$  : Les valeurs efficaces exactes des différentes composantes harmoniques (du courant ou de la tension)[10].

Il faut préciser s'il s'agit d'un THD de courant : THDI ou de tension : THDV. Contrairement au niveau de courant, le niveau de tension est une valeur fixe et prédéfinie pour un réseau. On définit donc les contraintes en termes de THDV. Le fait d'exprimer l'amplitude de chaque harmonique en valeur efficace, permet de quantifier l'effet thermique de l'ensemble.

En effet, supposons que ce courant  $i(t)$  traverse une résistance  $R$ , la puissance dissipée par effet Joule est [12]:

$$P_j = R * I^2 = R * I_1^2 + R * I_5^2 + R * I_7^2 + R * I_{11}^2 + \dots \quad (1.6)$$

Ce qui permet de calculer :

$$I_{eff} = \sqrt{\sum_1^\infty I_h^2} \quad (1.7)$$

### I.5.6 Facteur de puissance $F_p$

Le facteur de puissance est une propriété d'un appareil électrique. Lorsqu'un circuit électrique est alimenté avec un courant qui varie dans le temps, le facteur de puissance de ce circuit est calculé en divisant la puissance active en KW consommée par l'appareil par la puissance apparente en KVA fournie à l'appareil.

Si aucune harmonique n'est présente, le rapport entre la puissance active et la puissance apparente est égal au cosinus de l'angle de déphasage, représenté par  $\varphi$  [13].

$$F_p = \cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{\text{puissance active (KW)}}{\text{puissance apparente (KVA)}}. \text{ (Le } \cos \varphi \text{ est compris entre 0 et 1)[13]} \quad (1.8)$$

### I.5.7 Spectre de fréquence

Le spectre de fréquence est une représentation visuelle qui permet de visualiser la distribution des fréquences présentes dans un signal donné. Cette représentation est fréquemment employée en analyse de signal pour examiner les différentes composantes fréquentielles du signal et pour en déterminer les caractéristiques principales, telles que la fréquence dominante, l'amplitude et la largeur de bande.

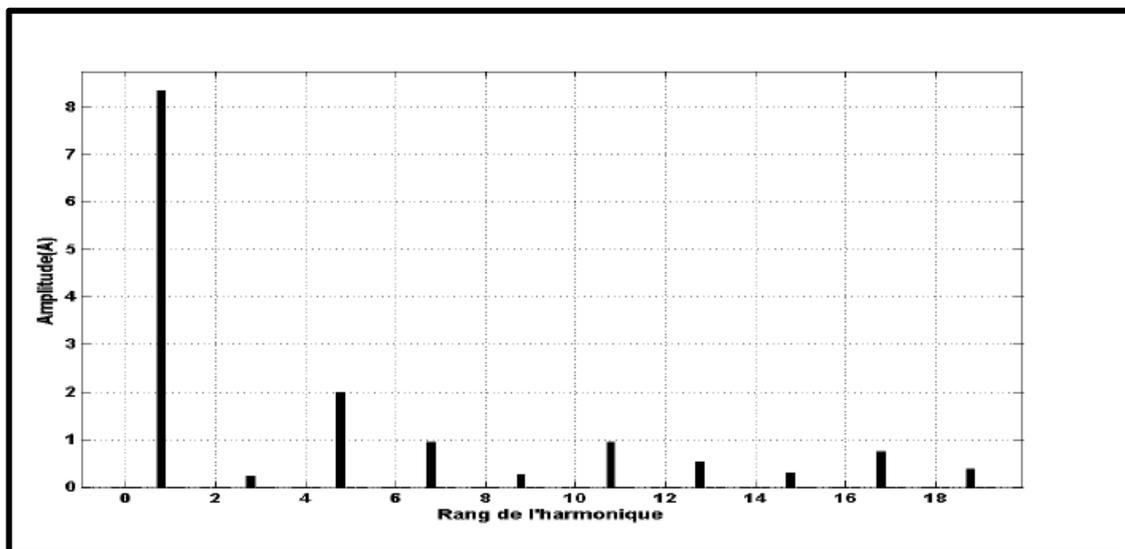
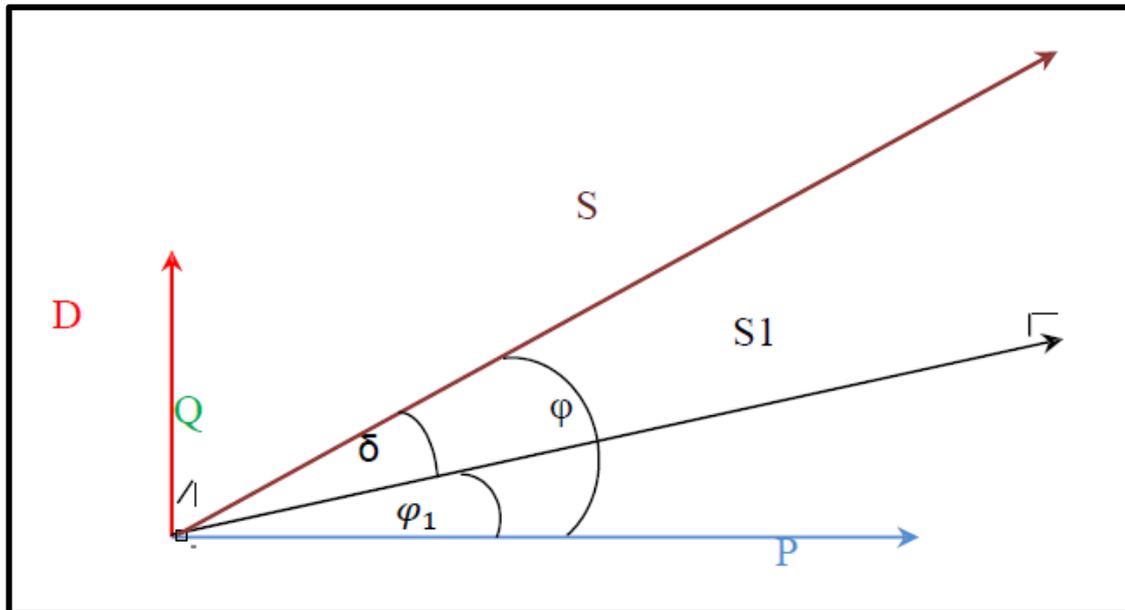


Figure (1.3) : Le spectre harmonique du courant de charge polluante.

## I.6 Influence des harmoniques sur le facteur de puissance $F_p$

Normalement, pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance est donné par rapport entre la puissance  $P$  et puissance apparente  $S$ .

En présence des harmoniques, la puissance apparente  $S$  est composée de trois parties active  $P$ , réactive  $Q$  et déformante  $D$ , cette dernière est la puissance provoquée par les courants harmoniques, tel que  $I=I_f+I_h$ .



**Figure (I.4) :** Diagramme de Fresnel des puissances.

En présence des harmoniques, la puissance apparente  $S$  est composée de trois parties comme le montre l'équation suivante :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (1.9)$$

Où :  $Q$  : la puissance réactive associée au courant fondamental.

$D$  : la puissance déformante due aux harmoniques du courant

$$Où : P = 3UI_1 \cos(\varphi_1) = 3UI_1 F_{dis} \cos(\varphi_1) \quad (1.10)$$

Où  $F_{dis}$  représente le facteur de distorsion. Il vaut 1 lorsque le courant est parfaitement sinusoïdal et il décroît lorsque la déformation de l'onde s'accroît [11].

$\varphi_1$  : représente le déphasage entre le courant fondamental et la tension

$$Q = 3.U.I_1 \sin(\varphi_1) \quad (1.11)$$

$$Et \quad D = 3.U\sqrt{\sum_{h=2}^n I_h^2} \quad (1.12)$$

Finalement le facteur de puissance  $F_p$  est donné par l'expression [11] :

$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2+Q^2+D^2}} \quad (1.13)$$

## I.7 Les solutions traditionnelles

Les méthodes classiques de dépollution consistent principalement en des approches passives ou en des modifications de structure visant à traiter les harmoniques directement.

### I.7.1 Utilisation d'inductance anti-harmonique

Cette disposition consiste à protéger les condensateurs, destinés à améliorer le  $\cos \varphi$ , en plaçant une inductance en série. Cette inductance est calculée de façon à ce que la fréquence de résonance ne corresponde à aucun des harmoniques présents. Les fréquences typiques d'accord sont pour un fondamental 50 Hz : 135 Hz (rang 2,7), 190 Hz (rang 3,8) et 225 Hz (rang 4,5)

Ainsi, pour le fondamental la batterie peut assurer sa fonction d'amélioration du  $\cos \varphi$ , tandis que l'impédance élevée de l'inductance limite l'amplitude des courant harmoniques. Les condensateurs à gradins doivent tenir compte des fréquences de résonance à privilégier [14].

### I.7.2 Augmentation de la puissance de court-circuit

Dans un système électrique, l'accroissement de la puissance de court-circuit peut résulter de diverses causes telles qu'une hausse de la tension, de la fréquence ou du courant. Cette situation peut être engendrée par l'ajout de charges supplémentaires, l'augmentation de la production d'électricité, la présence de défauts dans le réseau ou encore des surtensions.

L'accroissement de la puissance de court-circuit peut entraîner des effets néfastes comme des surintensités dans les équipements électriques, des dégradations des transformateurs et un risque d'incendie, ce qui peut causer de graves dommages.

### I.7.3 Les filtres passifs

Le principe d'un filtre passif est de modifier localement l'impédance du réseau, de façon à dériver les courants harmoniques et à diminuer les tensions harmoniques là où c'est nécessaire. On associe des éléments capacitifs et inductifs de manière à obtenir une résonance série accordée à une

fréquence choisie. Il existe deux classes de filtres passifs (résonant, amorti) permettant de réduire les harmoniques [15].

### I.7.3.1 Filtres passifs résonant

Le filtre résonant se compose d'un condensateur et d'une inductance montés en série. Ils sont connectés en parallèle à l'installation et sont réglés sur une harmonique spécifique à supprimer comme le montre figure (1.5). À la fréquence de résonance, l'impédance du filtre est très faible, ce qui en fait un court-circuit pour l'harmonique ciblé [16].

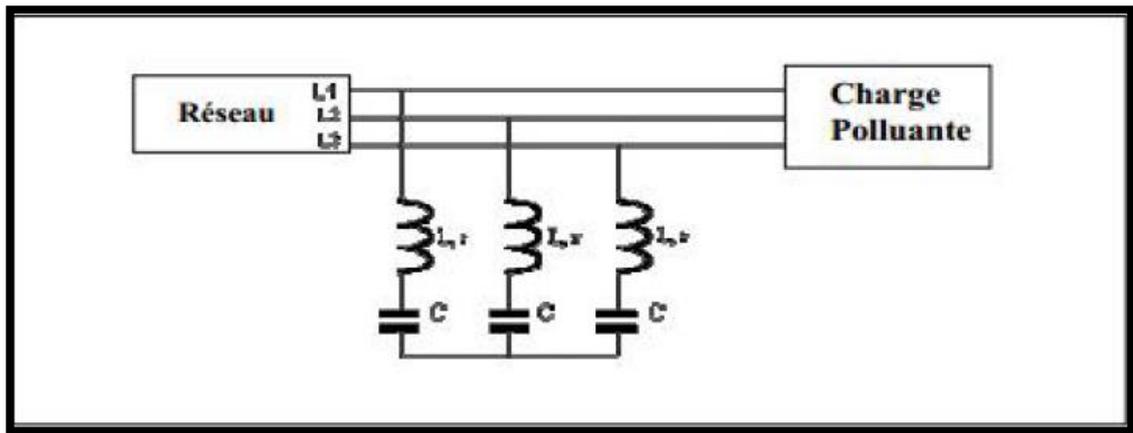


Figure (1.5) : Branchement d'un filtre résonant.

### I.7.3.2 Filtres passifs amorti

Pour filtrer les signaux électriques, un filtre amorti est composé d'un élément en série, à savoir une capacité, ainsi qu'un circuit comportant une inductance et une résistance disposées en parallèle, appelé résistance d'amortissement. Ce type de filtre est habituellement employé dans des applications où les critères de performance ne sont pas très exigeants. Il est couramment utilisé pour éliminer les hautes fréquences du spectre plutôt qu'une fréquence spécifique, ce qui le qualifie comme filtre passe-haut [16].

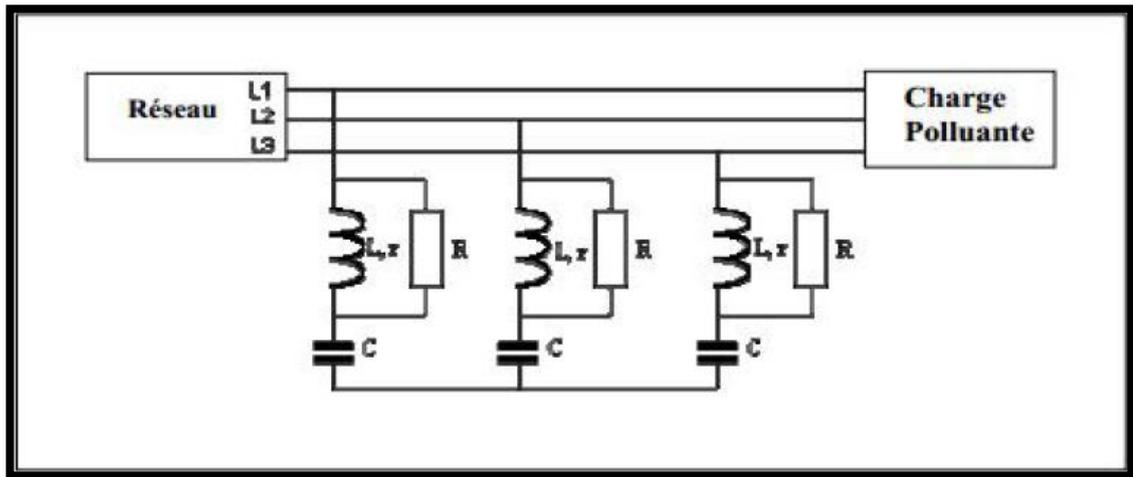


Figure (1.6) : Branchement d'un filtre amorti.

## I.8 Les avantages et les inconvénients des filtres passifs

Voici quelques avantages et inconvénients des filtres passifs :

### *Les avantages*

- Faible coût : Les filtres passifs sont habituellement plus abordables que les filtres actifs, car ces derniers requièrent l'ajout de composants électroniques supplémentaires comme des amplificateurs.
- Facile à concevoir et à fabriquer : La simplicité de conception et de fabrication des filtres passifs les rend avantageux pour de nombreuses applications.
- Pas besoin d'une source d'alimentation externe : Comme ils ne nécessitent pas d'alimentation externe, les filtres passifs sont pratiques pour être utilisés dans des environnements où l'alimentation est difficilement accessible.
- Fonctionnement sans bruit : Les filtres passifs sont utiles dans les applications qui sont sensibles au bruit, car ils ne génèrent pas de bruit supplémentaire lorsqu'ils filtrent le signal.

### *Inconvénients*

- Atténuation des signaux : L'atténuation des signaux par les filtres passifs peut impacter la qualité de la transmission de l'information.
- Pertes de puissance : L'utilisation de filtres passifs peut occasionner une perte de puissance, diminuant ainsi la puissance de sortie.
- Non réglable : La plupart des filtres passifs ne sont pas ajustables, ce qui les rend difficiles à adapter en cas de variations dans les conditions de fonctionnement.

- Limitations de fréquence : La plage de fréquences de fonctionnement des filtres passifs est souvent limitée, ce qui peut restreindre leur utilisation dans des applications nécessitant une haute fréquence.

## **I.9 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons examiné les divers types et les sources de perturbations harmoniques qui peuvent altérer la qualité des tensions et/ou des courants du réseau électrique, ainsi que leurs conséquences dommageables sur les équipements électriques en place. Ces conséquences peuvent aller de l'échauffement et de la dégradation des performances à la destruction totale de ces équipements.

Nous avons également examiné les solutions traditionnelles de dépollution pour remédier à ces problèmes. Les filtres passifs sont une solution traditionnelle souvent utilisée, mais ils ont tendance à être encombrants et à résonner, ce qui est désavantageux. De plus, ces filtres ne peuvent pas s'adapter à l'évolution du réseau et aux changements dans les charges polluantes, dans le but de surmonter les inconvénients des filtres passifs.

**CHAPITRE 2**  
**SOLUTIONS**  
**MODERNES ET**  
**MODÉLISATION D'UN**  
**FILTRE ACTIF**  
**PARALLÈLE**

## II.1 Introduction

L'utilisation de filtres actifs est devenue attrayante en raison des limitations associées aux méthodes de dépollution discutées dans le chapitre précédent, notamment l'apparition de résonances dans les filtres passifs, ainsi que des avancées récentes dans le domaine des composants semi-conducteurs commandables.

Au cours de ce chapitre, nous allons examiner en détail le filtre actif parallèle ainsi que son système de régulation. Le filtre actif fonctionne en injectant un courant harmonique de même amplitude, même forme et en opposition de phase avec celui produit par la charge polluante.

## II.2 Les solutions modernes

### II.2.1 Le filtre actif

L'introduction de l'électronique de puissance et l'arrivée de semi-conducteurs de puissance tels que MOSFET et IGBT ont entraîné l'émergence de nouvelles méthodes pour éliminer les harmoniques, remplaçant les méthodes traditionnelles. Ces solutions sont considérées comme efficaces pour nettoyer les réseaux électriques et surmonter les désavantages associés aux filtres passifs, qui sont considérés comme des méthodes de dépollution traditionnelles.

Il y'a deux types de structures sont couramment utilisés parmi toutes les solutions modernes disponibles :

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

#### II.2.1.1 Filtre actif parallèle (FAP)

Il est aussi appelé compensateur shunt, connecté en parallèle sur le réseau de distribution. Il est souvent commandé comme un générateur de courant. Il restitue dans le réseau électrique les courants harmoniques égaux à ceux absorbés par la charge non linéaire mais en opposition de phase, de telle sorte que le courant fourni par le réseau soit sinusoïdal et en phase avec la tension simple correspondante. Son indépendance vis-à-vis de la source et de la charge lui assure l'auto-adaptabilité, la fiabilité et la bonne performance.

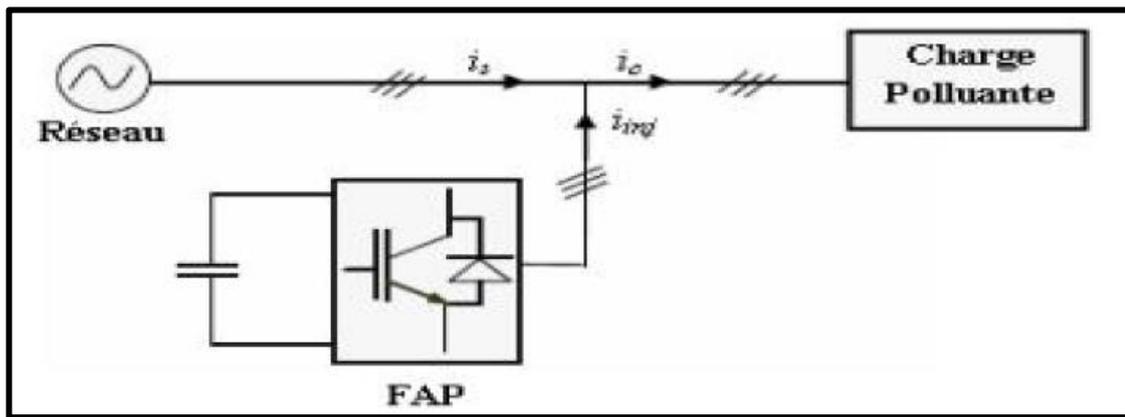


Figure (2.1) : Filtrage actif parallèle.

### II.2.1.2 Filtre actif série (FAS)

Le filtre actif série est connecté en série sur le réseau. Il se comporte comme une source de tension qui engendre des tensions harmoniques dont la somme avec la tension réseau est une onde sinusoïdale. Il est destiné à protéger les installations sensibles aux tensions perturbatrices (harmoniques, creux, déséquilibres) provenant de la source et également celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Cette structure est proche, dans le principe, des conditionneurs de réseau. Toutefois, cette topologie présente quelques difficultés et inconvénients lors de sa mise en œuvre : elle ne permet pas, par exemple, de compenser les courants harmoniques consommés par la charge.

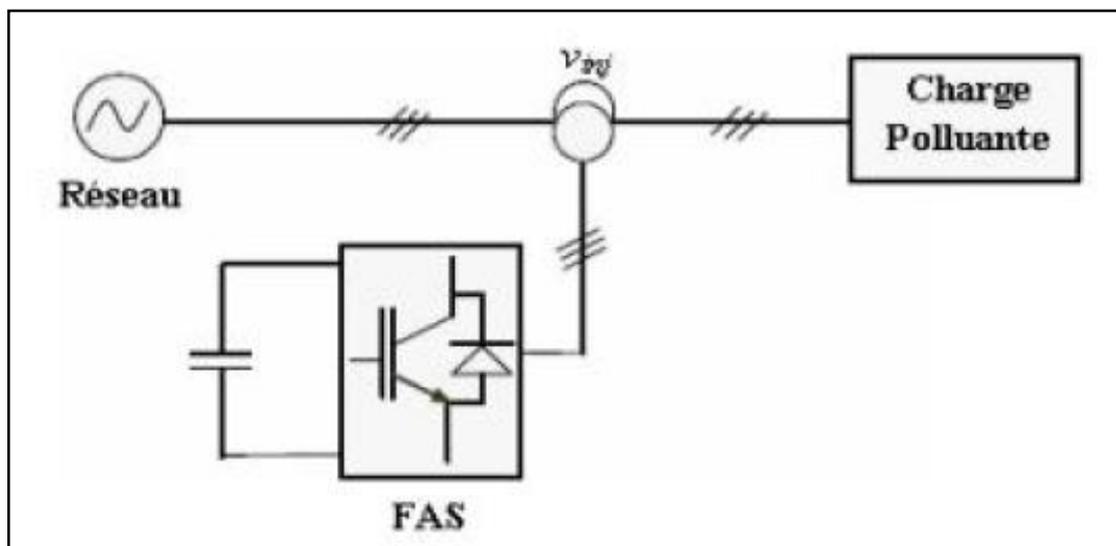


Figure (2.2) : Filtrage actif série.

### II.2.1.3 Combinaison filtre actif série-parallèle

C'est une solution de compensation universelle basée sur le fonctionnement simultané des filtres actifs parallèle et série. Cette nouvelle topologie est appelée combinaison parallèle série actifs ou Unified Power Quality Conditionner (UPQC).

L'UPQC possède les avantages cumulés des filtres actifs parallèles et série. Le filtre actif série, lorsqu'il est placé en amont du filtre actif parallèle, permet de dépolluer la source des tensions perturbatrices. Lorsqu'il est placé en aval, il permet d'isoler la charge de la source perturbée [1].

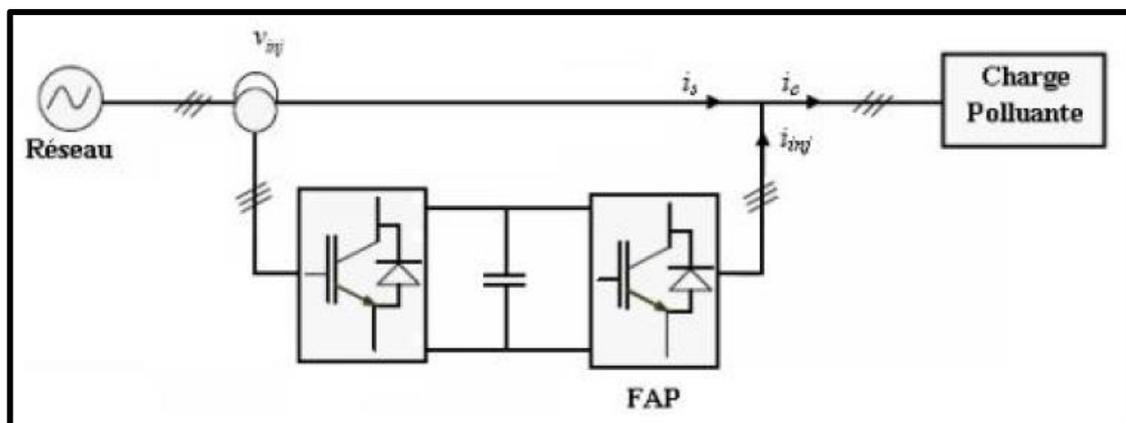


Figure (2.3) : Combinaison des filtres actifs série et parallèle.

### II.2.1.4 Filtrage hybride

Le filtrage hybride est une méthode de filtration qui améliore les capacités du filtre en utilisant à la fois des éléments actifs et passifs. En combinant les avantages des filtres passifs, tels que leur simplicité et fiabilité, avec ceux des filtres actifs, tels que leur précision et leur flexibilité de conception, les filtres hybrides peuvent offrir une meilleure sélectivité, une réponse en fréquence plus régulière et une atténuation plus élevée des signaux non désirés. Cette technique est couramment utilisée pour améliorer les performances des filtres en général.

## II.2.2 Les avantages et les inconvénients des filtres actifs

Voici quelques avantages et inconvénients associés à l'utilisation de filtres actifs :

#### *Les avantages*

- **Flexibilité** : Il est possible de concevoir des filtres actifs pour répondre à des exigences précises, ce qui offre une grande souplesse dans leur utilisation.

- **Précision** : Les filtres actifs sont appropriés pour des applications telles que le traitement de signaux audio et vidéo, car ils peuvent atteindre des niveaux de précision élevés dans leur réponse en fréquence.
- **Amplification** : Dans certaines applications, il peut être utile d'amplifier le signal filtré, et les filtres actifs peuvent être utilisés à cette fin.

### *Les inconvénients*

- **Coût** : La présence de composants actifs tels que les amplificateurs opérationnels peut rendre les filtres actifs plus coûteux que les filtres passifs.
- **Complexité** : Les filtres actifs peuvent être plus difficiles à concevoir et à mettre en œuvre que les filtres passifs en raison de leur complexité, ce qui peut rendre leur utilisation plus difficile pour les personnes qui ne sont pas des spécialistes.
- **Bruit** : Dans certaines applications sensibles au bruit, l'utilisation de filtres actifs peut poser un problème car les amplificateurs opérationnels utilisés peuvent introduire du bruit dans le signal filtré.

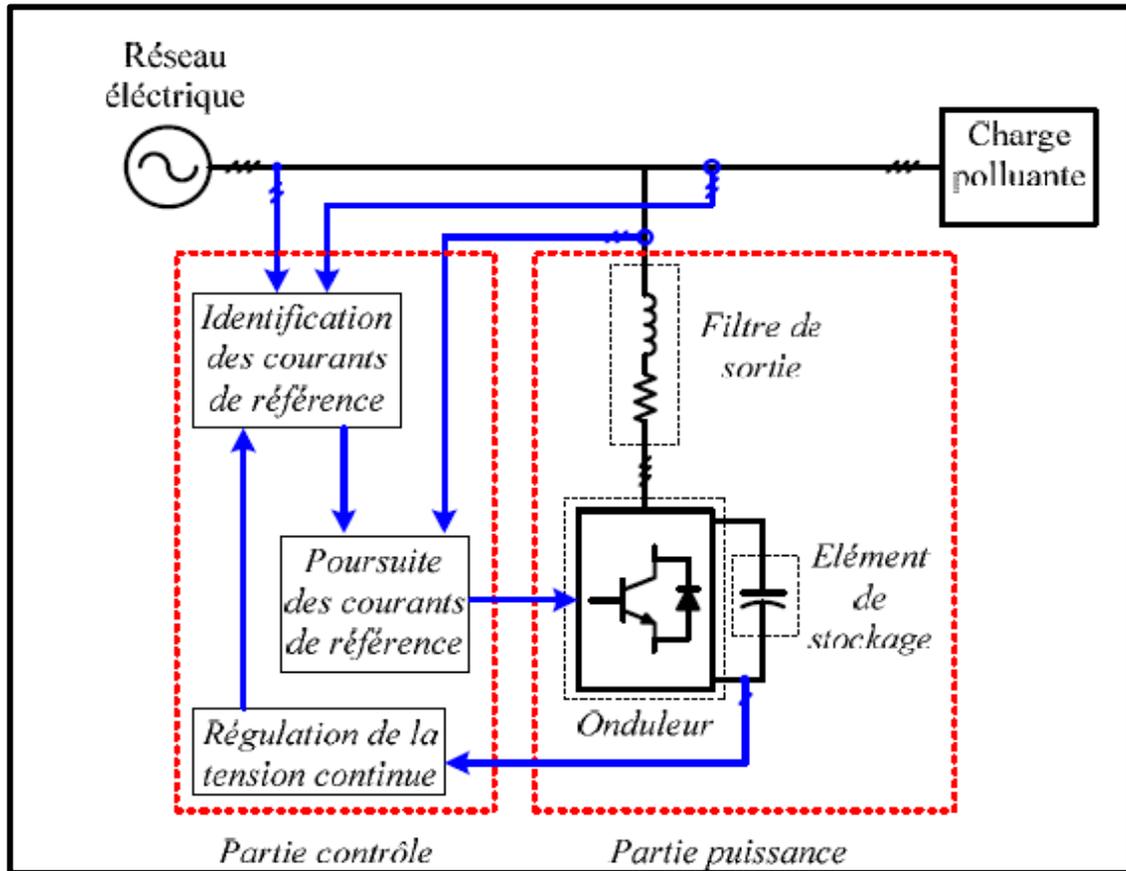
## **II.3 Le rôle du filtre actif**

Afin de garantir une alimentation électrique de meilleure qualité, le filtre actif est conçu pour réduire la pollution électrique en injectant un courant harmonique qui est de même amplitude, de même forme et en opposition de phase avec celui produit par la charge polluante. Cette approche permet d'éliminer les effets indésirables de la charge polluante tels que les déséquilibres, les harmoniques et les variations de fréquence.

## **II.4 Structure générale d'un filtre actif parallèle**

La structure générale d'un FAP triphasé de type tension est présentée par la Figure (II.4) où l'on distingue l'onduleur et le filtre de sortie de la partie puissance ainsi que les différents blocs de la partie contrôle-commande. La partie puissance est généralement constituée d'un onduleur de tension à base d'interrupteurs de puissance, d'un circuit de stockage d'énergie (souvent capacitif) et d'un filtre de sortie du premier ordre. La partie contrôle-commande est composée d'une première étape dont le rôle est l'identification des harmoniques et d'une seconde étape qui réalise la régulation de la tension continue. Une troisième et dernière étape génère la commande de l'onduleur.

Cette étude se limite au cas où la source de tension est sinusoïdale où le courant absorbé par la charge est entaché de composantes harmoniques. Dans ces conditions, le taux global de distorsion harmonique (THD) est bien adapté pour qualifier le degré dépollution harmonique sur le réseau électrique [17].



**Figure (2.4) :** Structure générale d'un FAP

La partie puissance est constituée :

- D'un onduleur à base d'interrupteurs de puissance, commandables à l'ouverture et à la fermeture (GTO, IGBT, MOSFET, etc....) avec des diodes en antiparallèle.
- D'un circuit de stockage d'énergie.
- D'un filtre de sortie.

La partie commande est constituée :

- De la commande de l'onduleur.
- De la régulation du DC et de régulation du courant injecté
- De la méthode d'identification des courants perturbés.[18]

## II.5 Système de régulation du filtre actif parallèle

La régulation dans le domaine des procédés industriels est définie comme étant la mise en œuvre de l'ensemble des moyens théoriques, matériels et techniques pour maintenir chaque grandeur physique essentielle égale à une valeur désirée. Cette valeur désirée est appelée consigne.

Par action sur une grandeur réglant et ce malgré l'influence des grandeurs perturbatrices du système, les grandeurs physiques essentielles sont maintenues égale à celle désirée.

Dans le cas du filtre actif parallèle, la régulation des courants de référence et de tension continue aux bornes du condensateur est primordiale pour son bon fonctionnement. Ainsi pour pouvoir contrôler et réguler le FAP, nous avons besoin d'un régulateur

Les principaux régulateurs connus sont [18] :

- Les régulateurs PID (Proportionnel, intégral, dérivé)
- Les régulateurs PD (Proportionnel, dérivé)
- Les régulateurs PI (Proportionnel, intégral)
- Les régulateurs P (Proportionnel)
- Régulateur par retour d'état avec intégrateur
- Régulateur quasi linéaire
- Régulateur flou

## II.6 Définition de l'onduleur

Un onduleur est un dispositif électronique qui transforme l'énergie électrique en courant continu (DC) en une forme de courant alternatif (AC) stable. Ce processus est réalisé à l'aide de semi-conducteurs contrôlés par un dispositif de commande qui permet de réguler la fréquence et la tension efficace de sortie pour correspondre aux besoins spécifiques de l'appareil récepteur. En appliquant une séquence de commande appropriée, l'onduleur est capable de produire une tension alternative ajustable pour alimenter en énergie des équipements électroniques variés [19].

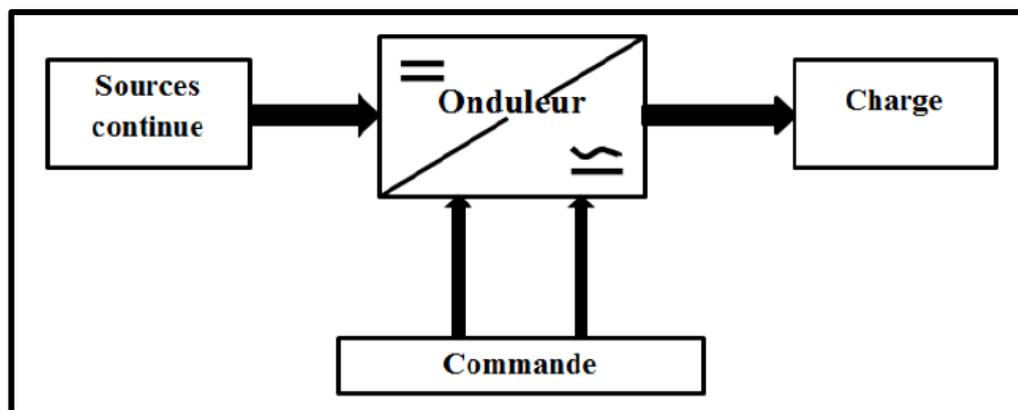


Figure (2.5) : schéma de principe d'onduleur.

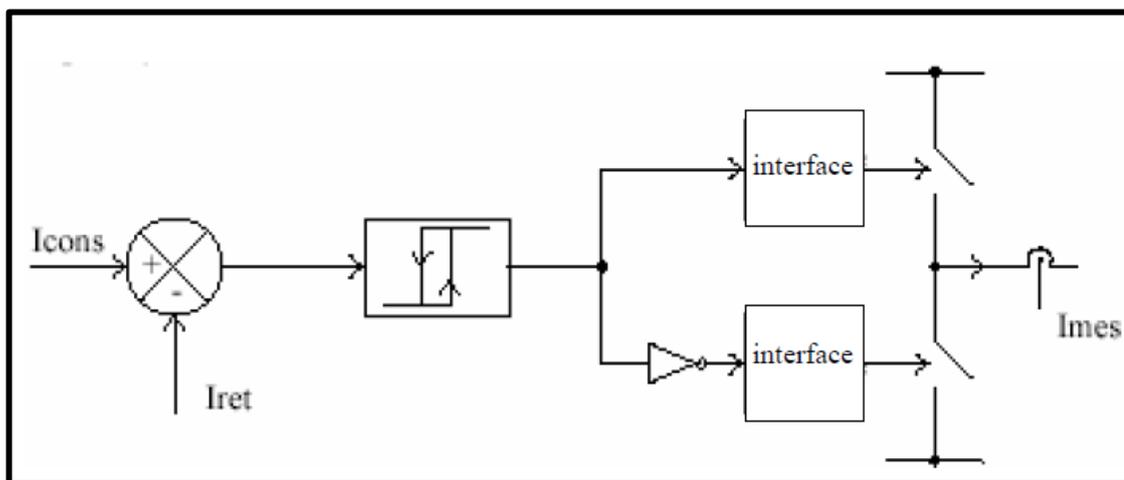
## II.6.1 Commande de l'onduleur

La génération de signaux est utilisée dans la commande de l'onduleur de tension afin de réguler ses interrupteurs. Pour y parvenir, diverses méthodes ont été mises en place, notamment :

- La commande par hystérésis
- La commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI).
- La commande par hystérésis modulé

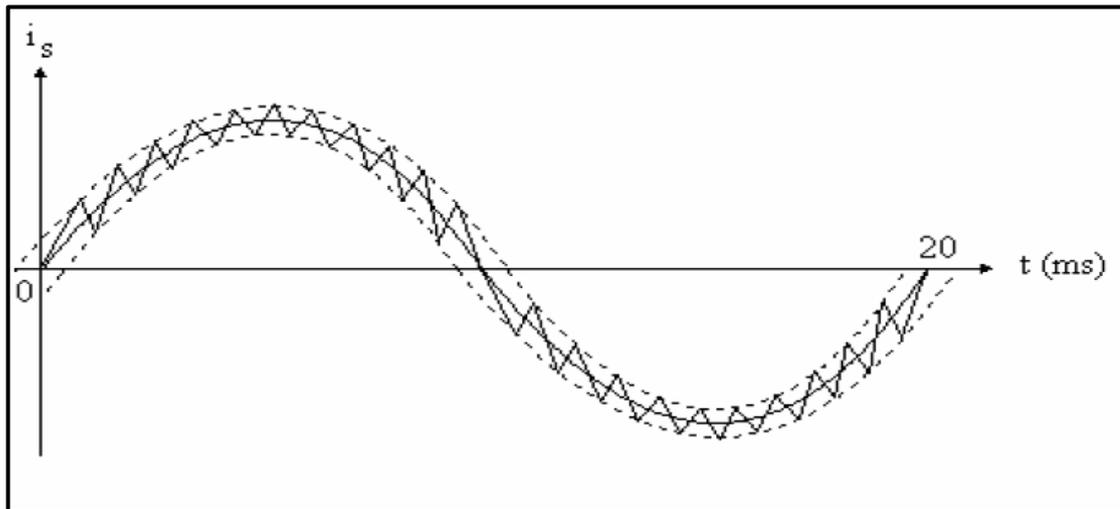
### II.6.1.1 La commande par hystérésis

La technique de commande en tout ou rien, également connue sous le nom de commande par hystérésis, implique l'utilisation d'une méthode de commande non linéaire. Elle repose sur la comparaison de l'écart entre le courant de référence et le courant généré par l'onduleur avec une limite prédéfinie appelée bande d'hystérésis [20], comme illustré dans la figure (2.6)



**Figure (2.6)** : Principe de la commande des courants par hystérésis.

Dès que l'erreur dépasse les limites inférieures ou supérieures de la bande (comme illustré dans la figure (2.6)), une commande est envoyée pour maintenir le système à l'intérieur de cette bande. Bien que cette technique présente l'avantage de la simplicité, il est difficile de contrôler efficacement les fréquences de commutation à haute fréquence car celles-ci peuvent varier librement à l'intérieur de la bande d'hystérésis.

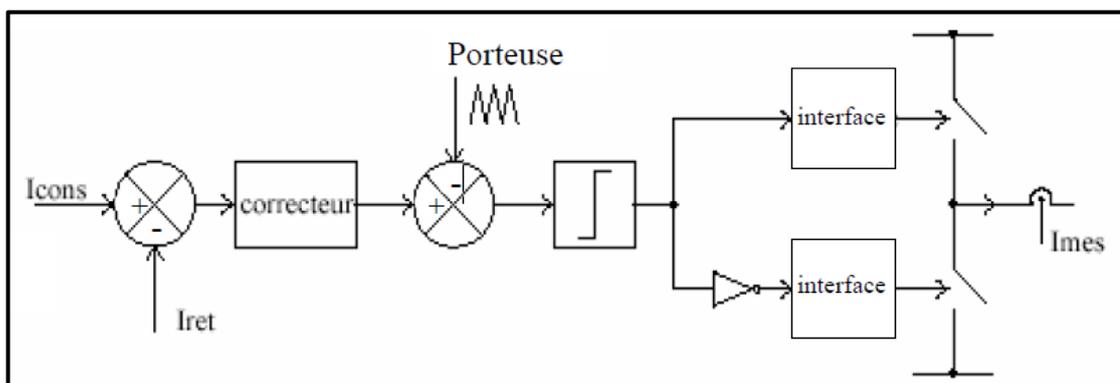


**Figure (2.7) :** Commande par hystérésis.

Ce problème peut être résolu par une autre stratégie de commande qui peut être proposée, à savoir la commande par hystérésis modulée. Mais dans cette stratégie de commande, il est difficile de définir la largeur de la bande de l'hystérésis [21].

### II.6.1.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)

Afin de remédier aux problèmes susmentionnés, nous présentons une alternative pour la commande de l'onduleur : la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI), qui permet de résoudre les difficultés liées à la gestion de la fréquence de commutation. Le schéma de principe de cette technique est illustré par la figure (2.8).

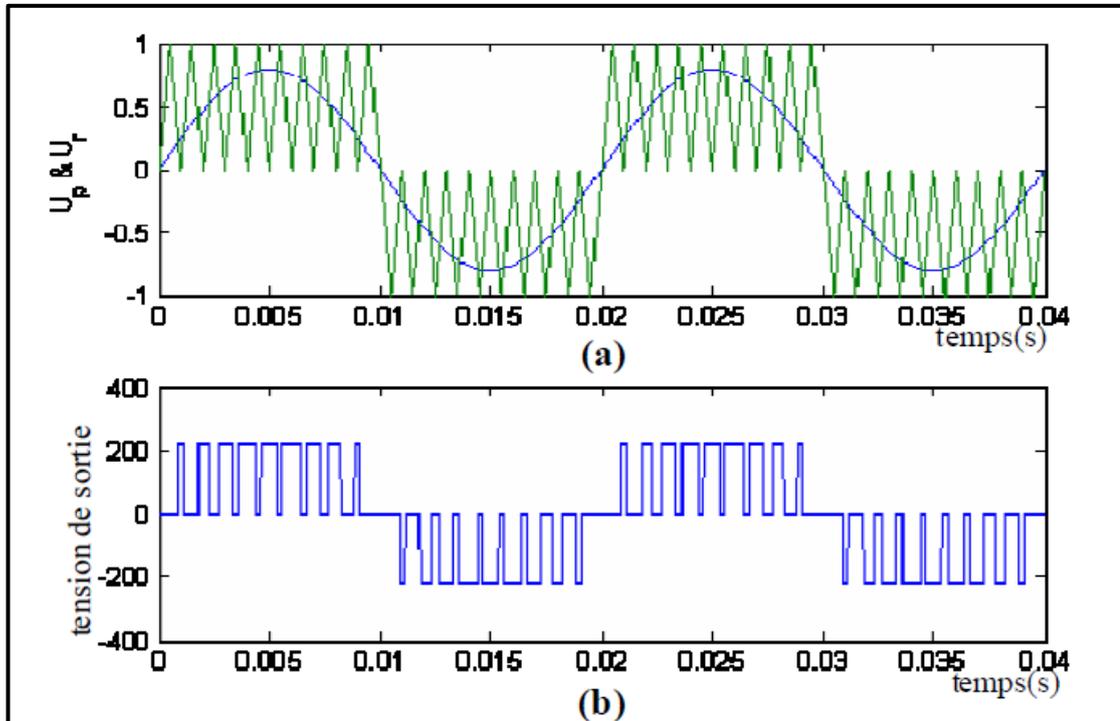


**Figure (2.8) :** Principe de commande des courants par MLI.

La MLI à échantillonnage naturel est probablement la technique de modulation de largeur d'impulsion la plus connue et la plus simple, comme illustré dans la figure (2.8)

La première étape de cette méthode de commande consiste à utiliser un régulateur pour calculer la tension de référence de l'onduleur en se basant sur la différence entre le courant mesuré

et la référence. Ensuite, la tension de référence est comparée à un signal triangulaire (la porteuse à haute fréquence qui définit la fréquence de commutation). Finalement, l'ordre de commande des interrupteurs est déterminé en utilisant la sortie du comparateur [1].



**Figure (2.9) :** Commande par modulation de largeur d'impulsions (a) signal de référence et de porteuse, (b) tension de sortie.

### II.6.1.3 La commande par hystérésis modulé

L'objectif de la commande par hystérésis modulée consiste à pallier le principal inconvénient de la commande par hystérésis classique, en utilisant un signal triangulaire noté  $S_{tr}$ . Ce signal, d'amplitude  $A_{tr}$  et de fréquence  $f_{tr}$ , est combiné avec le signal d'erreur  $\varepsilon (\varepsilon = i_{f_{ref}} - i_f)$  afin de déterminer la fréquence de commutation des semi-conducteurs [22].

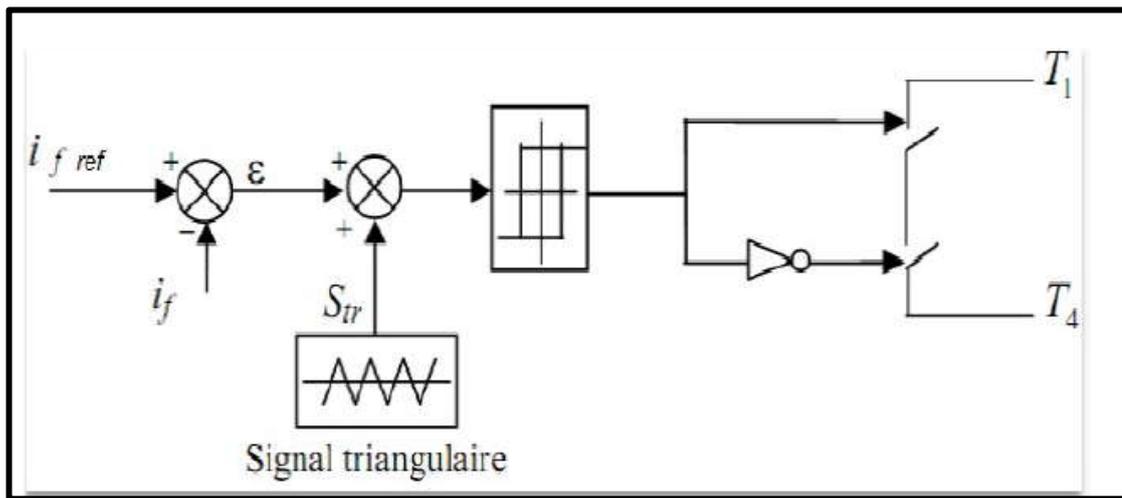


Figure (2.10) : Principe de la commande hystérésis modulée.

## II.6.2 Structure générale de l'onduleur de tension à deux niveaux

Les onduleurs de tension constituent une fonction incontournable de l'électronique de puissance. Les deux grands domaines d'application classiques des onduleurs de tension sont les alimentations de secours et les entraînements à vitesse variable [23], la forte évolution des onduleurs de tension s'est appuyée, d'une part, sur le développement des composants semi-conducteurs contrôlables, puissants, robustes, rapides, et d'autre part sur l'utilisation quasi généralisée des techniques dites de modulation de largeur d'impulsion. Dans les applications de fortes puissances, la structure des onduleurs à trois niveaux est la plus adaptée, par rapport à la structure à deux niveaux, de fait que les tensions et les courants de sortie présentent un taux de distorsion harmonique nettement inférieur. La figure (2.11) présente un onduleur triphasé à structure de tension. Il se compose de trois bras à interrupteurs réversibles en courant, commandés à la fermeture et à l'ouverture, réalisés à partir d'un interrupteur (GTO ou IGBT) et d'une diode en antiparallèle qui assure la circulation du courant de roue libre. Le stockage de l'énergie du côté continu se fait par l'intermédiaire d'un condensateur  $CDC$  de tension  $V_{ds}$ , la tension à ses bornes,  $D_{est}$  maintenue à une valeur quasi constante. La fluctuation de cette tension doit être faible d'une part pour ne pas dépasser la limite de tension des semi-conducteurs, et d'autre part, pour ne pas dégrader les performances du filtre actif. Le filtre de sortie est un filtre passif habituellement du premier ordre ( $Lf, Rf$ ), employé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique. Dans ce cas, le pont onduleur est l'interface entre deux types de sources : source de courant côté alternatif et source de tension côté continu [24], La figure (2.12) représente le schéma équivalent par phase d'un filtre actif connecté au réseau électrique.

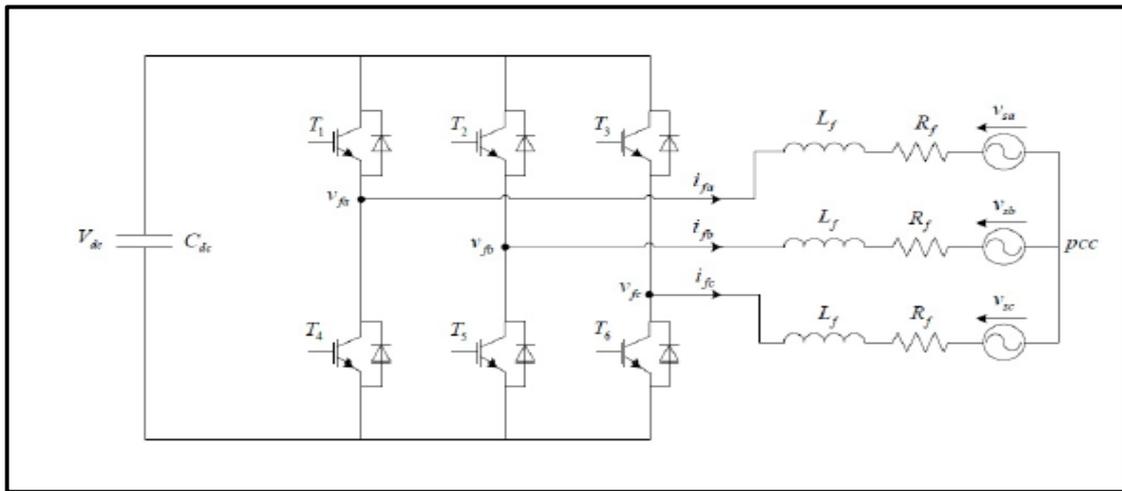


Figure (2.11) : Structure de l'onduleur de tension à deux niveaux

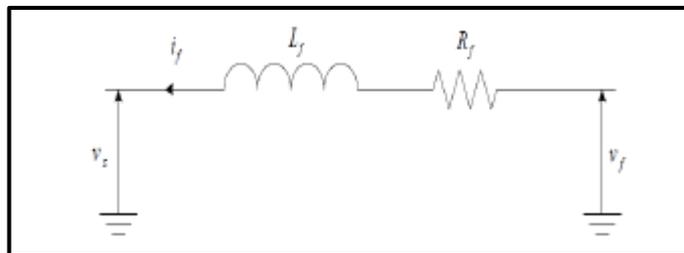


Figure (2.12) : Schéma de liaison entre l'onduleur de tension et le réseau

Le convertisseur de courant triphasé est composé de dispositifs de commutation bidirectionnels qui sont contrôlés pour être ouverts ou fermés à l'aide de semi-conducteurs, principalement des IGBT, disposés en opposition avec une diode. Cette configuration nécessite le respect des contraintes suivantes :

- Il est impératif qu'à tout moment, un seul commutateur dans un même bras soit conducteur pour prévenir tout court-circuit potentiel de la source de tension.
- Afin de garantir une circulation continue du courant de ligne, des diodes sont disposées en opposition aux commutateurs pour fournir un chemin de dérivation possible.

En principe, les deux semi-conducteurs dans un même bras sont commandés de manière complémentaire : La conductivité de l'un entraîne le blocage de l'autre dans le même bras [25]. En supposant cela, l'activation et la désactivation des commutateurs dans le convertisseur de la figure (2.1) Les interrupteurs de l'onduleur sont conditionnés par trois signaux de commande (S1, S2, S3), qui sont décrits ci-dessous :

$$S1 = \begin{cases} 1 & T1 \text{ fermé et } T4 \text{ ouvert} \\ 0 & T4 \text{ fermé et } T1 \text{ ouvert} \end{cases}$$

$$S2 = \begin{cases} 1 & T2 \text{ fermé et } T5 \text{ ouvert} \\ 0 & T5 \text{ fermé et } T2 \text{ ouvert} \end{cases}$$

$$S3 = \begin{cases} 1 & T3 \text{ fermé et } T6 \text{ ouvert} \\ 0 & T6 \text{ fermé et } T3 \text{ ouvert} \end{cases}$$

Pour éviter de créer un court-circuit sur la source de tension, il est impératif que les deux semi-conducteurs d'un même bras ne soient jamais actifs simultanément. Pour y parvenir, il est nécessaire d'instaurer un temps d'attente entre la désactivation d'un interrupteur et l'activation de l'autre interrupteur du même bras, ce temps d'attente est communément appelé "temps mort". Le tableau (2.1) présente huit scénarios possibles pour les tensions de sortie du filtre actif  $V_{fi}$  (mesurées par rapport au point de référence de la tension continue), en fonction des états des interrupteurs représentés par les variables  $S1$ ,  $S2$  et  $S3$ .

### II.6.3 Modélisation de l'onduleur triphasé a deux niveaux

Si l'on considère que le système est équilibré, alors les tensions du côté alternatif sont déterminées par :

$$v_{si} = V_m \sin\left(\omega t - (i-1)\frac{2\pi}{3}\right) \quad i = 1,2,3 \quad (2.1)$$

En appliquant la loi de Kirchhoff côté alternatif, on obtient :

$$L_{fi} \frac{di_{inji}}{dt} = -v_{si} - R_{fi} i_{inji} + v_{fi} \quad i = 1,2,3 \quad (2.2)$$

Avec  $v_{si} = [v_{s1}, v_{s2}, v_{s3}]^T$ ,  $v_{fi} = [v_{f1}, v_{f2}, v_{f3}]^T$  qui représentent les tensions par rapport au point neutre  $n$  de la Fig. (2.14) et  $i_{inji} = [i_{inj1}, i_{inj2}, i_{inj3}]^T$  qui sont les courants injectés par l'onduleur dans le réseau triphasé.

Le lien entre le côté alternatif et le côté continu de l'alternateur se fait à travers les interrupteurs  $u_k$  et  $\bar{u}_k$ . Ces interrupteurs étant complémentaires, leur état est défini par la fonction suivante :

$$u_k = \begin{cases} +1, & \bar{u}_k = -1 \\ -1; & \bar{u}_k = +1 \end{cases} \text{ Pour } k = 1,2,3 \quad (2.3)$$

L'expression reliant les tensions  $v_{fi}$  à la tension continue  $V_{dc}$  en fonction de la position des interrupteurs ( $u_1, u_2, u_3$ ) s'écrit :

$$\begin{bmatrix} v_{f1} \\ v_{f2} \\ v_{f3} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Il est possible de déterminer la tension continue de l'onduleur en se basant sur les courants fournis par le FAP et la manière dont les interrupteurs sont commutés. Voici la formule correspondante :

$$C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{2} (u_1 i_{inj1} + u_2 i_{inj2} + u_3 i_{inj3}) \quad (2.5)$$

La qualité de la compensation des harmoniques dépend fortement des performances de la méthode d'identification choisie [26]. En effet, le système de commande, même très efficace, ne pourra pas à lui seul effectuer des corrections suffisantes si les harmoniques parasites sont mal identifiées. [17].

**Tableau (2.1) :** Tensions en sortie de l'onduleur

$V_{fa}$	$V_{fb}$	$V_{fc}$	S1	S2	S3	Cas
0	0	0	0	0	0	0
$2V_{de}/3$	$-V_{de}/3$	$-V_{de}/3$	1	0	0	1
$-V_{de}/3$	$2V_{de}/3$	$-V_{de}/3$	0	1	0	2
$V_{de}/3$	$V_{de}/3$	$-2V_{de}/3$	1	1	0	3
$-V_{de}/3$	$-V_{de}/3$	$2V_{de}/3$	0	0	1	4
$V_{de}/3$	$-2V_{de}/3$	$V_{de}/3$	1	0	1	5
$-2V_{de}/3$	$V_{de}/3$	$V_{de}/3$	0	1	1	6
0	0	0	1	1	1	7

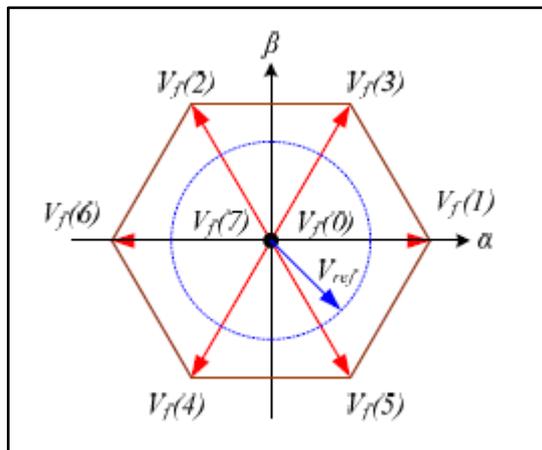


Figure (2.13) : représentation vectorielle des tensions de l'onduleur.

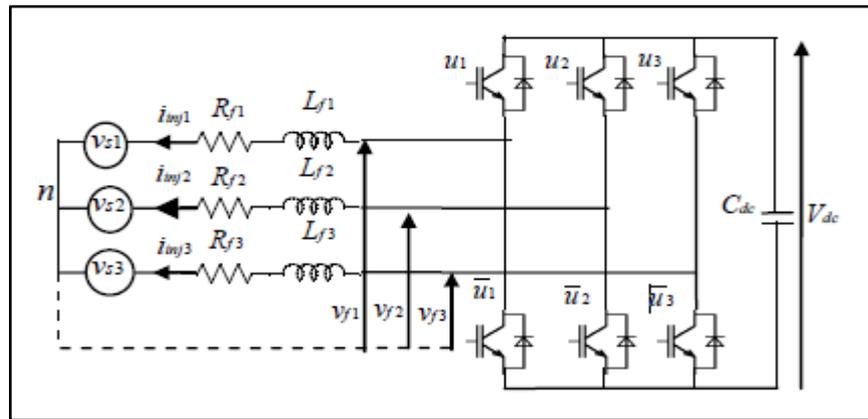


Figure (2.14) : Schéma d'un onduleur de tension triphasé.

### II.6.3.1 Système de stockage de l'énergie

Le stockage d'énergie en courant continu est effectué au moyen d'un système de stockage capacitif qui utilise un condensateur  $C_{dc}$  comme source de tension continue. Les paramètres du système de stockage, tels que  $v_{dc-ref}$  et  $C_{dc}$ , ont un impact direct sur la dynamique et les performances de compensation du FAP. D'un côté une tension  $v_{dc-ref}$  plus élevée améliore la dynamique du FAP. D'autre part, les courants générés par le FAP peuvent provoquer des ondulations de la tension continue  $v_{dc}$ , qui peuvent altérer la qualité de la compensation du FAP si elles ne sont pas limitées par la valeur de  $C_{dc}$ . Augmenter la valeur de  $C_{dc}$  permet de réduire ces ondulations, mais cela augmente également le coût et la taille du FAP.

Il est important de choisir une tension continue  $v_{dc}$  aussi élevée que possible pour améliorer la marge de commandabilité du FAP. Cependant, ce choix de tension a un impact significatif sur le choix des interrupteurs. Il est donc essentiel de respecter les contraintes nominales des semi-conducteurs et de s'assurer que l'onduleur reste commandable malgré l'augmentation de la tension continue [27].

### II.6.3.2 Filtre de sortie

Le filtre de sortie est un filtre passif qui relie l'onduleur de tension au réseau électrique. Dans la plupart des publications, un filtre de sortie du premier ordre est couramment utilisé. Ce filtre est composé d'une inductance ( $L_f$ ) qui a une résistance interne ( $R_f$ ). Pour assurer une bonne dynamique du FAP, il est recommandé d'utiliser une valeur relativement faible de  $L_f$  en respectant l'équation. Cependant, cette faible valeur de  $L_f$  permet à la plupart des harmoniques générées par les commutations de se propager vers le réseau électrique, ce qui peut affecter les installations et les

équipements électriques. Si l'on opte pour une valeur relativement élevée de ( $L_f$ ), les harmoniques générées par les commutations seront empêchées de se propager vers le réseau électrique. Toutefois, pour maintenir les performances du filtre actif, une tension  $v_{dc}$  plus élevée sera nécessaire. Dans le but d'éviter la propagation des harmoniques, on peut installer un filtre passif auxiliaire en aval de l'onduleur ou en amont (du côté du réseau) pour absorber ces harmoniques liées aux commutations.

### II.6.3.3 La charge polluante

La charge polluante se compose d'un redresseur triphasé en pont qui fournit de l'énergie à une charge en série RL. La charge est modélisée comme étant composée de sources de courant parfaites, où les semi-conducteurs sont considérés comme idéaux.

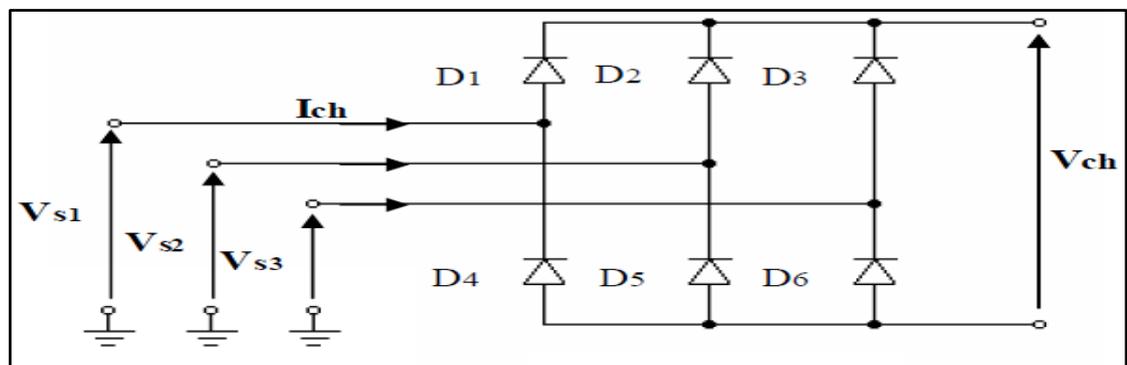


Figure (2.15) : Schéma synoptique d'un pont redresseur

## II.7 Schéma synoptique de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle et charge polluante

La figure (2.16) illustre le schéma global de l'ensemble comprenant le réseau, le filtre actif parallèle et la charge polluante. Plus précisément, le filtre actif parallèle fonctionne comme un onduleur de tension commandé en courant, muni d'une source flottante (un condensateur) et connecté au réseau perturbé via un filtre inductif.

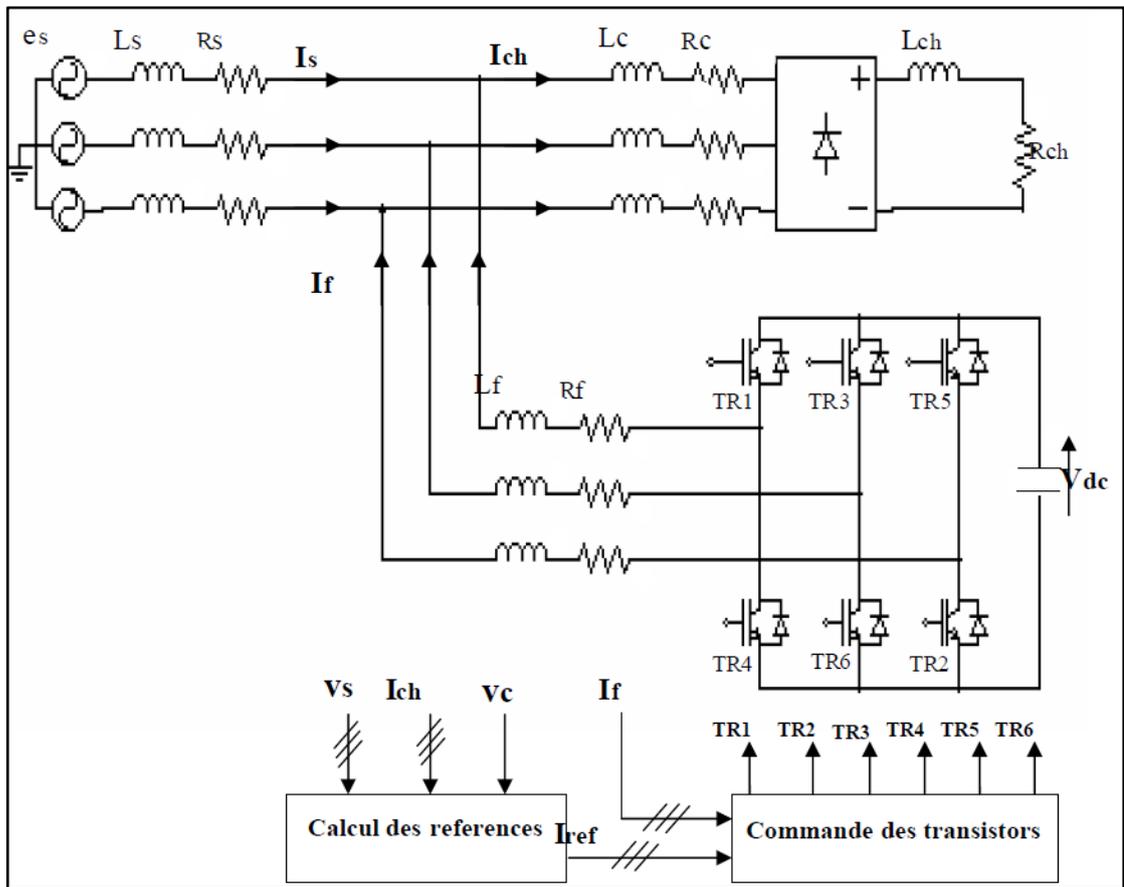


Figure (2.16) : Schéma synoptique de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle et charge polluante.

## II.8 Modélisation de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle et charge polluante

Le processus de modélisation d'un système consiste à déterminer les équations mathématiques qui permettent de décrire son comportement.

### II.8.1 Modélisation du réseau

On peut représenter le réseau électrique par un système de F.E.M. triphasées équilibrées en série avec une impédance, également appelée impédance de court-circuit. Cela est comparable à une source de tension sinusoïdale en série avec ladite impédance. Cette représentation est illustrée dans la figure (2.17)[28] .

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \sqrt{2} \cdot E \begin{bmatrix} \sin \omega t \\ \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \sin \left( \omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$Z_s = R_s + jL_s\omega \quad (2.7)$$

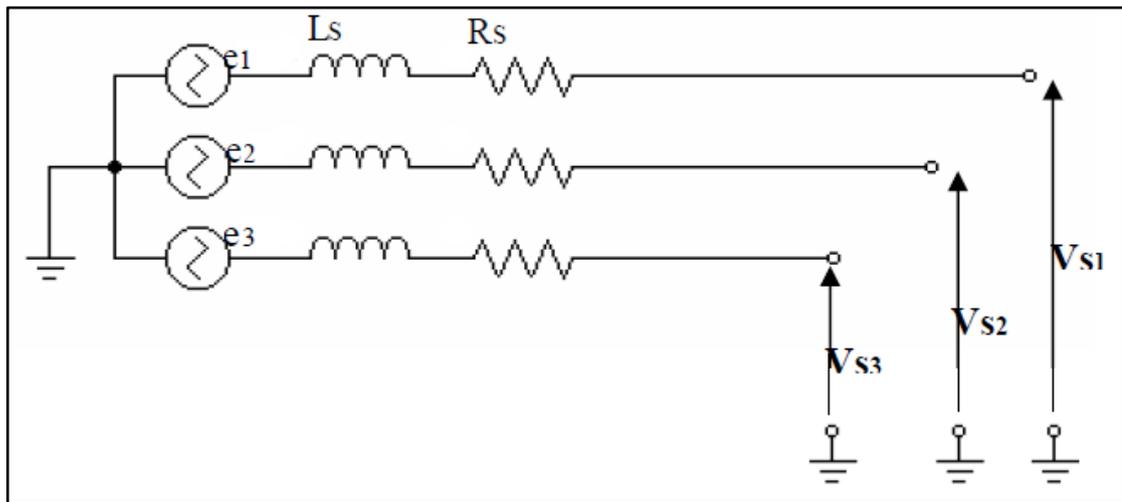


Figure (2.17) : Schéma synoptique d'un réseau triphasé.

## II.9 Conclusion

Ce chapitre introduit la configuration et les composants essentiels du filtre actif parallèle. Il explore également la manière dont le circuit de puissance est configuré, les paramètres du filtre de sortie sont dimensionnés pour réduire les ondulations du courant causées principalement par la fréquence de commutation des interrupteurs de puissance. De plus, il aborde la stratégie de commande et le principe de fonctionnement du système de filtrage actif.

**CHAPITRE 03 :**  
**MÉTHODE**  
**D'IDENTIFICATION**  
**DES HARMONIQUES**

### III.1 Introduction

Un filtre actif se compose principalement d'un onduleur. Il est crucial de faire un choix judicieux de la méthode d'identification des grandeurs de référence, que ce soit le courant de référence pour un filtre actif parallèle ou la tension de référence pour un filtre actif série. Ce choix est essentiel pour permettre au filtre actif de remplir efficacement les tâches qui lui sont assignées.

La littérature propose diverses méthodes d'identification des courants perturbés, qui visent à améliorer les performances des systèmes conventionnels de dépollution des installations électriques.

### III.2 Généralités sur les méthodes d'identification

Plusieurs algorithmes d'identification des grandeurs harmoniques de référence et de nombreuses techniques de commande et de régulation ont été développés depuis la mise en place des premiers filtres actifs [29].

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

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

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

Récemment, de nouvelles méthodes d'identification ont été présentées pour donner le choix de compenser un, plusieurs ou même tous les types de courants perturbateurs. En effet, en se basant sur la régulation de la tension continue et sur celles du réseau électrique aux points de raccordement, nous pouvons compenser à la fois tous les courants perturbateurs, tout en offrant la possibilité de réguler la tension de la charge. Cette méthode, qui ne peut être implantée que

numériquement, ne garantit pas une compensation parfaite de la puissance réactive, de même que la régulation de tension n'assure pas toujours une bonne qualité à la tension de la charge.

Une autre méthode, appelée la méthode de détection synchrone et reposant sur la transformée de Park, a été proposée. Cette méthode se base essentiellement sur le calcul de la pulsation fondamentale obtenue par une boucle à verrouillage de phase « PLL » (Phase Locked Loop). Cela exige une précision parfaite du calcul de cette pulsation afin de ne pas avoir des courants identifiés erronés [21][16].

Aussi il y a lieu de signaler dans notre étude la méthode des puissances fluctuantes basées sur la matrice des composantes symétriques.

Dans ce travail on s'intéresse à la méthode d'identification des courants harmoniques par la méthode des puissances instantanées

### III.3 Stratégie de l'identification

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

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

La première méthode est la plus utilisée pour le filtre actif parallèle pour compenser les courants perturbateurs causés par les charges polluantes. Cette méthode de détection sera employée dans cette étude [24].

### III.4 Méthode des puissances active et réactive instantanées p-q

#### III.4.1 Définition et principe

La méthode des puissances active et réactive instantanées (fréquemment appelée méthode p-q) a été introduite par HIROFUMI Akagi [2]. Son principe est basé sur le passage des systèmes triphasés constitués par les tensions simples et les courants de ligne, vers un système diphasé repère  $(\alpha, \beta)$  en utilisant la transformation de Concordia, afin de calculer les puissances instantanées. Ensuite, l'utilisation soit d'un filtre passe bas, soit d'un filtre passe haut afin d'éliminer la composante continue de la puissance active afin de ne garder que la composante harmonique du

signal sachant que la composante fondamentale est transformée en une composante continue et les composantes harmoniques en composantes alternatives [18].

### III.4.2 Analyse physique des différentes composantes de la puissance

Il est essentiel de comprendre clairement et intuitivement la signification physique de toutes les puissances instantanées avant d'utiliser la théorie P-Q pour la conception des filtres actifs. Les puissances instantanées déterminées par la théorie P-Q dans le domaine temporel ne dépendent pas des valeurs efficaces des tensions et des courants. Cette théorie traite le concept conventionnel de la puissance active et réactive dans le domaine fréquentiel, tel que défini pour les systèmes triphasés sinusoïdaux équilibrés, comme un cas particulier.

#### A- Composante homopolaire $p_0$

La puissance de cette composante possède les mêmes propriétés que la puissance instantanée dans le contexte d'un système monophasé. Elle se compose de deux parties, dont la partie continue contribue au transfert d'une énergie utilisable. La partie alternative transfère de l'énergie instantanément, mais à une fréquence différente, ce qui entraîne des pertes. En revanche, la partie continue  $\bar{p}_0$  de la puissance homopolaire peut accroître l'énergie totale transférée. Ainsi, du point de vue de l'efficacité, elle se révèle être un aspect intéressant et bénéfique. Il est important de souligner que  $p_0$  ne peut être formée exclusivement de  $\bar{p}_0$ . En réalité, cette puissance est nécessairement constituée des parties  $\bar{p}_0$  et  $\tilde{p}_0$ , et l'élimination de  $\tilde{p}_0$ , implique également l'élimination de  $\bar{p}_0$ . Il n'existe aucun moyen de supprimer la composante alternative tout en conservant sa partie continue.

#### B- Composante active $p$

Le but des systèmes de distribution est d'assurer un transfert d'énergie efficace de la source vers les clients. L'énergie transmise par unité de temps est représentée par la puissance active instantanée. Plus cette valeur est élevée et stable, meilleure est la performance du système de distribution. La puissance active instantanée se divise en une composante continue et une composante alternative. La composante continue  $\bar{p}$  est bénéfique car elle contribue directement à la consommation d'énergie active. En revanche, la composante alternative  $\tilde{p}$  n'est pas utile et entraîne des effets indésirables tels que l'échauffement des câbles et des transformateurs, des vibrations etc.

#### C- Composante réactive ou non active $q$

La puissance réactive, qui n'est pas affectée par la présence d'harmoniques ou de déséquilibres, n'a aucune incidence sur le transfert d'énergie entre la source et la charge. Elle

reflète simplement l'échange d'énergie entre les différentes phases du réseau sans être consommée par la charge elle-même. Elle est constituée d'une composante continue et d'une composante alternative. L'introduction de la composante alternative réduit le facteur de puissance et affecte la qualité de la distribution d'énergie.

Dans des conditions normales d'opération, on souhaite ne consommer que la partie active de la puissance. En utilisant des systèmes industriels particuliers (variateurs de vitesse, four à arc, chauffage inductif, etc.) il est évident que les autres composantes indésirables existent.

Nous souhaitons éliminer ces composantes pour améliorer la qualité de distribution en satisfaisant la consommation demandée. Nous développons dans les sections suivantes une méthode P-Q d'identification des courants de la charge non linéaire afin d'éliminer les éléments indésirables [30].

### III.4.3 Principes de fonctionnement de la méthode des puissances instantanées

La transformée de Concordia est utilisée pour convertir les mesures de tensions et de courants triphasés (exprimés sous la forme a-b-c) en un système biphasé équivalent ( $\alpha$ - $\beta$ ), tout en maintenant la puissance inchangée :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{S1} \\ V_{S2} \\ V_{S3} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Voici la relation entre les courants ci-dessous

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{S1} \\ I_{S2} \\ I_{S3} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

En cas de présence d'harmoniques, la puissance apparente est constituée de trois composantes distinctes :

Active (P), réactive (Q) et déformante (D) comme le montre la relation suivante :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (3.3)$$

La relation suivante définit la puissance active instantanée, notée P(t) :

$$P(t) = V_{S1}I_{S1} + V_{S2}I_{S2} + V_{S3}I_{S3} = p(t) + p_0(t) \quad (3.4)$$

Dans le repère stationnaire, il est possible d'exprimer la relation comme suit :

$$p(t) = V_{\alpha}I_{\alpha} + V_{\beta}I_{\beta}$$

$$p_0(t) = V_0I_0$$

La forme suivante permet également d'exprimer la puissance imaginaire instantanée de manière similaire :

$$q(t) = -\frac{1}{\sqrt{3}}[(V_{S1} - V_{S2})I_{S3} + (V_{S2} - V_{S3})I_{S2} + (V_{S3} - V_{S1})I_{S2}] = V_{\alpha}I_{\beta} - V_{\beta}I_{\alpha} \quad (3.5)$$

La signification de la puissance  $q$  dépasse celle de la puissance réactive habituelle.

En effet, la puissance imaginaire diffère de la puissance réactive en ce sens qu'elle englobe toutes les composantes harmoniques du courant et de la tension, contrairement à cette dernière qui ne considère que la fréquence fondamentale.

Pour cette raison, la puissance imaginaire est désignée différemment et est mesurée en voltampères imaginaires (VAI). À partir des équations, nous pouvons établir la relation matricielle suivante.

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{S\alpha} & V_{S\beta} \\ -V_{S\beta} & V_{S\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Dans une situation générale, les puissances  $p$  et  $q$  sont composées à la fois d'une composante continue et d'une composante alternative, ce qui nous permet d'exprimer l'équation suivante :

$$\begin{cases} P = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (3.7)$$

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

$\bar{q}$  Une puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant et de la tension.

$\tilde{P}$  et  $\tilde{q}$  Des puissances alternatives liées à la somme des composantes perturbatrices du courant et de la tension [30].

### III.4.3.1 Calcul des courants perturbateurs

L'équation ci-dessous permet de recalculer les courants dans le repère  $\alpha \beta$  en inversant la relation (3.6) :

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{S\alpha} & V_{S\beta} \\ -V_{S\beta} & V_{S\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

L'utilisation des équations (3.7) et (3.8) nous permet de décomposer le courant dans le repère en trois composantes distinctes : la composante active, la composante réactive à la fréquence fondamentale et les harmoniques. Ainsi, nous obtenons :

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{S\alpha} & -V_{S\beta} \\ V_{S\beta} & V_{S\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{P} \\ 0 \end{bmatrix}}_{\text{Courant actif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{S\alpha} & -V_{S\beta} \\ V_{S\beta} & V_{S\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \tilde{Q} \end{bmatrix}}_{\text{courant réactif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{S\alpha} & -V_{S\beta} \\ -V_{S\beta} & V_{S\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{P} \\ \tilde{Q} \end{bmatrix}}_{\text{courant harmonique}} \quad (3.9)$$

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

Il est évident que pour pouvoir calculer les trois composantes du courant indépendamment les unes des autres, il faut tout d'abord pouvoir isoler les puissances active et réactive  $\tilde{P}$  et  $\tilde{Q}$  liées respectivement à la composante harmonique du courant active et réactive

Ainsi, l'expression indique que l'identification des diverses composantes du courant dans le repère  $(\alpha-\beta)$  implique la séparation des termes continus des puissances réelle et imaginaire instantanées. Les courants perturbateurs triphasés, qui sont les courants identifiés et appelés courants de référence ( $I_{ref}$ ), sont obtenus en calculant la transformation inverse  $(\alpha-\beta)$  à partir de la relation(3.10).

$$\begin{bmatrix} I_{ref1} \\ I_{ref2} \\ I_{ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Avec  $I_\alpha, I_\beta$  courants perturbateurs calculés dans le repère  $\alpha-\beta$  à partir des courants réactifs et harmoniques de la relation (3.9)[31].

**III.5 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons introduit et défini la méthode d'identification des courants harmoniques en utilisant les calculs des puissances réelle et imaginaire instantanées. Cette méthode s'avère être la plus performante, facile à mettre en œuvre et particulièrement adaptée pour identifier d'autres types de perturbations, telles que les déséquilibres de courant ou la puissance réactive.

# **CHAPITRE 4 :**

# **RESULTATS ET**

# **DISCUSSIONS**

## IV.1 Introduction

Les solutions traditionnelles et modernes de dépollution peuvent être mises en œuvre pour restreindre la propagation des courants perturbateurs et ainsi dépolluer le réseau électrique conformément à leur présentation. Les solutions classiques montrent une efficacité limitée lorsqu'il s'agit de résoudre cette problématique.

Dans ce chapitre, nous avons présenté une solution moderne, à savoir l'utilisation d'un FAP (Filtre Actif de Puissance), ainsi qu'une solution classique, à savoir l'utilisation de batteries de condensateurs. Ces deux solutions sont connectées en parallèle avec le réseau électrique dans le but d'injecter des courants visant à éliminer la pollution harmonique générée par une charge non linéaire. Nous avons souligné les performances de ces solutions pour résoudre ce problème.

Les résultats de simulation obtenus dans l'environnement Matlab/Simulink viennent confirmer la validité de cette étude.

## IV.2 Les éléments de configuration utilisés pour la simulation

- Réseau : Tension de ligne 220 V/50Hz

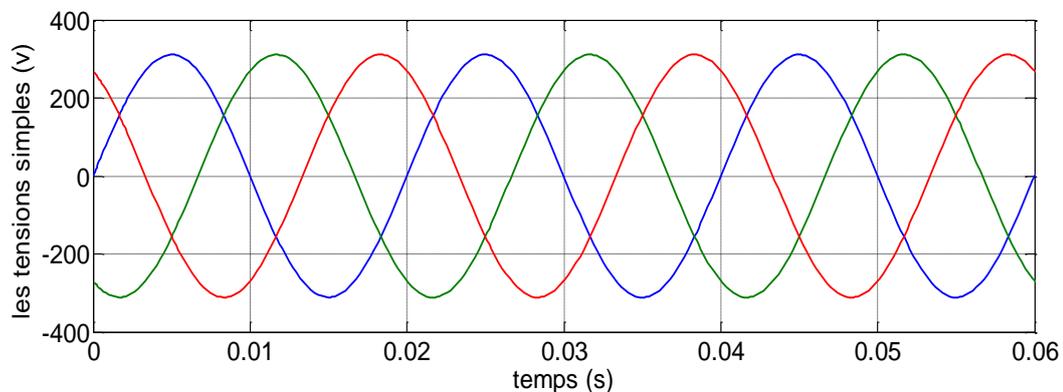


Figure (4.1) : Tension de ligne 220 V/50Hz

### Filtre actif parallèle

Un onduleur triphasé alimenté en tension continue de 600 V, qui utilise des transistors de type IGBT.

## IV.3 Test du filtre avec la charge polluante N°01

### Les caractéristiques de la charge polluante

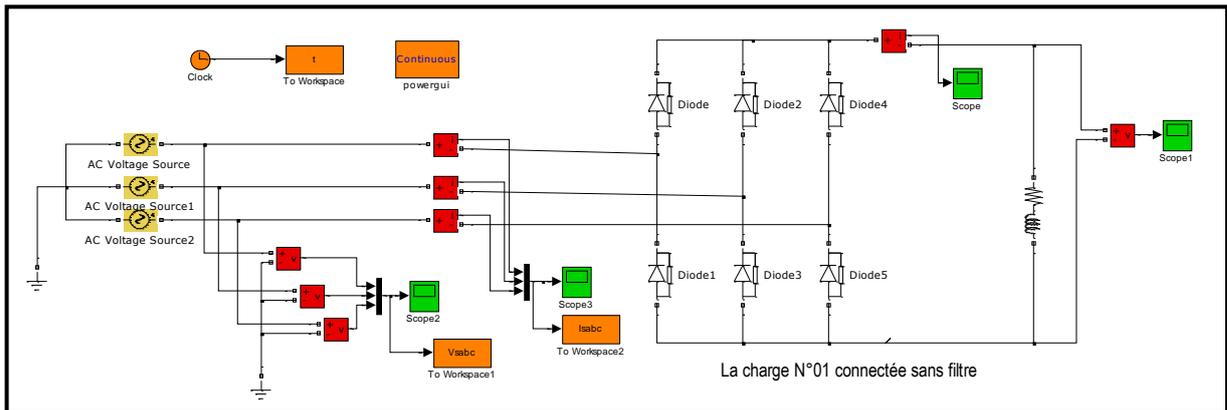
Un redresseur triphasé non commandé utilisant des diodes est alimenté par une tension de 380 V entre les phases. Ce redresseur fournit de l'énergie à une charge résistive-inductive ayant des paramètres de résistance (R) égale à 15  $\Omega$  et d'inductance (L) égale à 155 mH.

- Les résultats de la simulation :

**IV.3.1 L'association entre le réseau et la charge polluante avant l'ajout d'un filtre**

**A- Avant filtrage**

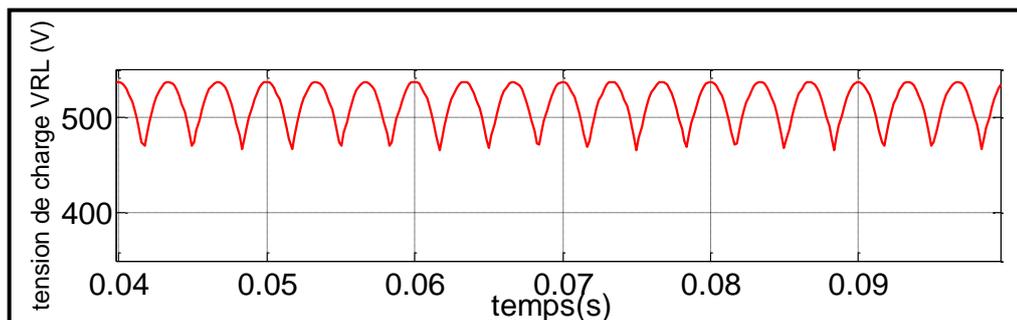
La figure (4- 2) illustre le schéma bloc de l'association entre le réseau électrique et la charge polluante avant l'installation d'un système de filtrage.



**Figure (4. 2) :** Schéma bloc de l'association réseau-charge polluante.

Nous prévoyons d'alimenter la charge polluante à partir d'un réseau triphasé, et nous allons mesurer les courants et les tensions de ce système.

Ainsi, pour déterminer le taux de distorsion harmonique (THD), il est nécessaire de mesurer les courants et les tensions du réseau, ainsi que le courant et la tension de la charge. De plus, il est important d'analyser le spectre harmonique de chaque composante.



**Figure (4.3) :** La tension à la borne de la charge RL

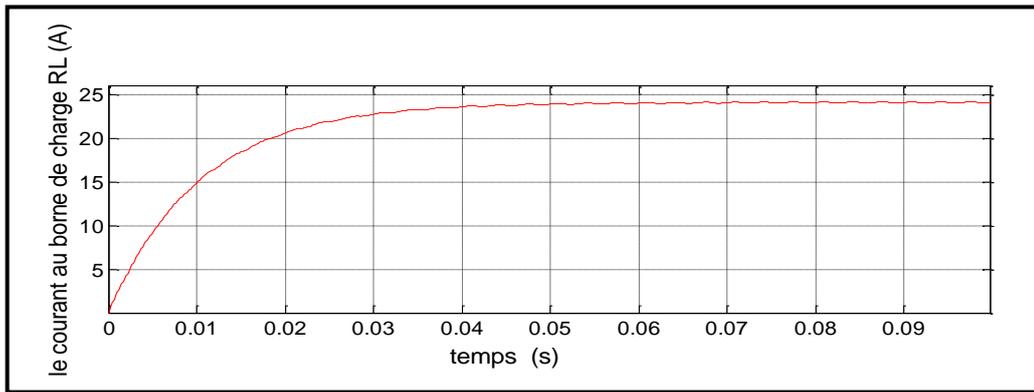


Figure (4.4): Le courant au niveau de la charge RL

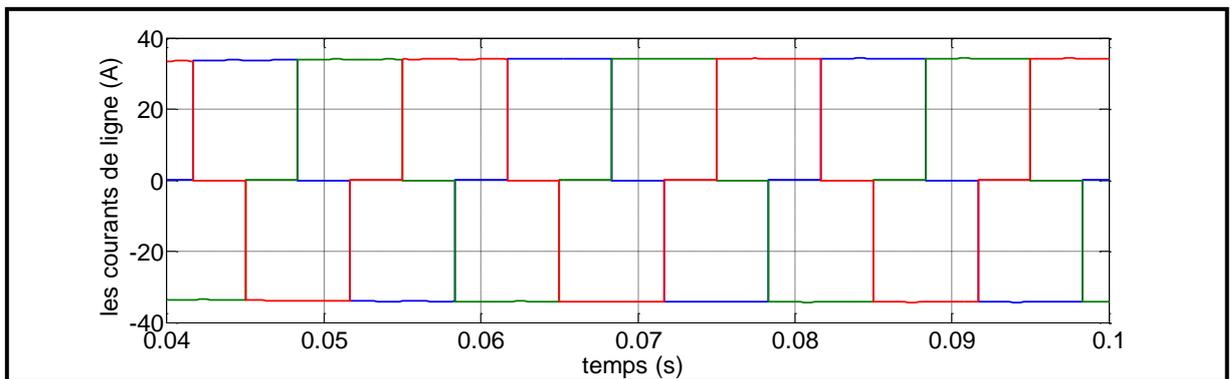


Figure (4.5) : Les courants à l'entrée de la charge polluante

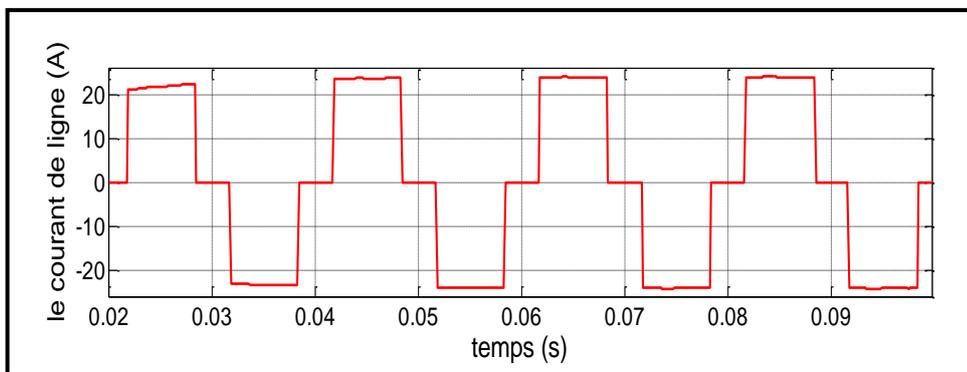
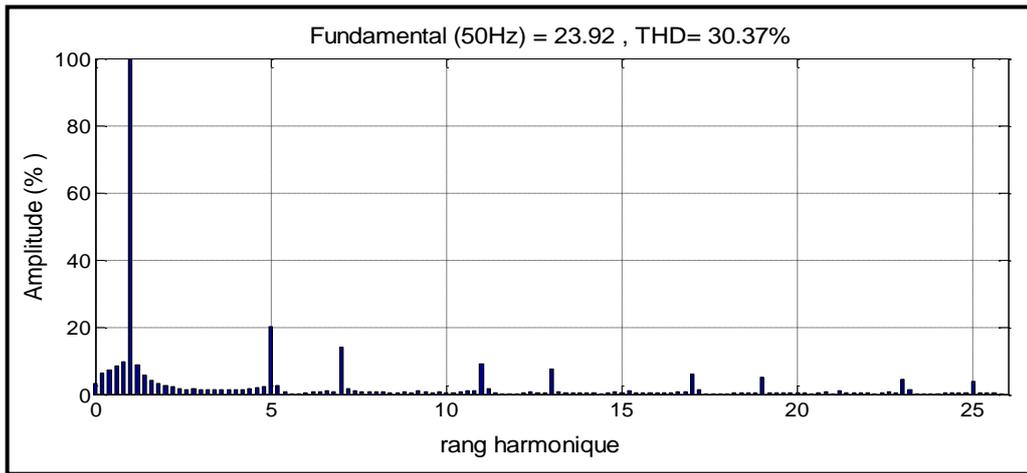


Figure (4.6) : Le courant  $I_a$  dans la phase (a)

La figure (4-7) montre Le spectre d'harmonique du courant  $I_a$  avant filtre



**Figure (4.7):** Le spectre d'harmonique du courant  $I_a$  avant filtre

Le tableau (4-1) présente l'ordre des harmoniques avant le filtrage, ainsi que leur amplitude relative par rapport à la fondamentale (%) de la charge N°01

**Tableau (4.1) :** Le rang d'harmonique et Son amplitude par rapport à la fondamentale (%)

Le rang d'harmonique	Son amplitude par rapport à la fondamentale (%)	Le rang d'harmonique	Son amplitude par rapport à la fondamentale (%)
2	0.07	14	0.10
3	0.06	15	0.06
4	0.11	16	0.10
5	7.49	17	2.18
6	0.19	18	0.19
7	5.39	19	2.01
8	0.09	20	0.10
9	0.06	21	0.06
10	0.10	22	0.09
11	3.39	23	1.60
12	0.19	24	0.19
13	2.92	25	1.53

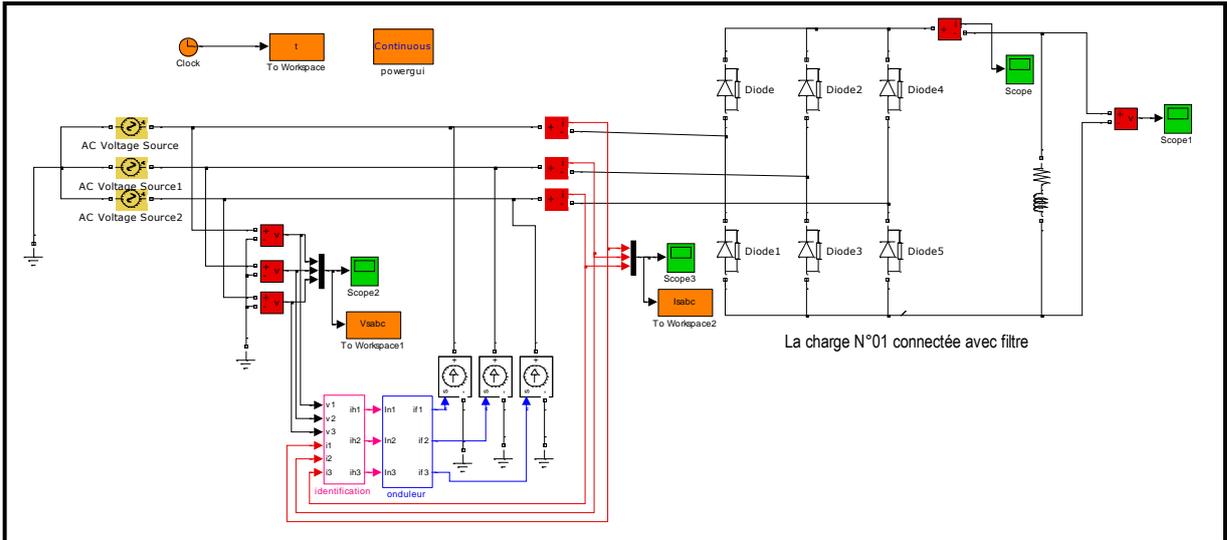
Les résultats de la simulation de l'alimentation de la charge N°01 sans l'utilisation du filtre indiquent que :

- Les courants  $I_{abc}$  des trois lignes à l'entrée du redresseur ne suivent pas une forme sinusoïdale, mais présentent plutôt une forme rectangulaire, et d'autre part la mesure du taux de distorsion harmonique (THD) de ces courants présente une valeur très élevée, comme le montre la figure (IV-7), avec un THD de **30,37%**.
- Les amplitudes des harmoniques de rang 5, 7, 11 et 13 sont significativement élevées, tandis que les autres rangs d'harmoniques présentent des amplitudes faibles, inférieures à 5%.

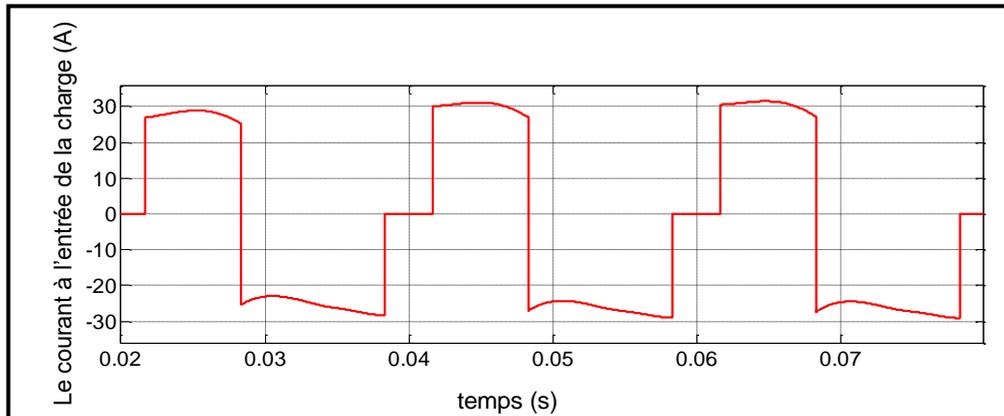
**B- Après filtrage :**

Dans le but de créer notre filtre actif parallèle, nous allons établir une connexion entre le réseau électrique et la charge polluante en utilisant un onduleur triphasé. La figure ci-dessous illustre le schéma bloc de cette configuration comprenant l'association entre le réseau électrique, la charge polluante et le filtre.

**IV.3.2 L'association filtre actif -réseau-charge polluante après filtrage**



**Figure (4.8):** Schéma Bloc de l'association filtre actif-réseau-charge polluante



**Figure (4.9) :** Le courant à l'entrée de la charge polluante

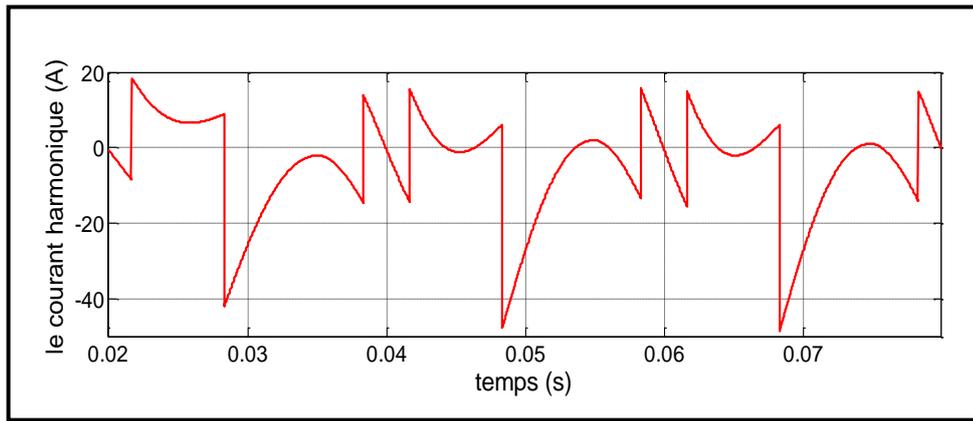


Figure (4.10) : Le courant identifié ou le courant harmonique

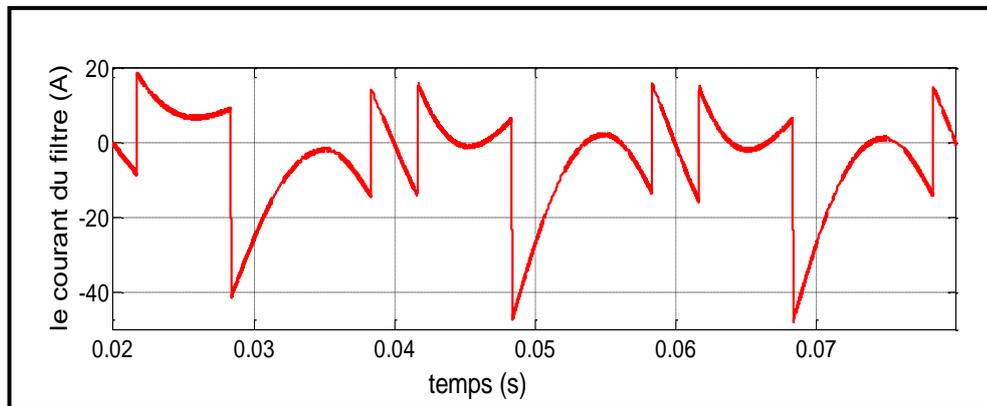


Figure (4.11) : Le courant du filtre

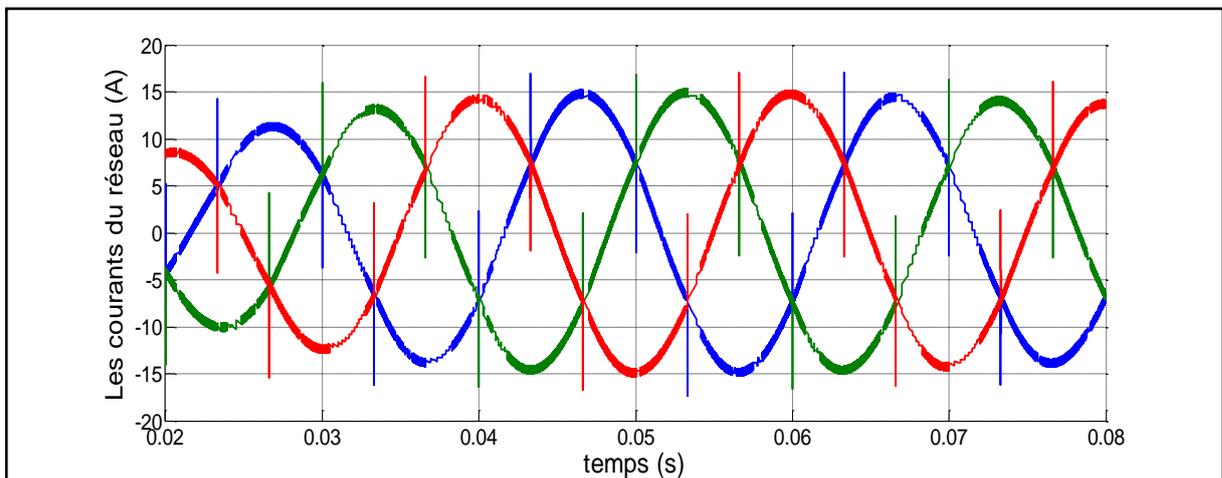


Figure (4.12) : Les courants du réseau

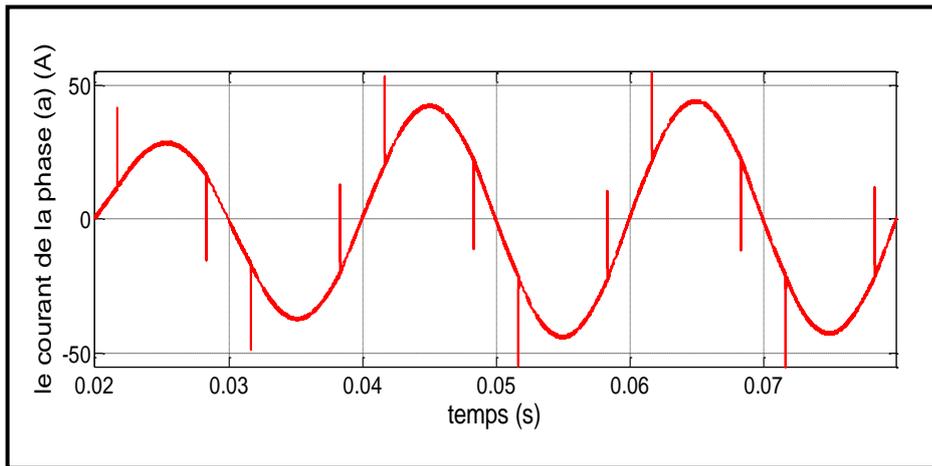


Figure (4.13): Le courant  $I_a$  de la phase (a) du réseau

La figure (4.14) montre Le spectre d’harmonique du courant  $I_a$  après filtre

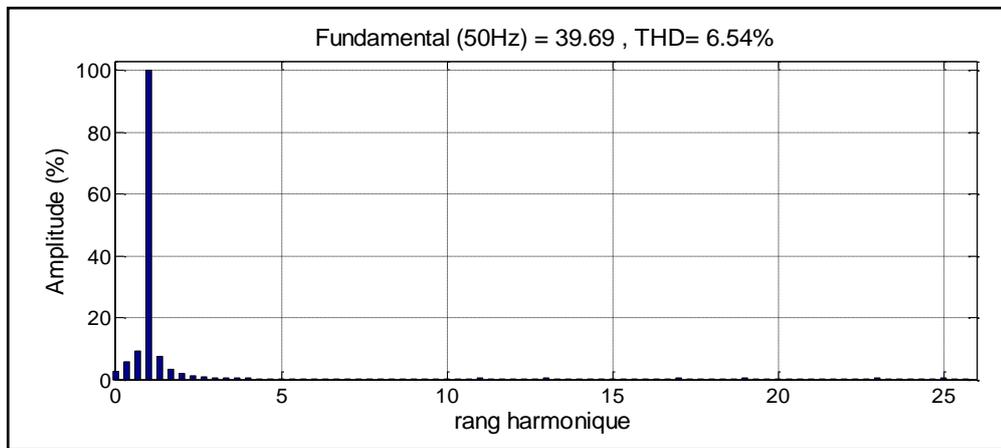


Figure (4.14) : Le spectre d’harmonique du courant après filtre.

Tableau (4-2) : présente l’ordre des harmoniques après le filtrage, ainsi que leur amplitude relative par rapport à la fondamentale (%) de la charge N°01

Tableau (4.2) : Le rang d’harmonique et Son amplitude par rapport à la fondamentale (%)

Le rang d’harmonique	Son amplitude par rapport à la fondamentale (%)	Le rang d’harmonique	Son amplitude par rapport à la fondamentale (%)
2	0.72	14	0.01
3	0.27	15	0.00
4	0.14	16	0.01
5	0.12	17	0.21
6	0.06	18	0.01
7	0.01	19	0.22
8	0.03	20	0.01
9	0.03	21	0.01
10	0.02	22	0.01

11	0.21	23	0.23
12	0.01	24	0.00
13	0.21	25	0.24

Les résultats de la simulation de l'alimentation de la charge N°01 avec l'utilisation du filtre indiquent que :

- Les courants du réseau présentent une forme quasi sinusoïdale, et la valeur du taux de distorsion harmonique (THD) de ces courants est très faible, comme illustré dans la figure (4-14) avec un THD de **06.54%**.
- Les amplitudes des harmoniques de rang 5, 7, 11 et 13 sont très faibles, tandis que les autres rangs d'harmoniques présentent des amplitudes négligeables.

### IV.4 Test du filtre avec la charge polluante N°02

#### Les caractéristiques de la charge polluante

Pour cette simulation, nous avons introduit une autre charge polluante dans notre système. Cette charge est représentée par un redresseur triphasé commandé par des IGBTs, qui alimente une charge résistive-inductive ( $R = 40 \Omega$  et  $L = 50 \text{ mH}$ ). Nous avons fixé l'angle d'allumage des transistors  $\alpha = 30^\circ$ .

#### IV.4.1 L'association entre le réseau et la charge polluante avant l'ajout d'un filtre

##### A- Avant filtrage

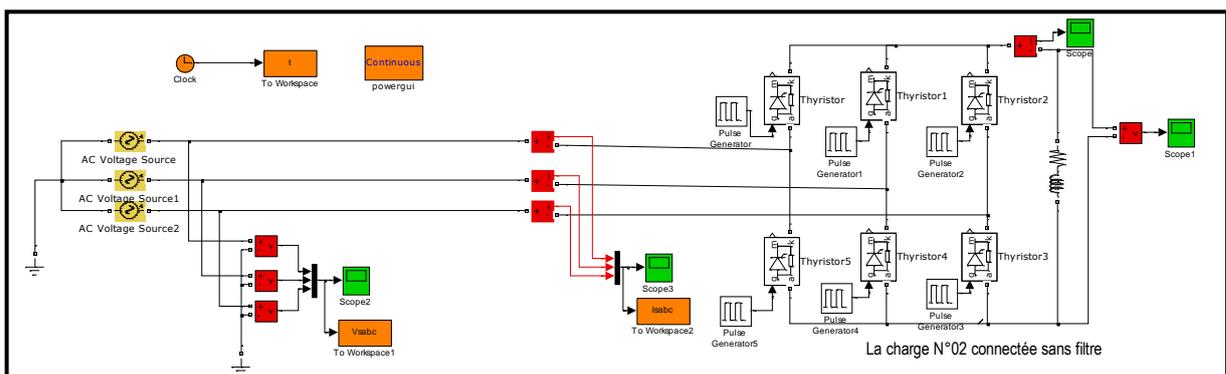
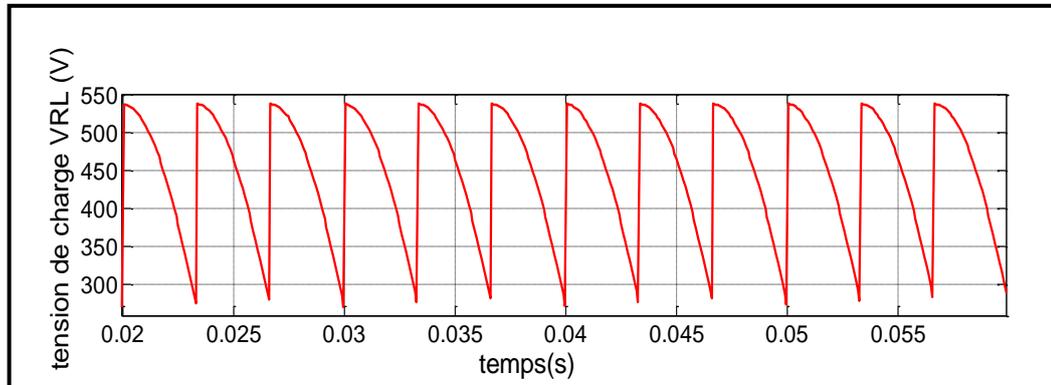


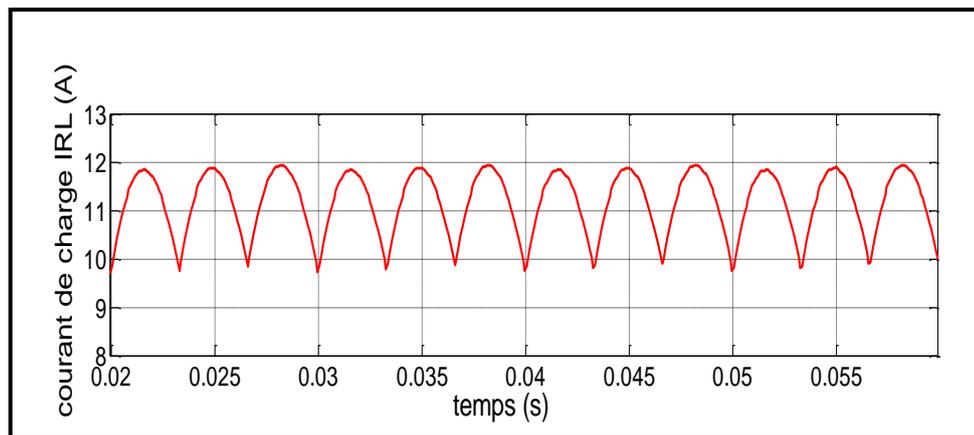
Figure (4- 15) : Schéma bloc de l'association réseau-charge polluante.

Nous allons alimenter la charge polluante avec un réseau triphasé et procéder à la mesure des courants et des tensions de ce système.

Afin de déterminer le taux de distorsion harmonique (THD), il est nécessaire de mesurer les courants et les tensions du réseau, ainsi que le courant et la tension de la charge. De plus, il est important d'analyser le spectre harmonique de chaque composante.

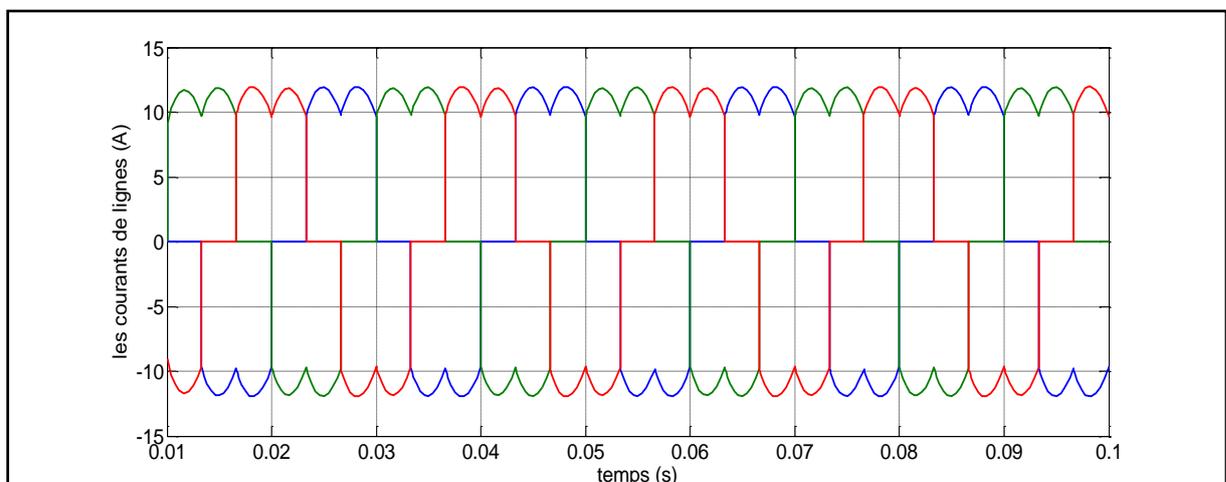


**Figure (4.16) :** La tension à la borne de la charge RL



**Figure (4.17) :** Le courant dans la charge RL

Figure (4- 18) montrant Les courants à l'entrée de la charge polluante avant filtrage



**Figure (4.18) :** Les courants à l'entrée de la charge polluante

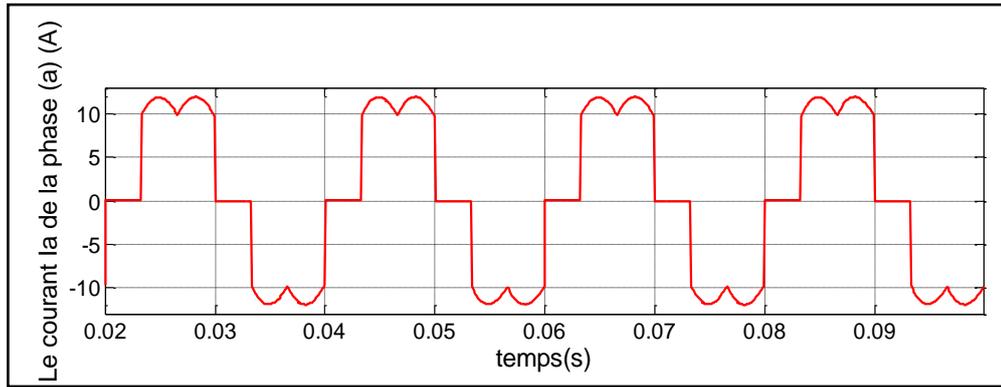


Figure (4.19) : Le courant  $I_a$  de la phase (a)

Figure (4- 20) : montrant Le spectre d’harmonique du courant  $I_a$  avant filtrage

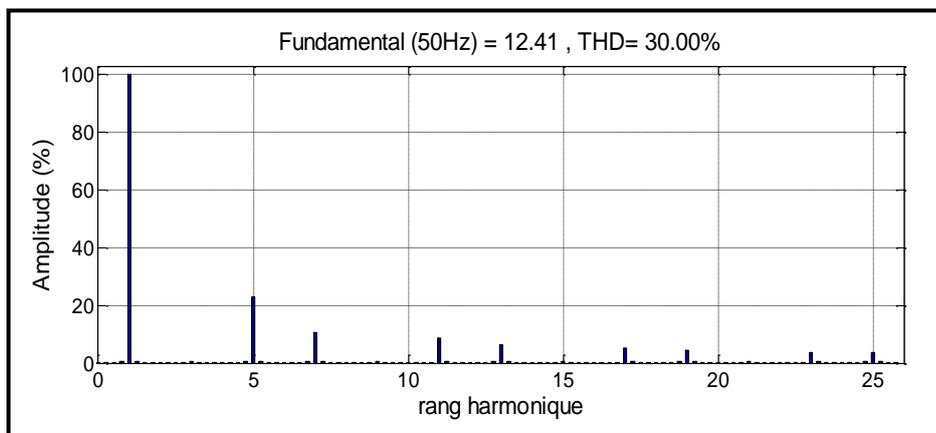


Figure (4.20) : Le spectre d’harmonique du courant  $I_a$

Tableau (4-3) : présente l'ordre des harmoniques avant le filtrage, ainsi que leur amplitude relative par rapport à la fondamentale (%) de la charge N°2

Tableau (4.3) : Le rang d’harmonique et Son amplitude par rapport à la fondamentale (%)

Le rang d’harmonique	Son amplitude par rapport à la fondamentale (%)	Le rang d’harmonique	Son amplitude par rapport à la fondamentale (%)
2	0.04	14	0.01
3	0.19	15	0.19
4	0.03	16	0.01
5	6.58	17	1.80
6	0.01	18	0.01
7	4.58	19	1.76
8	0.01	20	0.01
9	0.19	21	0.19
10	0.01	22	0.01
11	2.86	23	1.30
12	0.01	24	0.01
13	2.53	25	1.36

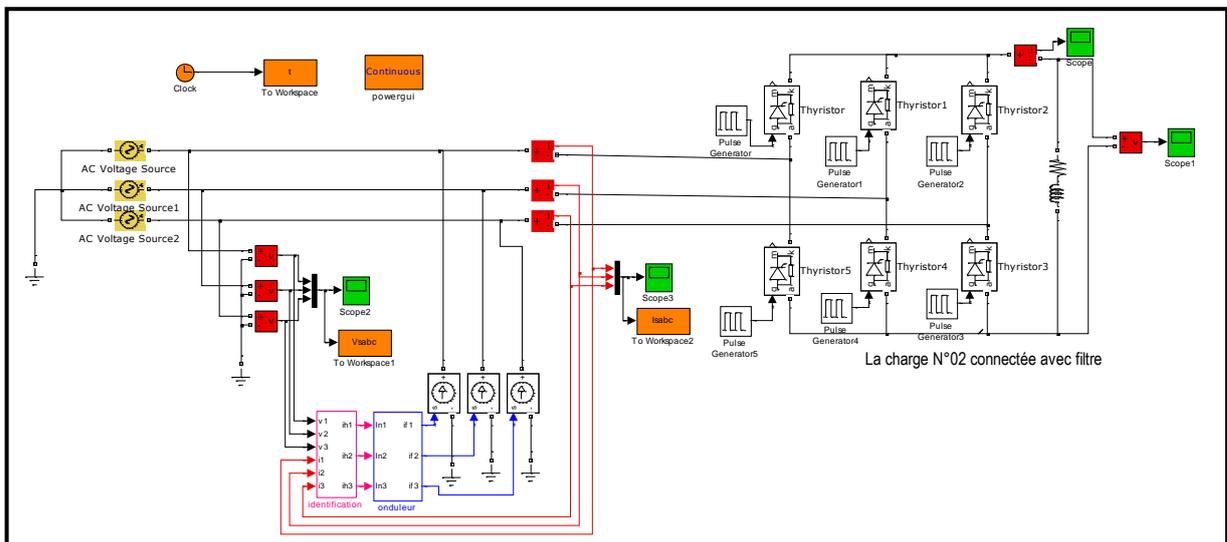
Les résultats de la simulation de l'alimentation de la charge N°02 avec l'utilisation du filtre indiquent que :

- D'une part, les courants de trois lignes à l'entrée du redresseur Abc ne présentent pas une forme sinusoïdale, mais contiennent une grande quantité d'harmoniques. D'autre part, la valeur du taux de distorsion harmonique (THD) obtenue pour ces courants est très élevée, comme illustré dans la figure (IV 20), avec un THD de **30.00 %**.
- Les amplitudes des harmoniques de rang 5, 7, 11 et 13 sont significativement élevées, tandis que les autres rangs d'harmoniques présentent des amplitudes faibles, inférieures à 5%.

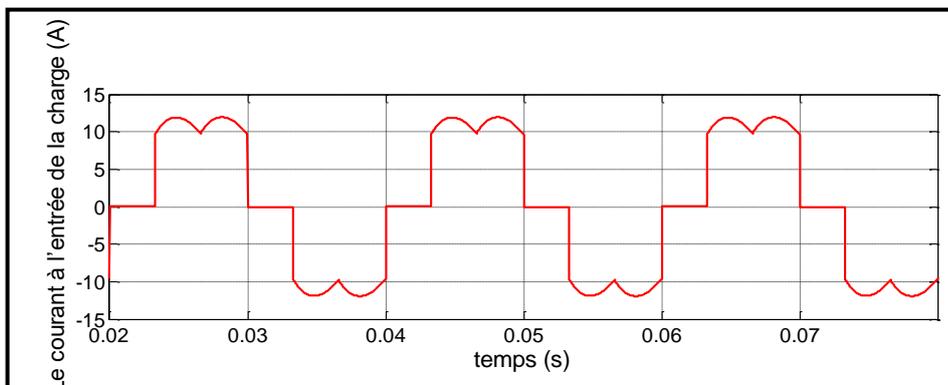
**B -Après filtrage**

Nous allons établir une connexion entre le réseau électrique et la charge polluante en utilisant un onduleur triphasé afin de créer notre filtre actif parallèle.

**IV.4.2 L'association filtre actif -réseau-charge polluante après filtrage**



**Figure (4. 21) :** Schéma bloc de l'association filtre actif-réseau-charge polluante.



**Figure (4.22) :** Le courant à l'entrée de la charge polluante

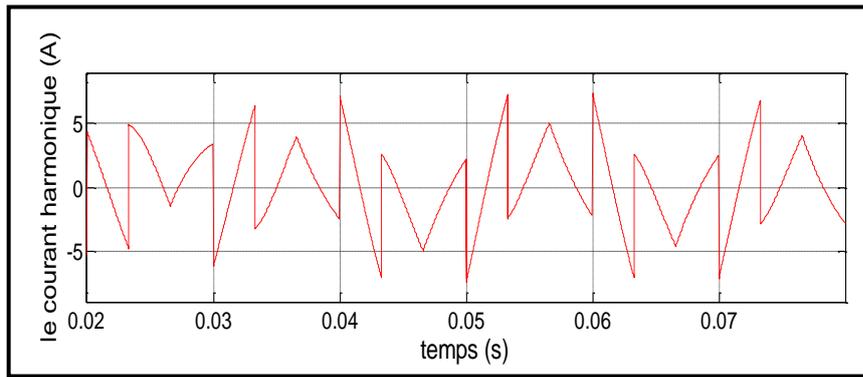


Figure (4.23) : Le courant identifié ou le courant harmonique

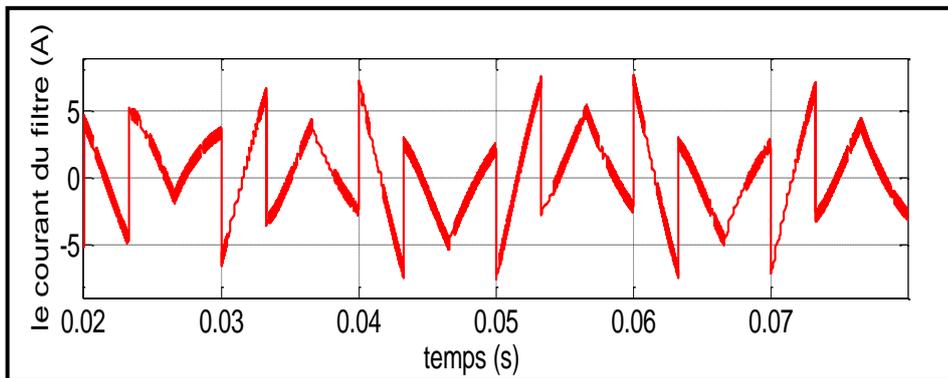


Figure (4. 24) : Le courant du filtre

Figure (4- 25) montrant Les courants du réseau après filtrage Abc

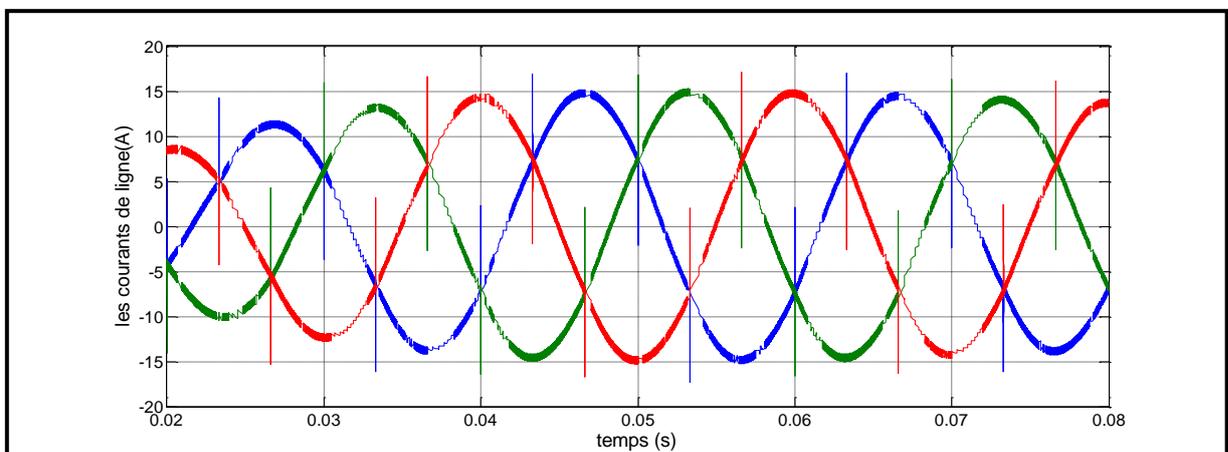


Figure (4.25) : Les courants du réseau

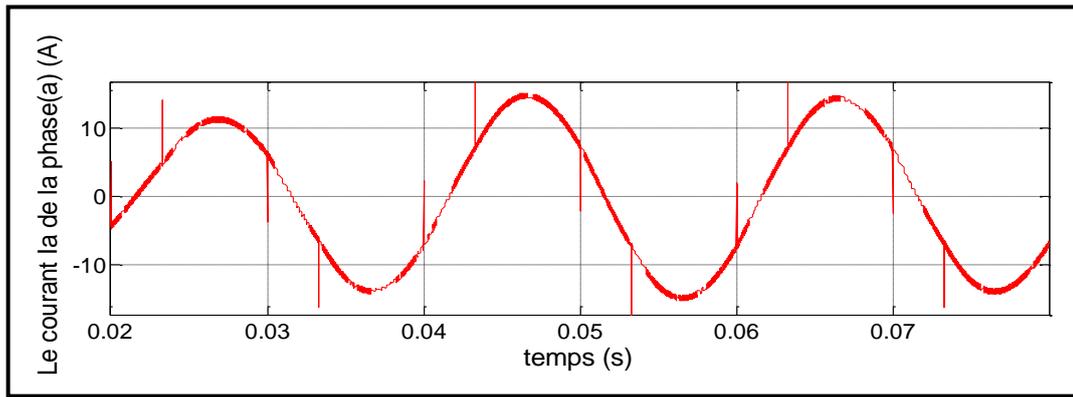


Figure (4.26) : Le courant  $I_a$  de la phase (a) du réseau

Figure (4.27) montrant Le spectre d’harmonique du courant après filtrage

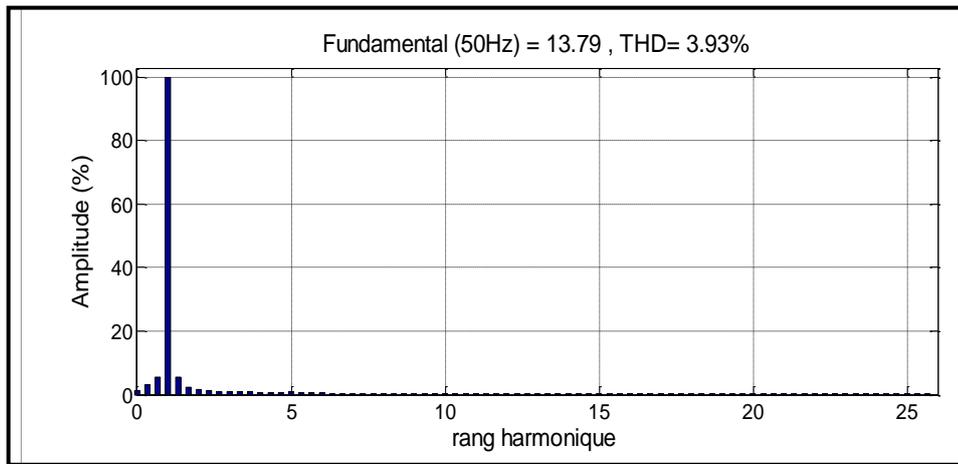


Figure (4.27) : Le spectre d’harmonique du courant

Tableau (4.4) : montre Le rang d’harmonique après filtrage et Son amplitude par rapport à la fondamentale (%) de la charge N° 02

Tableau (4.4) : Le rang d’harmonique et Son amplitude par rapport à la fondamentale (%)

Le rang d’harmonique	Son amplitude par rapport à la fondamentale (%)	Le rang d’harmonique	Son amplitude par rapport à la fondamentale (%)
2	0.23	14	0.01
3	0.10	15	0.02
4	0.08	16	0.02
5	0.13	17	0.01
6	0.06	18	0.01
7	0.03	19	0.03
8	0.03	20	0.01
9	0.04	21	0.01
10	0.03	22	0.01
11	0.02	23	0.02
12	0.03	24	0.02
13	0.02	25	0.02

## IV.5 Test du filtrage avec une méthode classique de la charge polluante N°01

Dans cette partie nous avons utilisés une méthode traditionnelle par batterie de condensateurs pour faire une comparaison entre cette technique avec celle proposée par un FAP pour les deux charges polluantes qui nous avons discutés dans la section précédente.

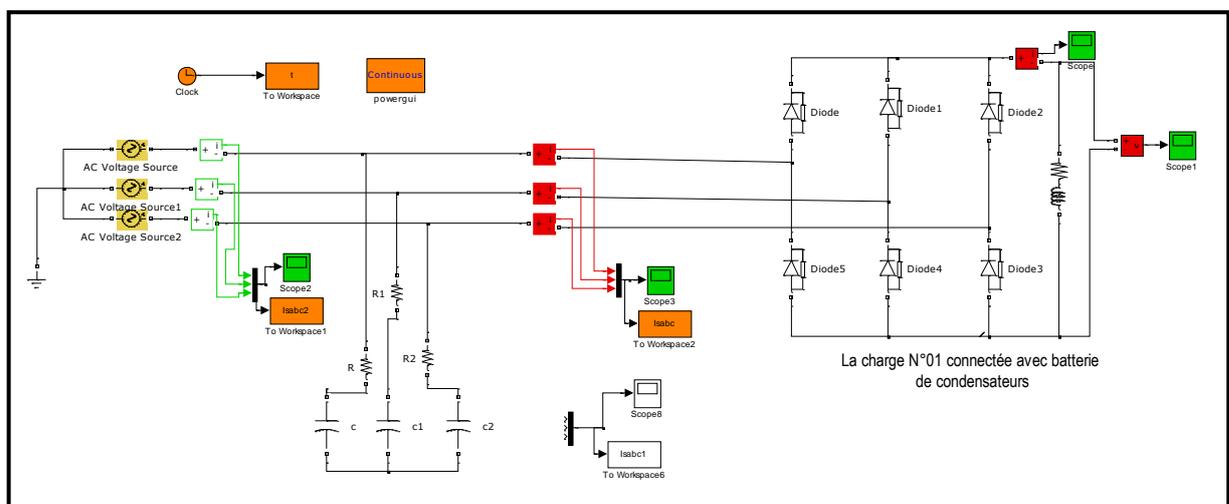
Alors les paramètres du filtre utilisé dans ce cas sont :

- Résistance de ligne (R) : 1  $\Omega$
- Un condensateur (C) : 200 $\mu$ F

Les résultats de la simulation :

### IV.5.1 L'association entre le réseau et la charge polluante avec une batterie de condensateur

La figure (4. 28) illustre le schéma bloc de l'association entre le réseau électrique et la charge polluante avec l'installation d'un système de batterie condensateur.



**Figure (4-28) :** schéma bloc de L'association entre le réseau et la charge polluante avec une batterie de condensateur

Afin de mesurer le taux de distorsion harmonique (THD), il est essentiel de mesurer les courants et d'analyser attentivement le spectre harmonique de chaque composante.

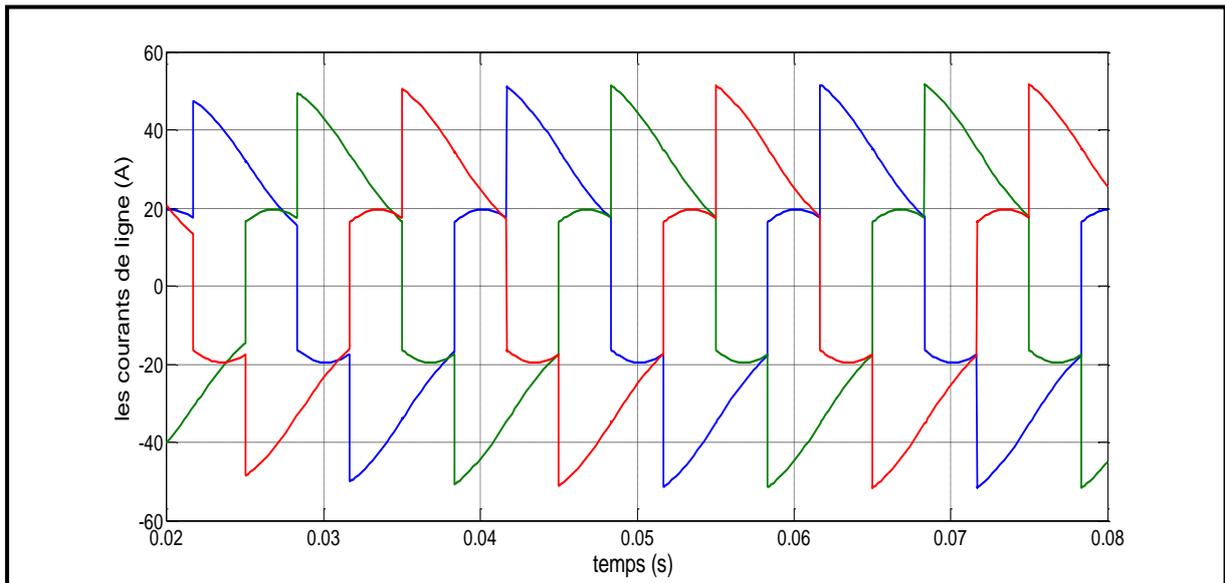


Figure (4.29) : Les courants de ligne (A)

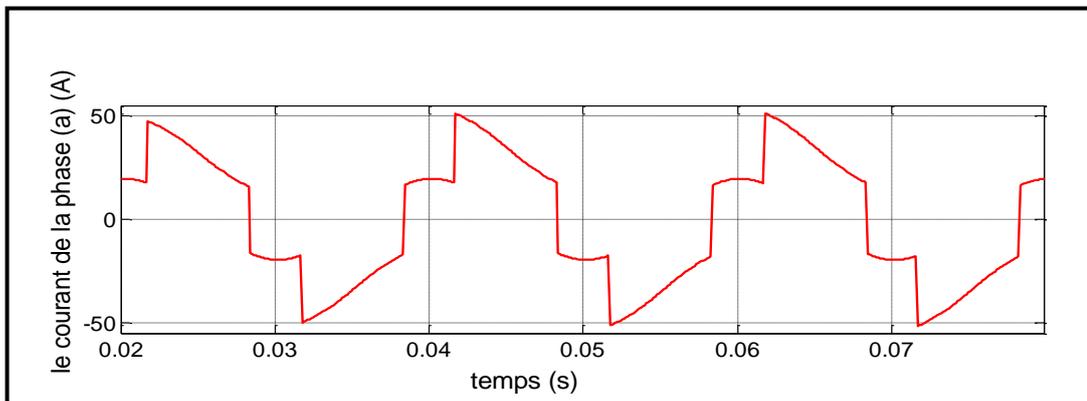
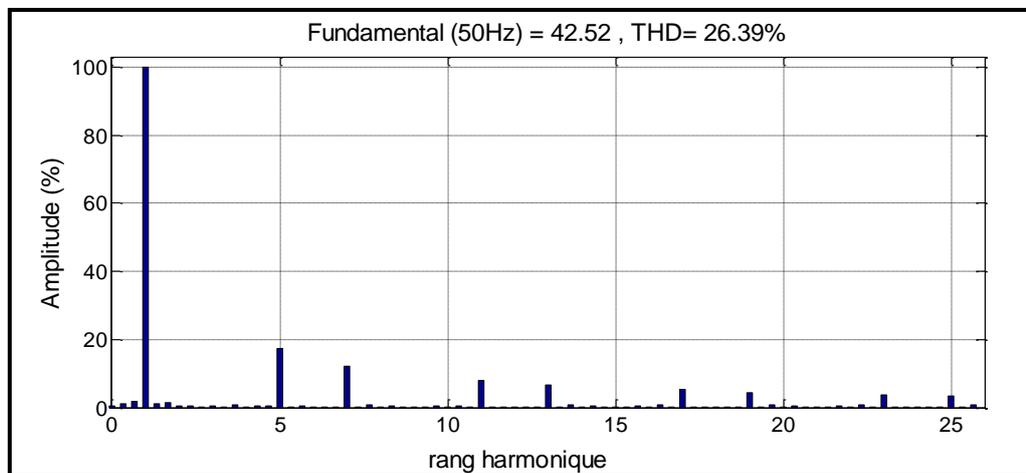


Figure (4.30) : Le courant  $I_a$  dans la phase (a)

Figure (4.31) : montrant Le spectre d'harmonique du courant  $I_a$  avec filtrage des batteries de condensateur



**Figure (4.31)** : Le spectre d'harmonique du courant  $I_a$ **Tableau (4.5)** : Le rang d'harmonique et Son amplitude par rapport à la fondamentale (%)

Le rang d'harmonique	Son amplitude par rapport à la fondamentale (%)	Le rang d'harmonique	Son amplitude par rapport à la fondamentale (%)
2	0.21	14	0.03
3	0.15	15	0.09
4	0.11	16	0.03
5	7.39	17	2.21
6	0.03	18	0.01
7	5.21	19	1.89
8	0.06	20	0.02
9	0.09	21	0.09
10	0.04	22	0.02
11	3.38	23	1.65
12	0.01	24	0.01
13	2.78	25	1.43

D'après les résultats de la simulation, lorsque la charge N°01 est alimentée avec une batterie de condensateur, on observe que :

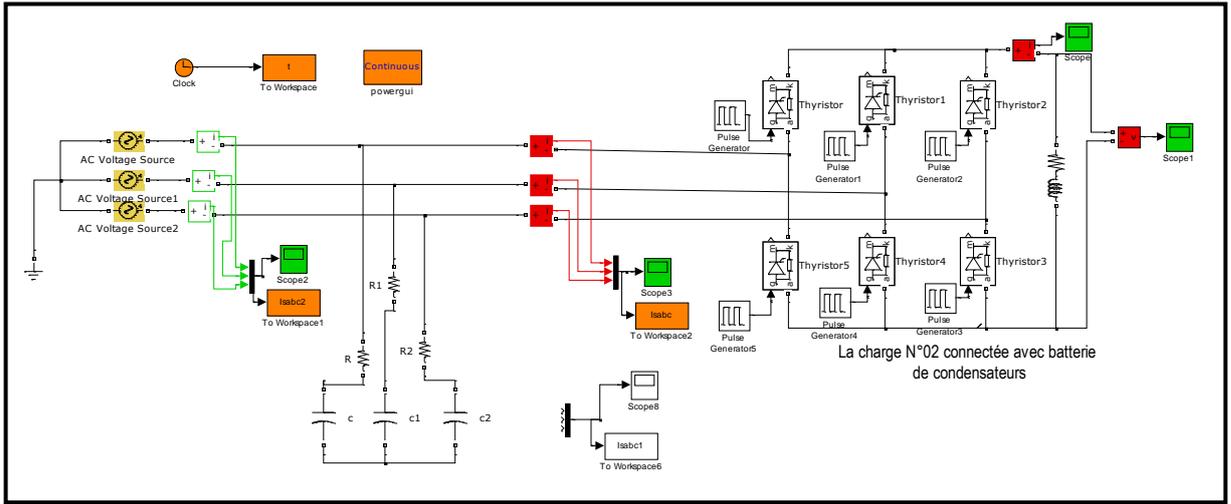
- Les courants  $I_{abc}$  des trois lignes qui alimentent le redresseur ne présentent pas une forme sinusoïdale, elles sont très riches en harmoniques, d'autre part la mesure du taux de distorsion harmonique (THD) de ces courants affiche une valeur considérablement élevée, comme illustré dans la figure (IV-31), atteignant un THD de **26,39%**.
- Les amplitudes des harmoniques de rangs 5, 7, 11 et 13 sont notablement élevées, tandis que les autres rangs d'harmoniques affichent des amplitudes faibles, inférieures à 5%.

## IV.6 Test du filtrage avec une méthode classique de la charge polluante N°02

### - Les résultats de la simulation

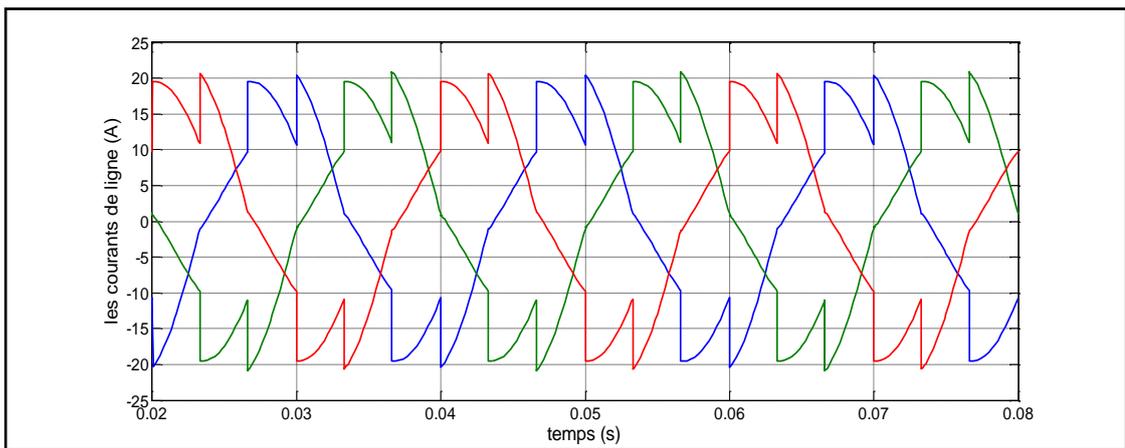
#### IV.6.1 L'association entre le réseau et la charge polluante avec une batterie de condensateur

La figure (4-32) illustre le schéma bloc de l'association entre le réseau électrique et la charge polluante avec l'installation d'un système de batterie condensateurs.

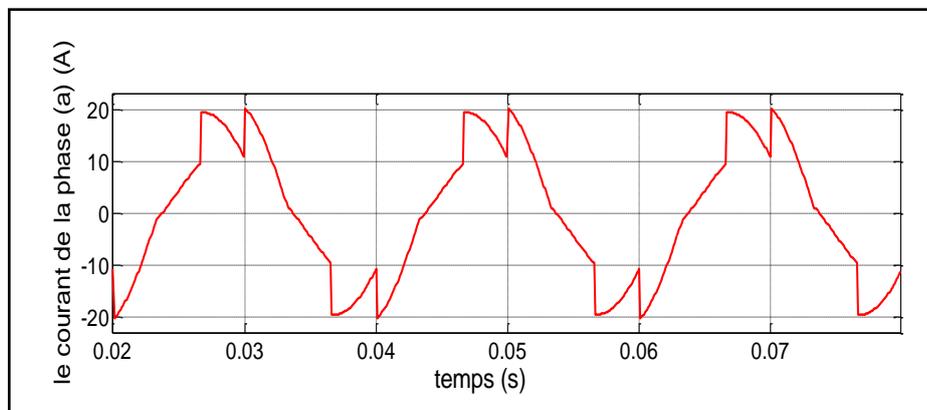


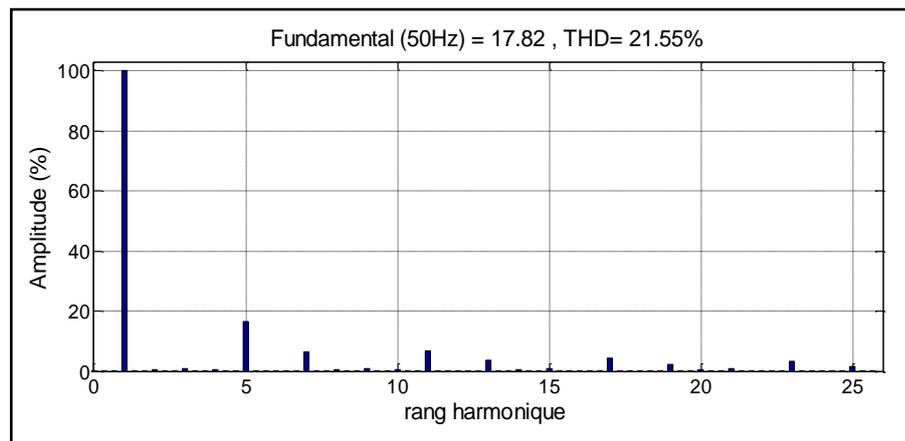
**Figure (4.32) :** schéma bloc de L'association entre le réseau et la charge polluante avec une batterie de condensateur

Afin de calculer le taux de distorsion harmonique (THD), il est essentiel de mesurer les courants et d'analyser attentivement le spectre harmonique de chaque composante.



**Figure (4.33) :** Les courants de ligne (A)



**Figure (4.34)** : Le courant  $I_a$  dans la phase (a)**Figure (4.35)** : Le spectre d'harmonique du courant  $I_a$ **Tableau (4.6)** : Le rang d'harmonique et Son amplitude par rapport à la fondamentale (%)

Le rang d'harmonique	Son amplitude par rapport à la fondamentale (%)	Le rang d'harmonique	Son amplitude par rapport à la fondamentale (%)
2	0.07	14	0.08
3	0.18	15	0.16
4	0.07	16	0.06
5	2.97	17	0.075
6	0.01	18	0.02
7	1.17	19	0.43
8	0.08	20	0.08
9	0.17	21	0.16
10	0.07	22	0.06
11	1.18	23	0.56
12	0.01	24	0.03
13	0.65	25	0.30

D'après les résultats de la simulation, lorsque la charge  $N^{\circ}02$  est alimentée avec une batterie de condensateur, on observe que :

- Les courants  $A_{bc}$  des trois lignes qui alimentent le redresseur ne présentent pas une forme sinusoïdale, elle est à une forme très perturbées, d'autre part la mesure du taux de distorsion harmonique (THD) de ces courants affiche une valeur considérablement élevée, comme illustré dans la figure (4.35), atteignant un THD de **21,55%**.

- Les amplitudes des harmoniques de rangs 5, 7, 11 et 13 sont notablement élevées, tandis que les autres rangs d'harmoniques affichent des amplitudes faibles, inférieures à 5%.

Le tableau suivant montre les différents résultats obtenus après plusieurs tests et essais de simulation sous l'environnement Simulink/MATLAB.

**Tableau (4.7) :** les résultats de la simulation

THD du courant	<i>La charge N°01</i>			<i>La charge N°02</i>		
	Avant filtrage	Après filtrage	Avec des condensateurs	Avant filtrage	Après filtrage	Avec des condensateurs
<b>THD %</b>	30.37	<b>06.64</b>	26.39	30.00	<b>03.93</b>	21.55

## IV.7 Conclusion

D'après les résultats de la simulation, on peut conclure que, indépendamment de la fluctuation de la charge polluante, que ce soit en termes de variation de la charge passive (RL) ou de la modification de la configuration des convertisseurs statiques. Le filtre actif parallèle que nous utilisons agit de manière automatique avec la variation de charge, en vue de minimiser les harmoniques de courant présents dans le réseau. Par contre les méthodes classiques utilisant des condensateurs visent principalement à compenser la puissance réactive et améliorer le facteur de puissance, sans fournir une solution directe pour gérer les harmoniques.

## **Conclusion générale**

Les charges non linéaires produisent des harmoniques qui circulent à travers les réseaux électriques, ce qui perturbe considérablement le fonctionnement normal de certains équipements électriques, pouvant même entraîner leur destruction. Les effets indésirables peuvent se manifester de manière instantanée, mais également se développer progressivement à long terme, aussi bien pour les fournisseurs d'électricité que pour les utilisateurs finaux.

L'objectif de cette étude était d'explorer une méthode de dépollution des réseaux électriques, connue sous le nom de filtrage actif de puissance, qui représente la solution principale pour résoudre les problèmes causés par la pollution harmonique dans les réseaux de distribution.

Le premier chapitre de cette étude met en évidence les diverses perturbations présentes dans les réseaux électriques et leurs impacts sur les équipements électriques en mettant l'accent sur le filtrage passif, que ce soit à court terme ou à long terme.

Le deuxième chapitre de cette étude examine les solutions modernes utilisées pour réduire les perturbations. De plus, une nouvelle solution, le filtrage actif, est présentée comme une approche prometteuse pour la dépollution harmonique. Nous avons examiné la structure globale du système comprenant le réseau, la charge non linéaire et le filtre actif. Ensuite, nous avons étudié individuellement le modèle de chaque composant.

Dans le troisième chapitre, nous avons examiné une méthode d'identification des puissances instantanées qui a été sélectionnée pour détecter un large éventail de perturbations de courant, notamment les courants harmoniques.

Finalement, nous avons développé un programme de simulation qui nous a permis d'optimiser les paramètres d'un filtre actif utilisé avec deux charges polluantes distinctes. Le filtre actif que nous avons mis au point permet de réduire le THD (taux d'harmoniques de distorsion) des courants dans la source pour un point de fonctionnement typique. Une des charges polluantes est représentée par un redresseur triphasé à base de diodes, tandis que l'autre charge utilise des thyristors. Dans le cas de la première charge, nous avons réussi à réduire le *THD* de **30,37%** à **06,64%**. Quant à la deuxième charge, nous avons pu le réduire de **30.00%** à **03.39%**.

Cependant, lorsqu'on utilise un filtre classique basé sur des batteries de condensateurs, on constate que cette méthode ne parvient pas à réduire le THD (**26.39 %** pour la première charge et **21.55%** pour la deuxième).

## *Conclusion générale*

---

En conclusion, lors de la comparaison entre le filtre actif et les batteries de condensateurs, il est clair que le filtre actif se distingue par sa capacité à gérer efficacement à la fois la surconsommation et la surfacturation. Contrairement aux batteries de condensateurs, le filtre actif offre une solution plus avancée et sophistiquée pour réduire le THD et améliorer la qualité de l'alimentation électrique. Grâce à sa capacité à générer des courants et tensions compensatoires de manière dynamique, le filtre actif est capable de réagir rapidement avec la variation de la charge et aux fluctuations du réseau et de maintenir la puissance électrique dans des limites acceptables. Par conséquent, le filtre actif est une option plus recommandée pour les applications nécessitant une gestion précise de l'énergie électrique et une réduction significative du THD.

En perspective, nous espérons d'implémenter l'algorithme développé pour la méthode d'identification par les puissances électriques, dans une carte dSPACE ou dans un micro-contrôleur.

*Références bibliographique*

- [1] Amar, O. (2007). Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant. *These, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA.*
- [2] polycopie de NADJEM, A. (2022). *Qualité de l'énergie électrique et Compatibilité électromagnétique* Master2 ELT IndustrielUNIVERISTIE LARBI TEBESSI – TEBESSA
- [3] Boussaid, A., &Khezzar, A. (2017). *Filtrage actif des harmoniques dans les réseaux électriques. Contribution à l'amélioration de l'énergie électrique* (Doctoral dissertation, Université Frères Mentouri-Constantine 1).
- [4] SENNI, A., &Hamouda, M. E. (2018). *Contrôle des tensions d'un Réseaux de Transport par Les Dispositifs FACTs* (Doctoral dissertation, Université Ahmed Draia-Adrar).
- [5] Lenne, M., Zeglaoui, I., &Sououdi, C. H. A. B. A. N. I. (2021). *Contribution à La Commande d'un filtre hybride multiniveaux* (Doctoral dissertation, UNIVERSITE AHMED DRAIA-ADRAR).
- [6] BELHAOUCHET, N. (2014). *Fonctionnement a fréquence de commutation constante des convertisseurs de puissance en utilisant des techniques de commande avancées application: amélioration de la qualité de l'énergie* (Doctoral dissertation, UNIVECITE FARHAT ABBAS – SETIF)
- [7] BOUDACHE, A. (2006). *Etude par simulation d'un filtre actif parallèle* (Doctoral dissertation, Université Mohamed Boudiaf-M'Sila).
- [8] BENZINE, T., DEROUICHE, A. A., & ZERROUKI, S. *Commande par Hystérésis du Courant d'un Filtre Actif Parallèle à Quatre-Bras* (Doctoral dissertation, Université Kasdi Merbah Ouargla).
- [9] Chaoui, A. (2018). *Filtrage actif triphasé pour charges non linéaires* (Doctoral dissertation).
- [10] BEN ALI, S, BOUHANAK, S. 2015" ETUDE ET SIMULATION D'UN FILTRE ACTIF PARALLEL A QUATRE FILS", Echahid Hama Lakhder d'El-Oued
- [11]ZELLOUMA, M. (2019)*Étude et réalisation d'un filtre actif parallèle de puissance commandé par DSPACE1104* (Mémoire Master, Université BADJI MOKHTAR ANNABA)
- [12] Djedjiga, G., &Billal, B. (2016). *Filtrage actif de puissance* (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).

- [13] Sidi, S, M.(2017)*Etude comparative entre les moyens de compensation de l'énergie réactive*(Mémoire Master, Université BADJI MOKHTAR ANNABA)
- [14] Bettega, E., & Fiorina, J. N. (1996). *Harmoniques: convertisseurs propres et compensateurs actifs*. Schneider Electric España SA.
- [15] Toufik, Z., & Arezki, O. M. (2011). *Etude de la distortion harmonique dans un réseau industriel moyenne tension* (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
- [16] ZELLOUMA, L.(2006) « *Filtrage actif parallèle des harmoniques du courant générés par un pont redresseur triphasé non commandé* », Mémoire de magister, .Université BADJI MOKHTAR ANNABA)
- [17] Boudjedaimi, M., Wira, P., Abdeslam, D. O., Djennoune, S., & Urban, J. P. (2008). *Commande d'un onduleur avec des approches neuromimétiques pour la compensation des courants harmoniques dans les réseaux électriques*. In International Conference on Electrical Engineering and its Applications (ICEEA').
- [18] Abbes, M T A, Ghabach, C. (2020) *Etude comparative entre les deux techniques d'identification des harmoniques pq et dq d'un filtre actif parallèle* (Mémoire Master, Université BADJI MOKHTAR ANNABA)
- [19] Houam, A, Zaamouche, F; Ounas D.(2022).*DPWM Applying for Five-Level NPC VSI Powered by PV-Boost Converter Based on Takagi Sugeno Fuzzy Model*. European Journal of Electrical Engineering Vol. 24, No. 2, April, 2022, pp. 105-112. <https://doi.org/10.18280/ejee.245-602>
- [20] Zaamouche F, Saad S, Hamiche L. (2020). *Discontinuous PWM applied for a three-phase five-level CHB inverter fed by PV solar-boost converter*. European Journal of Electrical Engineering, 22(2), 153-161. <https://doi.org/10.18280/ejee.245-602>
- [21] Alali, M A E.( 2002)« *Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension* »Thèse de Doctorat de l'Université de Louis Pasteur, Strasbourg,
- [22] Abdusalam, M. M. (2008). *Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales*. Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré-Nancy-I-France.
- [23] B. Ouahid, (2005)« *Contribution à l'Analyse des Onduleurs Multi niveaux* », Mémoire de Magister, Université Batna.

- [24] M. Fatiha, (2001) «*Etude et Commande d'un Filtre Actif Parallèle à Structure de Tension*», Mémoire de Magister, Université Mouhamed Boudiaf Oran.
- [25] Houam A, Zaamouche F, Daouadi R, Attia M. *Efficiency Considerations of LLC Resonant Converter for Induction Heating Application*. European Journal of Electrical Engineering. Vol. 24, No. 5-6, December, 2022, pp. 257-263. <https://doi.org/10.18280/ejee.245-604>
- [26] Daouadi R, Zaamouche F, Attia M, Houam A. (2022). *Sensorless field oriented control applied for an induction machine by using the discontinuous PWM strategy*. European Journal of Electrical Engineering. Vol. 25, No. 1, December, 2022, pp. 9-14. <https://doi.org/10.18280/ejee.250102>.
- [27] Attia M, Zaamouche F, Houam A, Daouadi R. (2022). *Stability Control Modeling and Simulation Strategy for an Electric Vehicle Using Two Separate Wheel Drives*. European Journal of Electrical Engineering. Vol. 24, No. 5-6, December, 2022, pp. 239-245. <https://doi.org/10.18280/ejee.245-602>
- [28] H. Djeghloud.(2007) « *Filtrage actif de puissance* » Thèse de Doctorat, Université Mentouri Constantine,
- [29] Boucif, A .2014 « *Filtrage actif d'un réseau Électrique* » Mémoire Master. Université Mohamed Khider Biskra.
- [30] NgacK,N . 2010 *Approche neuromimétique pour l'identification et la commande des systèmes électriques : application au filtrage actif et aux actionneurs synchrones* THÈSE DE DOCTORA: UNIVERSITÉ DE HAUTE-ALSACE, MULHOUSE.
- [31] OMARI, A, KENNAZ, A,E.(2017) *Filtrage actif parallèle des harmoniques du courant générés par une charge polluante* mémoire de Master UNIVERISTIE LARBI TEBESSI – TEBESSA