

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



## **Mémoire de Fin d'Étude**

Présenté à

**L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued**

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

En vue de l'obtention du diplôme de

## **MASTER ACADEMIQUE**

En Réseaux électriques

Présenté par

**NECIB Nour Eddine et HADJ AMMAR Azzeddine**

# **Thème**

**Amélioration de la qualité d'énergie électrique dans un réseau  
basse tension par un filtre actif parallèle**

Soutenu le 04/06/2018. Devant le jury composé de :

Mr. BENATTOUS Djailani	Maitre de conférences	Président
Mr. MAHNI Tidjani	Maitre de conférences	Rapporteur
Mr. KHECHEKHOUCHE Ali	Maitre de conférences	Examineur

**Année Universitaire 2017/2018**

# **REMERCIEMENTS**

*Louange A Dieu Qui Nous A Donne La  
Foi, Le  
Courage, La Patience Et La Volonté  
Pour  
Réaliser Ce Modeste Travail Dans Des  
Meilleures Circonstances Et En Bon  
Etat*

*Nos premiers remerciements iront à  
monsieur MAHNI Tidjani pour nous  
avoir encadrés  
durant toute la période d'étude.*

*Nous remercions aussi les membres du  
Jury :*

*BENATTOUS Djailani et  
KHECHEKHOUCHE Ali  
d'avoir accepté  
de juger notre travail.*

*Nos vifs remerciements vont également à  
tous nos amis  
pour leur soutien moral tout au long de la  
préparation de ce mémoire.*

*Nous ne pouvons pas clôturer nos  
remerciements sans se  
Retourner vers les personnes les plus chers  
à nous ; nos parents  
qui ont eu un rôle essentiel et continu  
dans notre réussite.*

*NECIB Nour Eddine  
et  
HADJ AMMAR Azzedine*



## *Dédicace*

*Je dédie ce fruit de travail :  
A ma très chère maman, pour sa  
tendresse, sa bienveillance, son  
Encouragement, pour ce qu'elle  
a fait depuis mon enfance  
jusqu'à ce jour.*

*A mon cher père pour sa  
générosité, sa bonté, je te  
remercie.*

*A mes frères et A mes chères  
sœurs*

*Et à tous les membres de ma  
grande famille.*

*En fin à tout ce qui nous aime  
et qu'on aime*

*NECIB Nour Eddine*



## *Dédicace*

*je dédie ce fruit de travail :  
A ma très chère maman, pour sa  
tendresse, sa bienveillance, son  
Encouragement, pour ce qu'elle  
a fait depuis mon enfance  
jusqu'à ce jour.*

*A mon cher père pour sa  
générosité, sa bonté, je te  
remercie.*

*A mes frères et A mes chères  
sœurs*

*Et à tous les membres de ma  
grande famille.*

*En fin à tout ce qui nous aime  
et qu'on aime*

*HADJ AMMAR Azzeddine*

## ملخص

إن استخدام محولات القدرة في إزدياد مستمر بسبب المزايا الهائلة التي تقدمها. ومع ذلك، فإن هذه المحولات تلوث شبكات الكهرباء عن طريق إدخال التيارات والجهود التوافقية، وأحيانا تستهلك الطاقة التفاعلية. تمر التوافقيات في الشبكات الكهربائية ويمكن أن تعرقل العمل الطبيعي لبعض المعدات الكهربائية أو حتى تسبب تدميرها.

الهدف من هذا العمل هو دراسة فلتر نشط مواز ذو بنية الجهد، بهدف تحسين جودة الطاقة في شبكات الجهد المنخفض.

في هذا العمل سيتم دراسة جزء الطاقة وجزء التحكم في الفلتر النشط، سيتم استخدام هذا الفلتر النشط في الشبكة الكهربائية لإزالة التوافقيات الناتجة عن ثلاثة جسور مقوم أحادية الطور.

في مثل هذه الشبكة، المحايد موجود، مما يسبب وجود توافقيات (ذات الدرجة 3 ومضاعفاتها) بسبب الحمولات أحادية الطور، مما يجعل دراسة الفلتر ذو أربعة أسلاك أكثر أهمية.

يتم محاكاة الفلتر المربوط مع مصدر التغذية والحمولة الغير خطية بواسطة برنامج مطلاب/سملينك، مع تجريب نوعين من العاكس (ذو ثلاية أذرع و ذو أربعة أذرع). في نهاية هذا العمل يتم عرض ومناقشة نتائج المحاكاة.

## الكلمات المفتاحية:

مصفاة فعالة متوازية ذات أربعة خيوط، نسبة التشوه في التوافقيات، التعرف على التيار التوافقية، عاكس ذو ثلاثة اذرع مع مكثفة ذات نقطة وسطية، عاكس ذو أربعة اذرع، تحكم بالهيستريزيز.

## Résumé

Les convertisseurs de puissance sont de plus en plus utilisés grâce aux avantages énormes qu'ils offrent. Cependant ces convertisseurs polluent les réseaux électriques en introduisant des courants et des tensions harmoniques et en consommant parfois l'énergie réactive. Les harmoniques circulent dans les réseaux électriques et peuvent perturber le fonctionnement normal de certains équipements électriques voir même engendrer leur destruction.

L'objectif de ce travail est l'étude d'un filtre actif parallèle à structure tension afin d'améliorer la qualité d'énergie dans les réseaux basse tension.

Dans ce travail la partie puissance et la partie commande du filtre actif vont être étudiées. Ce filtre actif va être utilisé dans un réseau électrique pour éliminer les courants harmoniques générés par trois ponts redresseurs monophasés.

Dans un tel réseau, le neutre est distribué ce qui fait apparaitre des composantes homopolaires (harmoniques d'ordre 3 et ces multiples), à cause de ces charges non linéaires monophasées, à cette effet le filtre étudié dans ce travail est plus adéquat, du fait de la distribution du quatrième fil, qui permet de compenser le courant du neutre.

L'ensemble réseau électrique-charges non-linéaires-filtre actif est simulé à l'aide du logiciel MatLab/Simulink, les topologies, onduleur à trois bras avec condensateur à point milieu et onduleur à quatre bras seront testées, enfin, les résultats des simulations avant et après filtrage seront présentés et interprétés.

**Mots clés :** Filtre actif parallèle à quatre fils, Taux de distorsion harmonique(THD), Identification des courants harmoniques, Onduleur à trois bras avec condensateur à point milieu, Onduleur à quatre bras, commande par hystérisis.

# sommaire

**INTRODUCTION GÉNÉRALE..... 1**

## **CHAPITRE I**

### **Perturbations et Dépollution dans les Réseaux Electriques**

I.1 Introduction.....	4
I.2 Perturbations électriques .....	4
I.2.1 Creux et coupures de tension .....	4
I.2.2 Fluctuations des tensions (flicker) .....	5
I.2.3 Déséquilibre du système triphasé de tension.....	6
I.2.4 Variation de fréquence.....	8
I.3 Perturbations harmonique .....	8
I.3.1 Définition .....	8
I.3.2 Source d'harmonique.....	9
I.3.3 Conséquence des harmoniques.....	10
I.3.4 Caractérisation des perturbations harmoniques.....	11
I.4 Solutions de dépollution du courant dans les réseaux électriques.....	14
I.4.1 Les solutions traditionnelles .....	14
I.4.1.1 Compensation de la puissance réactive .....	16
I.4.2 Les solutions modernes .....	16
I.4.2.1 Filtre actif parallèle.....	16
I.4.2.1.a Filtre monophasé .....	17
I.4.2.1.b Filtre actif parallèle à trois fils .....	17
I.4.2.1.c Filtre actif parallèle à quatre fils .....	18
I.4.2.1.d Filtrage hybride .....	18
I.5 Comparaison entre les filtres passifs et les filtres actifs.....	19
I.6 Conclusion .....	20

## **CHAPITRE II**

### **Commande du Filtre Actif Parallèle à Quatre Fils**

II.1 Introduction.....	22
II.2. Constituants d'un filtre actif parallèle à quatre fils .....	22
II.3. Étude de la partie puissance .....	23

II.3.1. Description d'un onduleur triphasé à trois bras avec condensateurs à point milieu....	23
II.3.2. Description d'un onduleur triphasé à quatre bras .....	24
II.3.3. Filtre de couplage .....	26
II.3.4. Système de stockage d'énergie .....	28
II.4. Étude de la partie commande .....	28
II.4.1. Détermination des courants harmoniques de référence .....	28
II.4.1.1. Présentation de la méthode de puissances instantanées $\tilde{p}$ pour un filtre à quatre fils.....	28
II.4.2. Contrôle de l'onduleur par hystérésis .....	31
II.3 Conclusion.....	32

### CHAPITRE III

#### Simulation et Interprétations des Résultats

III.1 Introduction.....	34
III.2 Schémas de simulation .....	34
III.2.7 Résultat de simulation sous Matlab-Simulink .....	37
III.2.7.1 Cas de charge équilibrée .....	37
III.2.7.1.1 Cas de charge équilibrée avec un onduleur triphasé à quatre bras.....	37
III.2.7.1.2 Cas de charge équilibrée avec un onduleur triphasé à trois bras .....	40
III.2.7.2 Cas de charges déséquilibrées .....	43
III.3 Conclusion.....	48
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE</b> .....	49

#### Bibliographies

## *LISTE DES SYMBOLES*

f	Fréquence
$f_h$	Fréquence de la composante harmonique de rang h
$f_1$	Fréquence de la composante fondamentale
THD	Taux de Distorsion Harmonique
D	Puissance Déformante
P	Puissance active
Q	Puissance réactive
S	Puissance apparente
FP	Facteur de puissance
$I_f$	Valeur efficace du courant injecté par le FAP
$I_{1h}$	Valeur efficace du Courant harmonique du rang h
$V_1$	Valeur efficace de la tension de l'harmonique de rang h
$V_h$	Valeur efficace de la tension du fondamental
p	indice de pulsation
L	Inductance
C	Capacité
R	Résistance
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
MLI	modulation de largeurs d'impulsions
FAP	Filtre actif parallèle
FAS	Filtre actif série
$R_s$	Résistance du réseau côté source ( $\Omega$ ).
$L_s$	Inductance côté source (H).
$R_c$	Résistance côté de charge ( $\Omega$ ).
$L_c$	Inductance côté source (H).
$L_f$	Inductance de filtre
$C_{dc}$	Condensateur du bus continue
$I_s$	Courant du source
$I_f$	Courant du filtre
$I_h$	Courant harmonique de la charge
$I_n$	le courant du neutre
$i_\alpha^*, i_\beta^*, i_c^*$	le courant d'identifie
$i_{ca}, i_{cb}, i_{cc}$	le courant de line
$\tilde{p}, \tilde{q}$	Composantes Alternatives de la puissance réelle et imaginaire respectivement
$\alpha\text{-}\beta$	Axes du repaire de Concordia
$\Delta T$	La période de variation du courant du filtre
$w_h$	la pulsation du rang h
$T_i$	Etat de l'interrupteur i (ouvert ou fermé)

*LISTE DES FIGURES*

<b>Figure</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>Fig (I.1)</b>	Creux et coupures de tension.	5
<b>Fig (I.2)</b>	Fluctuations de tension.	6
<b>Fig (I.3)</b>	Déséquilibre du système triphasé de tension.	7
<b>Fig (II.4)</b>	Variation de la fréquence.	8
<b>Fig (I.5)</b>	Analyse d'une onde déformée.	9
<b>Fig (I.6)</b>	Spectre de fréquence.	12
<b>Fig (I.7)</b>	Principe du filtrage actif parallèle.	16
<b>Fig (I.8)</b>	Déférentes configurations d'un filtre actif monophasé.	17
<b>Fig (I.9)</b>	Configuration d'un FAP à trois fils.	17
<b>Fig (II.1)</b>	Schéma global du FAP à quatre fils connecté au réseau.	22
<b>Fig (II.2)</b>	Filtre actif parallèle à trois bras avec condensateurs à point milieu.	23
<b>Fig (II.3)</b>	Filtre actif parallèle à quatre bras pour un réseau triphasé à quatre fils.	25
<b>Fig (II.4)</b>	Autres topologies de l'onduleur à quatre fils.	26
<b>Fig (II.5)</b>	Identification par la méthode des puissances instantanées.	31
<b>Fig (II.6)</b>	Principe de la commande par hystérésis.	32
<b>Fig (III.1)</b>	Schéma de FAP à quatre fils avec un onduleur à quatre bras sous Matlab- Simulink.	34
<b>Fig (III.2)</b>	Schéma de FAP à quatre fils avec un onduleur à trois bras sous Matlab- Simulink.	35
<b>Fig (III.3)</b>	charges triphasées non linéaire sous Matlab- Simulink.	35
<b>Fig (III.4)</b>	Identification par la méthode des puissances instantanées sous Matlab- Simulink.	36
<b>Fig (III.5)</b>	commande par hystérésis sous Matlab- Simulink.	36
<b>Fig (III.6)</b>	Courant de source et de charge avant et après filtrage.	37
<b>Fig (III.7)</b>	Courant de filtre avant et après filtrage.	37
<b>Fig (III.8)</b>	Courant de neutre côté source et côté charge avant et après filtrage.	38
<b>Fig (III.9)</b>	Spectre d'harmonique du courant de source.	38
<b>Fig (III.10)</b>	Courant de source et de charge avant et après l' augmentation de la charge .	38
<b>Fig (III.11)</b>	Courant de filtre après l' augmentation de la charge.	39
<b>Fig (III.12)</b>	Courant de neutre côté source et côté charge avant et après l' augmentation de la charge.	39

**LISTE DES FIGURES**

---

<b>Fig (III.13)</b>	Spectre d'harmonique du courant après l' augmentation de la charge.	39
<b>Fig (III.14)</b>	Courant de source avant et après filtrage.	40
<b>Fig (III.15)</b>	Courant de filtre avant et après filtrage.	40
<b>Fig (III.16)</b>	Courant de neutre avant et après filtrage.	40
<b>Fig (III.17)</b>	Spectre d'harmonique du courant de source.	41
<b>Fig (III.18)</b>	Courant de source avant et après l' augmentation de la charge .	41
<b>Fig (III.19)</b>	Courant de filtre et après l' augmentation de la charge.	41
<b>Fig (III.20)</b>	Courant de neutre avant et après l' augmentation de la charge.	42
<b>Fig (III.21)</b>	Spectre d'harmonique du courant après l' augmentation de la charge.	42
<b>Fig (III.22)</b>	Courant de côte source .	43
<b>Fig (III.23)</b>	Courant de neutre.	44
<b>Fig (III.24)</b>	Spectre d'harmonique du courant de la phase 1.	44
<b>Fig (III.25)</b>	Spectre d'harmonique du courant de la phase 2.	44
<b>Fig (III.26)</b>	Spectre d'harmonique du courant de la phase 3.	45
<b>Fig (III.27)</b>	Courant de côte charge.	45
<b>Fig (III.28)</b>	Courant de neutre.	45
<b>Fig (III.29)</b>	Courant de filtre.	46
<b>Fig (III.30)</b>	Spectre d'harmonique du courant de la phase 1.	46
<b>Fig (III.31)</b>	Spectre d'harmonique du courant de la phase 2.	46
<b>Fig (III.32)</b>	Spectre d'harmonique du courant de la phase 3.	46

***LISTE DES TABLEAUX***

<b>Tableau</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>Tab (I.1)</b>	Niveaux de compatibilité des harmoniques en tension.	14
<b>Tab (I.2)</b>	Limite des composantes harmoniques en courant.	14
<b>Tab (I.3)</b>	Caractéristiques des filtres actifs et passifs.	29
<b>Tab (II.1)</b>	Tensions générées par l'onduleur de tension à trois bras avec condensateurs à point milieu.	24
<b>Tab (II.2)</b>	Tensions générées par l'onduleur de tension à quatre bras.	25
<b>Tab (II.3)</b>	Les modes de compensation de la commande des puissances instantanées.	30
<b>Tab (III.1)</b>	Paramètres du système étudié.	36
<b>Tab (III.2)</b>	comparution THD entre déférente cas de simulation.	48

## Introduction générale

Dans un système triphasé idéal, les tensions et les courants sont des ondes à fréquence et amplitude constantes. Par contre, les courants de phase générés par une charge non linéaire reliée à un système d'alimentation triphasé idéale par l'intermédiaire d'un réseau de transmission ne sont pas sinusoïdaux, mais se composent de la superposition de plusieurs harmoniques et inter-harmoniques. Par définition, l'harmonique est une composante sinusoïdale périodique et sa fréquence est un multiple entier de la fréquence fondamentale, tandis qu'inter-harmonique se réfère à n'importe quel élément de signal avec une fréquence qui n'est plus multiple de la fréquence fondamentale. Les courants déformés causent la déformation des tensions du système de distribution [2].

Les éléments non-linéaires causant une déformation à l'alimentation électrique sont nombreux tels que les convertisseurs électriques, les consommateurs électroniques, fours électriques à arc et les lampes à décharges électriques.... Au-delà, les transformateurs et les moteurs peuvent également causer une déformation due à leurs caractéristiques non idéales. Bien que les charges non-linéaires existent pendant des décennies, non seulement les équipements industriels de haute puissance, mais également les appareils électriques de faible puissance. Bien qu'une application de faible puissance ne provoque pas une déformation notable en comparaison par exemple à un four électrique à arc, plusieurs dispositifs de basse puissance fonctionnant simultanément peuvent poser des problèmes assez sévères [1].

Les tensions et les courants distordus ont plusieurs effets nocifs, tels que, la génération des résonances entre les inductances et les capacités du réseau d'alimentation, les surintensités du courant et surtensions dans les moteurs et les générateurs. Dans les transformateurs, les courants déformés causent l'échauffement et les vibrations mécaniques, ce qui mène en plus aux effets thermiques et mécaniques qui dégradent l'isolant. La déformation réduit également, l'exactitude de divers instruments de mesure et dégrade les caractéristiques de fonctionnement de la protection du système d'alimentation. En plus, les systèmes de communication et les consommateurs électroniques peuvent être perturbés ou endommagés.

Les filtres passifs ont été traditionnellement utilisés pour atténuer la déformation due aux courants harmoniques dans les systèmes d'alimentation industriels, mais leurs performances dépendantes de l'impédance du système et du courant harmonique de la charge non-linéaire, les rendent inefficaces sous certaines conditions et laissent des possibilités aux propagations des harmoniques dans le système d'alimentation [1].

Pour remédier à ces inconvénients, les filtres actifs de puissance sont introduits. Ils injectent une tension ou un courant harmonique avec une amplitude et angle de phase appropriées dans le système et compensent les harmoniques des charges non linéaires

De nombreuses configurations de filtres actifs ont été introduites dans la littérature. Celles qui répondent le mieux aux contraintes industrielles de nos jours sont les filtres actifs parallèles, les filtres séries ou même la combinaison série-parallèle. Dans le cas où les courants de la source sont non linéaires, le filtre actif parallèle est la meilleure solution pour la réduction des perturbations de faible et moyenne puissance. Le filtrage actif est plus avantageux lorsqu'une réponse rapide est nécessaire en présence d'une charge dynamique. D'autre part, il est important de noter que les performances des filtres actifs sont profondément liées à l'algorithme de détection des références harmoniques ainsi qu'à la méthode utilisée pour la poursuite de ces références.

Le présent mémoire est organisé selon le plan suivant :

**Le premier chapitre** est consacré à la présentation des perturbations dans les réseaux électriques d'alimentation, en courant et en tension, ainsi que les origines de ces perturbations et leurs conséquences sur les installations électriques. Ensuite, quelques normes d'harmoniques sont présentées. Après, les techniques et les méthodes de dépollution des réseaux électriques sont exposées.

**Le deuxième chapitre** est dédié à l'étude du filtre actif parallèle triphasé, nous exposerons les différents éléments constitutifs du filtre.

Dans **le troisième chapitre**, les différentes simulations du FAP à quatre fils sont effectuées, les courbes sont présentées et interprétées.

# **CHAPITRE I**

## **Perturbations et Dépollution dans les Réseaux Electriques**

## **I.1. Introduction**

Aujourd'hui, la situation au niveau des réseaux alternatifs basses tensions est devenue très préoccupante. La qualité du courant électrique dans les installations commerciales et électriques se dégrade incontestablement [1]. L'utilisation croissante dans l'industrie des systèmes commandés à base d'électronique de puissance entraîne de plus en plus des problèmes de perturbations au niveau des réseaux électriques. Ainsi, on assiste à une augmentation régulière, de la part des utilisateurs, des taux d'harmoniques et de déséquilibres des courants, ainsi qu'à une importante consommation de la puissance réactive. La circulation de ces mêmes courants perturbés va également provoquer des harmoniques et des déséquilibres de tension, lesquels vont se superposer à la tension nominale du réseau électrique. Ces perturbations ont des conséquences néfastes sur tout le matériel électrique, lesquelles peuvent aller d'un fort échauffement ou d'un dysfonctionnement soudain jusqu'à la destruction totale de ces équipements [1]. La qualité du courant électrique devient donc une préoccupation importante pour les distributeurs d'énergie et pour leurs clients. Dans ce chapitre nous traiterons les principales anomalies qui permettent de caractériser une alimentation électrique, leur sources et conséquences et les différentes solutions abordées dans la littérature.

## **I.2 -Les perturbations électriques :**

Les perturbations électriques peuvent se manifester par : Un creux ou une coupure de tension, une fluctuation de tension, un déséquilibre du système triphasé de tension, une variation de la fréquence, la présence d'harmoniques et/ou d'inter harmoniques.

### **I .2. 1- Creux et coupures de tension :**

#### **I.2.1.1- Définition :**

Le creux de tension est une diminution brutale de la tension à une valeur située entre 10 % et 90 % de la tension nominale pendant une durée allant de 10 ms jusqu'à quelques secondes, la figure I.1 montre un exemple de creux et de coupure de tension.

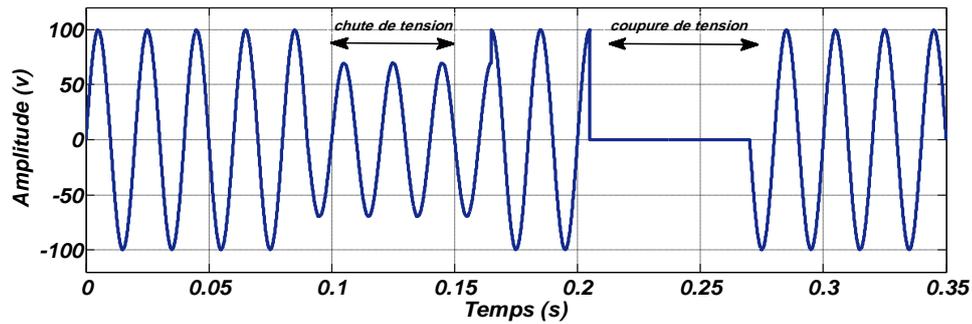


Figure I.1- Creux et coupures de tension

### I.2.1.2 - Origines :

Les principales causes des creux de tension sont les perturbations dues à l'exploitation des réseaux comme la mise sous tension de gros transformateurs, enclenchement des condensateurs, simple démarrage de gros moteurs...etc. Les creux de tension sont aussi produits par des court-circuits survenant dans le réseau général ou dans les installations de la clientèle. Leur durée peut aller de 10 ms à plusieurs secondes, en fonction de la localisation du court-circuit et du fonctionnement des organes de protection[2].

### I.2.1.3- Conséquences :

Les creux de tension peuvent provoquer des perturbations sur les couples pour les machines tournantes, perturbation d'appareillage électronique, pannes intempestives, déclenchement d'équipements, lorsque leur profondeur et leur durée excèdent certaines limites (dépendant de la sensibilité particulière des charges). Les conséquences peuvent être extrêmement coûteuses (temps de redémarrage se chiffrant en heures, voire en jours ; pertes de données informatiques ; dégâts aux produits, voire aux équipements de production...) [5] [6] [7] [2].

## I.2.2- Fluctuations de tension (flicker) :

### I.2.2.1- Définition :

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

### I.2.2.2- Origines :

L'origine principale de ces courants est le fonctionnement d'appareil dont la puissance absorbée varie de manière rapide, comme les fours à arc et des machines à souder. Ces fluctuations se traduisent par des variations d'intensité, visible au niveau de l'éclairage causant une gêne visuelle perceptible pour une variation de 1% de la tension. Ce phénomène de papillotement est appelé flicker. Un exemple de fluctuation de tension est montré dans la figure I.2.

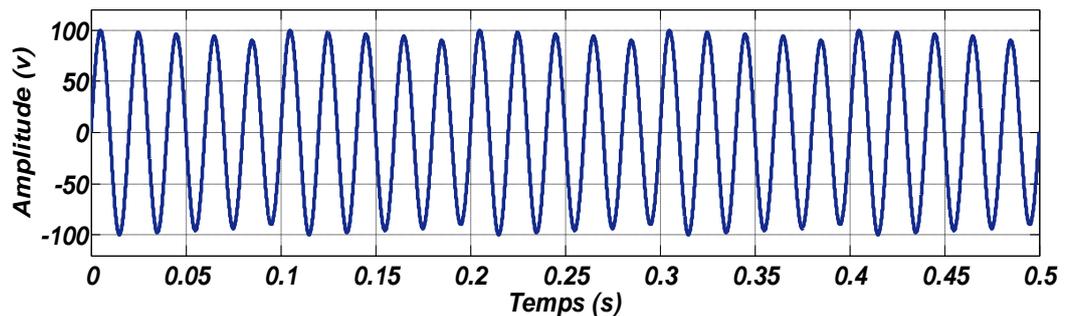


Figure I.2 - Fluctuations de tension

### I.2.2.3- Conséquences :

Le flicker est défini comme une impression d'instabilité de la sensation visuelle due à un stimulus lumineux dont la luminosité ou la couleur fluctuent dans le temps. Il peut gêner les personnes dans les ateliers, les bureaux, les locaux d'habitation en provoquant une fatigue visuelle et nerveuse [2].

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

### I.2.3.1 – Définition:

Lorsque les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalées d'un angle de  $120^{\circ}$  les unes par rapport aux autres, on parlera de déséquilibre du système triphasé.

### I.2.3.2- Origines :

Un récepteur triphasé électrique qui n'est pas équilibré et que l'on alimente par un réseau triphasé équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau [1]. Ceci est fréquent pour les récepteurs monophasés à basse tension. Mais cela peut également être engendré, à des tensions plus élevées, par des machines à souder, des fours à arc ou par la traction ferroviaire (Voir figure I.3).

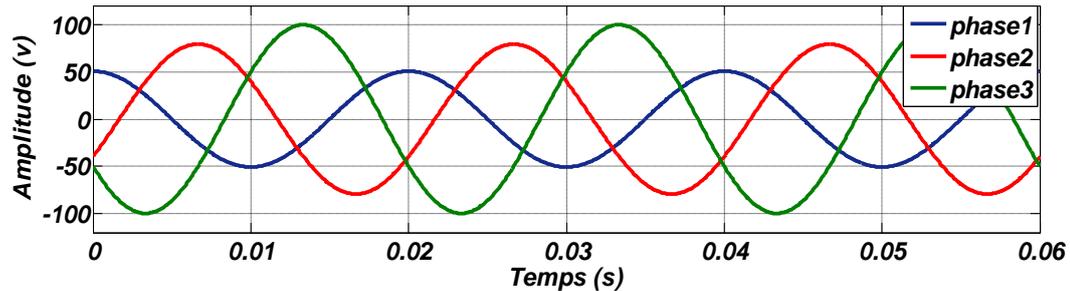


Figure I.3 - Déséquilibre du système triphasé de tension.

### I.2.3.3- Conséquences :

- Mauvais fonctionnement d'un appareil monophasé alimenté par une tension très faible (lampe à incandescence qui fournit un mauvais éclairage)
- Destruction d'un appareil monophasé alimenté par une tension trop élevée, il peut être détruit (claquage d'un filament de lampe par surtension).
- Concernant les dispositifs triphasés d'électronique de puissance, principalement les ponts redresseurs, le fonctionnement en présence de déséquilibre entraîne l'apparition de composantes harmoniques non caractéristiques, notamment des harmoniques de rang multiple de 3. L'apparition de ces courants harmoniques peut poser des problèmes, comme la génération d'une anti-résonance lors du filtrage de l'harmonique de rang 5. Outre les effets classiques des harmoniques, ces fréquences non caractéristiques peuvent conduire, dans certains cas, au blocage de la commande. La conséquence des composantes inverses sur les machines tournantes est la création d'un champ tournant en sens inverse du sens de rotation normal, d'où un couple de freinage parasite et des pertes supplémentaires qui provoquent l'échauffement de la machine.
- Concernant l'effet du déséquilibre homopolaire, il faut signaler le risque d'échauffement du conducteur neutre dans un réseau BT qui, lorsque le conducteur est d'un diamètre trop faible, peut provoquer une rupture du conducteur ou un incendie [8][2].

### I.2.4-Variation de fréquence :

Une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome (voir la figure I.4 ). Au niveau des réseaux de distribution ou de transport, cette variation de la fréquence est très rare et n'est présente que lors de circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau [3].

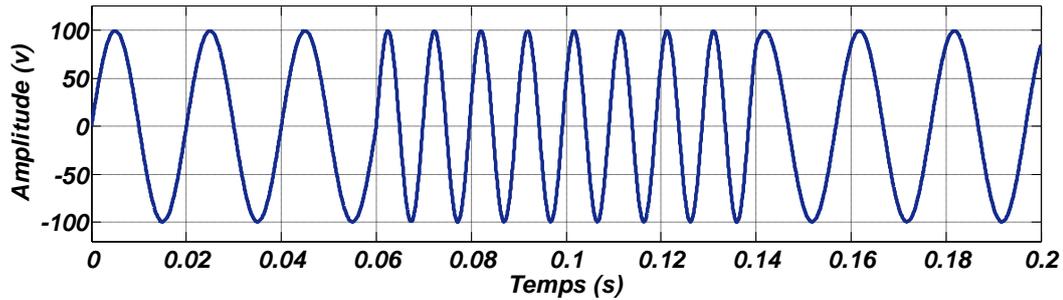


Figure I.4 - Variation de la fréquence

## I.3- Perturbations harmoniques :

### I.3.1- Définition :

Selon la norme IEEE 519, un harmonique est une composante sinusoïdale d'une onde périodique ou une quantité ayant une fréquence qui est un multiple entier de la fréquence fondamentale. Le domaine des fréquences qui correspond à l'étude des harmoniques est généralement compris entre 100 Hz et 2000 Hz (entre les harmoniques de rangs  $h=2$  et  $h=40$ ). Il peut exister des inter-harmoniques [9][2].

L'amplitude de rang 1 est appelée la composante fondamentale du signal électrique périodique. L'harmonique d'ordre zéro correspond à la composante directe du signal, l'amplitude de chaque harmonique est inversement proportionnelle à son ordre.

Les premiers rangs harmoniques tel que (3, 5, 7) ont des amplitudes élevées, d'où l'importance des courants injectés, raison pour laquelle il faut limiter ces harmoniques dans les normes [10][2].

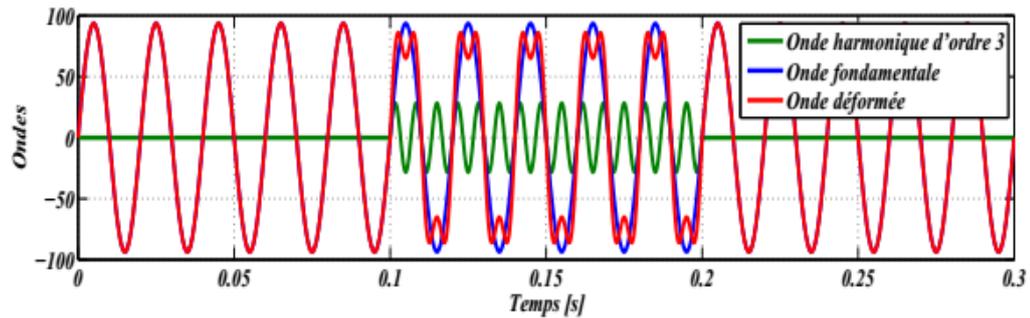


Figure I.5 - Analyse d'une onde déformée.

### I.3.2. Sources d'harmonique :

#### a. Les convertisseurs statiques :

Les convertisseurs statiques sont les sources d'harmoniques les plus gênantes du fait du nombre et de la puissance des dispositifs installés. On peut citer de manière non exhaustive :

- Les redresseurs monophasés et triphasés.
- Les gradateurs utilisés dans les entraînements.
- Les systèmes d'éclairage et de chauffage et les systèmes de conduite des réseaux.
- Les variateurs de vitesse électroniques constitués principalement d'un convertisseur statique et d'une partie électronique, destinés à commander la vitesse d'un moteur électrique.

#### b. L'éclairage :

L'éclairage, par lampes à décharge et tubes fluorescents, est générateur de courants harmoniques. Le taux individuel d'harmonique 3 peut même dépasser 100 % pour certaines lampes fluo-compactes modernes, d'où une attention particulière à porter à la détermination de la section et de la protection du conducteur neutre qui, véhiculant la somme des courants d'harmoniques 3 des trois phases, risque un échauffement important.

#### c. Les fours à arc :

Dans le cas du four à arc à courant alternatif l'arc est non linéaire, dissymétrique et instable. Il va induire des spectres possédant des raies impaires, paires et un spectre continu (bruit de fond à toutes les fréquences). Le niveau spectral est en fonction du type de four, de sa puissance, de la période de fonctionnement considérée : fusion, affinage... Aussi seules des mesures peuvent déterminer le spectre de façon précise.

Dans le cas du four à arc à courant continu l'arc est alors alimenté par l'intermédiaire d'un redresseur. L'arc est plus stable qu'en courant alternatif. Le courant absorbé se décompose en un spectre semblable à celui d'un redresseur, et un spectre continu de niveau inférieur à celui d'un four à courant alternatif.

#### **d. Les inductances saturées :**

De telles inductances ont leur impédance fonction de l'amplitude du courant qui les traverse, et de fait elles provoquent des déformations notables de ce courant. C'est le cas, dans une certaine mesure, des transformateurs à vide soumis à une surtension permanente.

#### **e. Les machines tournantes :**

Les machines tournantes donnent des harmoniques de denture de rangs élevés et d'amplitudes souvent négligeables [11][2].

### **I.3.3. Conséquences des harmoniques :**

#### **a. L'échauffement :**

Les pertes totales par effet Joule sont la somme de celles du fondamental et des harmoniques :

$$I^2 R = \sum_{i=1}^{\infty} (I_i^2 \cdot R) \quad (\text{I.1})$$

Avec  $I$  le courant total,  $I_i$  le courant harmonique de rang  $i$  qui représente le fondamental pour  $i = 1$ , et  $R$  la résistance traversée par le courant  $I$ . Les harmoniques augmentent aussi les pertes fer (pertes par courants de Foucault). Ils prennent de l'importance dans les matériels utilisant les circuits magnétiques (moteurs, transformateurs ...).

#### **b. L'interférence avec les réseaux de télécommunication :**

Le couplage électromagnétique entre les réseaux électriques et de télécommunication peut induire dans ces derniers des bruits importants. Dans le cas de résonances, une partie des réseaux de télécommunication peut être rendue inutilisable.

#### **c. Les défauts de fonctionnement de certains équipements électriques :**

En présence des harmoniques, la tension (ou le courant) peut changer plusieurs fois de signe dans une demi-période: par conséquent, tout appareil dont le fonctionnement est basé sur le passage par zéro des grandeurs électriques (appareils utilisant la tension comme référence) peut être perturbé.

**d. Le risque d'excitation de résonance :**

Les fréquences de résonance des circuits formés par des inductances des transformateurs et des câbles sont normalement élevées. Ce n'est pas le cas lorsque des batteries de capacité sont raccordées au réseau pour relever le facteur de puissance ; les fréquences de résonance peuvent devenir assez faibles et coïncider ainsi avec celles des harmoniques engendrées par les convertisseurs statiques: dans ce cas, il y aura des phénomènes d'amplification d'harmoniques.

**I.3.4- Caractérisation des perturbations harmoniques :**

Différentes grandeurs sont définies pour caractériser la distorsion en régime déformé. Le taux global de distorsion harmonique (THD) et le facteur de puissance sont les plus employés pour quantifier respectivement les perturbations harmoniques et la consommation de puissance réactive.

**a- 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 [12][1].

**b- Rang de l'harmonique :**

C'est le rapport de sa fréquence  $f_n$  à celle du fondamental (généralement la fréquence industrielle, 50 ou 60 Hz):

Par principe, le fondamental  $f_1$  a le rang un [13][1].

**c- Série de Fourier :**

$$S(t) = \frac{a_n}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left( a_n \cos n\varphi + b_n \sin \frac{n\pi x}{L} \right) \quad (\text{I.2})$$

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

$$a_n = \frac{2}{T} \int_T f(t) \cos(nwt) dt \quad \text{et} \quad b_n = \frac{2}{T} \int_T f(t) \sin(nwt) dt \quad (\text{I.3})$$

De plus, il existe quelques pré-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 [3]

#### d- Valeur efficace d'une grandeur alternative :

Il y a identité entre l'expression usuelle de cette valeur efficace calculée à partir de l'évolution temporelle de la grandeur alternative ( $I_c(t)$ ) et l'expression calculée à partir de son contenu harmonique :

$$I_{\text{ceff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_c^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{cn}^2} \quad (\text{I.4})$$

Notons qu'en présence d'harmoniques, les appareils de mesure doivent avoir une bande passante élevée ( $> 1 \text{ kHz}$ ) [3].

#### e- Spectre de fréquence :

C'est la représentation de l'amplitude des harmoniques en fonction de leur rang la valeur des harmoniques étant généralement exprimée en pourcentage du fondamentale par un histogramme (figure I.6) [13][1].

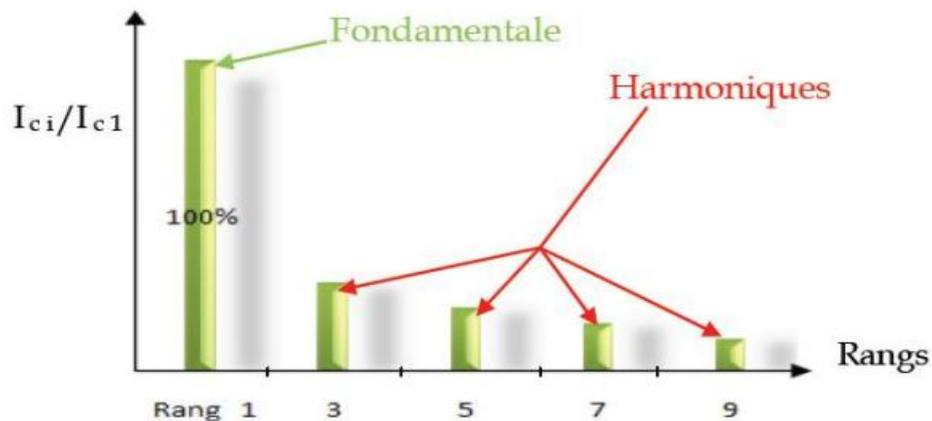


Figure I.6 – Spectre de fréquence.

#### f- Le taux de distorsion harmoniques :

Notre étude se limite au cas où la source de tension est sinusoïdale et où le courant absorbé par la charge est entaché de composantes harmoniques. Dans ces conditions, le taux global de distorsion harmonique est bien adapté pour quantifier le degré de pollution harmonique sur les réseaux électriques. Le THD s'exprime par rapport à la fréquence

fondamentale et caractérise l'influence des harmoniques sur l'onde de courant déformée. Il est donné par l'expression suivante :

$$\text{THD}(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{cn}^2}}{I_{c1}} \quad (\text{I.5})$$

Avec  $I_{c1}$  la valeur efficace du courant fondamental et  $I_{cn}$  les valeurs efficaces des différentes harmoniques du courant. Le domaine des fréquences qui correspond à l'étude des harmoniques est généralement compris entre 100 et 2000 Hz. Soit de l'harmonique de rang 2 jusqu'à l'harmonique de rang 40. Il est à signaler aussi que l'amplitude des harmoniques décroît généralement avec la fréquence [3].

### g- Le facteur de puissance :

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

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

La puissance réactive  $q$  est associée au courant fondamental. La puissance déformante  $D$  est due aux harmoniques de courant

Pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance  $FP$  est égal au quotient de la puissance active  $P$  par la puissance apparente  $S$  :

$$FP = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (\text{I.7})$$

Le facteur de puissance sera toujours inférieur à 1. En posant :

$$P = 3V \cdot I_{c1} \cdot \cos\phi_1 \quad (\text{I.8})$$

On aura

$$FP = \frac{I_{c1}}{I_c} \cdot \cos\phi_1 = F_{\text{dis}} \cdot \cos\phi_1 \quad (\text{I.9})$$

Où  $F_{\text{dis}}$  représente le facteur de distorsion. Il vaut 1 lorsque le courant est parfaitement sinusoïdale et il décroît lorsque la déformation de l'onde s'accroît.  $\phi_1$  représente le déphasage entre le courant fondamental et la tension.

Afin d'éviter les désagréments causés par la présence de courants et de tensions harmoniques dans le réseau, des normes sont imposées aux utilisateurs [3].

Tableau I.1 -Niveaux de compatibilité des harmoniques en tension [4].

Harmoniques impairs non multiple de 3		Harmoniques impairs multiple de 3		Harmoniques pairs	
rangs	Taux(%)	rangs	Taux(%)	Rangs	Taux(%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	>21	0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			>12	0.2
25	1.5				
>25	$0.2+1.3*25/n$				

Tableau I.2 -Limite des composantes harmoniques en courant [4].

Harmoniques impairs		Harmoniques pairs	
rangs	Courant harmonique	rangs	Courant harmonique admissible maximale
3	0.30	2	1.08
5	1.14	4	0.43
7	0.77	6	0.30
9	0.40	$8 < n < 40$	$0.23*8/n$
11	0.33		
13	0.21		
$15 < n < 39$	$0.15*15/n$		

#### I.4 - Solutions de dépollution du courant dans les réseaux électriques :

Afin de compenser les perturbations du courant, deux groupes de solution de dépollution, traditionnelle et moderne existent.

##### I.4.1 Solutions traditionnelles :

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

##### a. Surdimensionnement ou déclassement de l'installation électrique.

L'objectif n'est pas d'éliminer les courants harmoniques circulant dans l'installation électrique, mais plutôt de «faire avec », en évitant leurs conséquences. Au moment de la conception d'une installation nouvelle, l'idée consiste à surdimensionnement tous les

éléments de l'installation susceptibles de véhiculer des courants harmoniques, à savoir les transformateurs, les câbles, les disjoncteurs, les groupes électrogènes et les tableaux de distribution. La solution la plus largement utilisée est le surdimensionnement du conducteur neutre. La conséquence est un accroissement important du coût de l'installation. Dans des installations existantes, la solution la plus répandue consiste à déclasser les équipements de distribution électrique soumis aux courants harmoniques. La conséquence est l'impossibilité de tirer profit du potentiel réel de l'installation [2].

#### **b. Transformateurs à couplage spécial :**

Il s'agit de limiter la circulation des courants harmoniques à une partie aussi petite que possible de l'installation à l'aide de transformateurs à couplage approprié. L'utilisation d'un transformateur d'isolement, de rapport 1/1 à couplage triangle-étoile ou triangle zigzag, empêche la propagation des courants harmoniques de rang 3 et leurs multiples circulant dans le neutre, ce procédé n'a aucun effet sur les autres rangs harmoniques [1].

#### **c. Inductances (selfs) série :**

Cette solution est utilisée pour les entraînements à vitesse réglable (variateurs de vitesse) et les redresseurs triphasés, elle consiste à introduire une inductance série en amont d'une charge non linéaire. La self a cependant une efficacité limitée. Il faut en installer une par charge non linéaire. La distorsion en courant est divisée approximativement par deux [2].

#### **d. Filtre passif accordé :**

Le principe est de « piéger » les courants harmoniques dans des circuits  $LC$ , accordés sur les rangs d'harmoniques à filtrer. Un filtre comprend donc une série de « gradins » qui correspondent tous à un rang d'harmonique. Les rangs 5 et 7 sont les plus couramment filtrés. On peut installer un filtre pour une charge ou pour un ensemble de charges. Sa conception nécessite une étude approfondie du réseau électrique et un travail de conception de bureau d'étude. Le dimensionnement dépend du spectre harmonique de la charge et de l'impédance de la source d'énergie. Il convient également de coordonner ses caractéristiques avec les besoins en puissance réactive des charges ; enfin, il est souvent difficile de concevoir les filtres de manière à éviter un facteur de puissance avance (capacitif) pour certaines conditions de charge [14][2].

### e. Filtre passif série :

Le principe est le même que le précédent, mais au lieu de piéger les harmoniques, on les empêche de remonter à la source. Un exemple de filtre passif série est le circuit bouchon [15][2].

#### I.4.1.1 Compensation de la puissance réactive :

La puissance réactive est majoritairement consommée par les moteurs asynchrones et par des dispositifs à base d'électronique de puissance. Différentes méthodes de compensation sont utilisées pour relever le facteur de puissance, la plus simple consiste à placer des batteries de condensateurs en parallèle avec le réseau. L'inconvénient de cette méthode réside dans le fait que la puissance réactive fournie par les condensateurs est constante et qu'elle ne s'adapte pas à l'évolution du besoin.

#### I.4.2 Les Solutions modernes :

Pour fournir aux consommateurs une bonne qualité de l'énergie électrique, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, les filtres actifs et les redresseurs MLI sont proposés comme des solutions avancées de dépollution des réseaux électriques.

En effet, ces solutions peuvent s'adapter aux évolutions de la charge et du réseau électrique et ceci sans toucher aux installations du fournisseur d'énergie et du consommateur.

##### I.4.2.1 Filtre actif parallèle :

Le filtre actif parallèle (Voire figure I.7) est composé d'un onduleur connecté au réseau par l'intermédiaire d'un filtre passif  $LR$ . Il se connecte en parallèle avec le réseau triphasé et injecte en temps réel les composantes harmoniques des courants absorbés par les charges non linéaires connectées au réseau. Ainsi, le courant fourni par la source d'énergie devient sinusoïdal. Ces filtres actifs shunt présentent des avantages et des inconvénients par rapport aux filtres passifs [16][2].

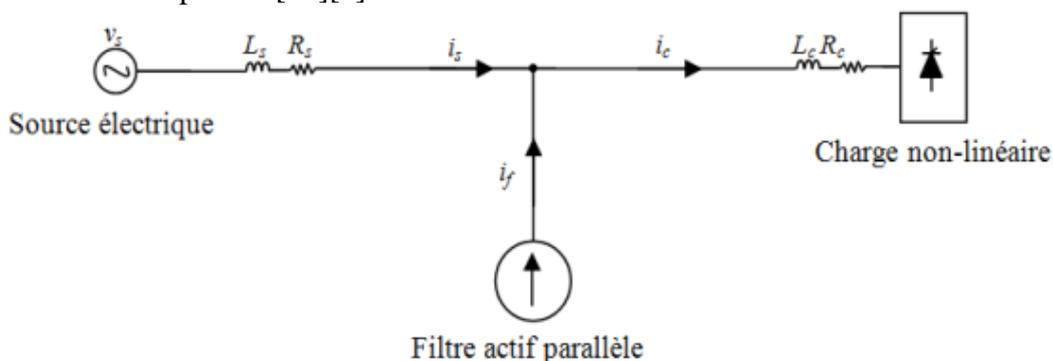


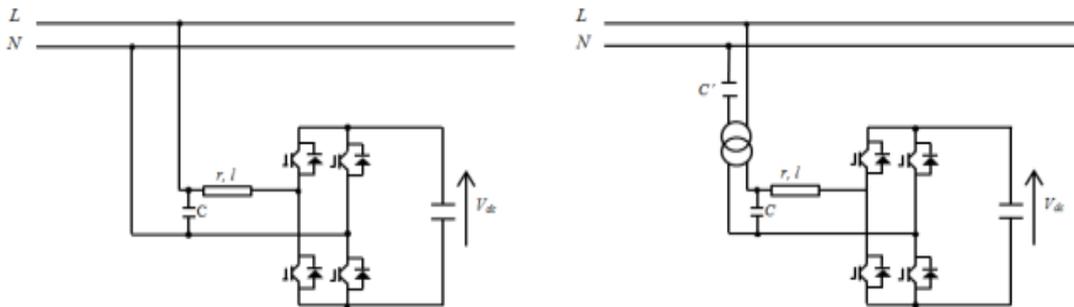
Figure I.7 - Principe du filtrage actif parallèle.

On peut distinguer trois configurations du filtre actif parallèle à structure tension.

**a. Filtre monophasé :**

Deux différentes configurations du filtre actif parallèle monophasé sont présentées par la figure 1.8

Dans la première configuration (figure 1.8.a), le filtre est principalement composé d'un onduleur monophasé, d'une capacité qui sert comme source de tension continue, et d'une inductance liant l'onduleur avec le réseau (source du courant). Dans la deuxième configuration (figure 1.8.b), on ajoute un transformateur et une capacité  $C'$ . Le primaire du transformateur est alimenté par l'onduleur, le secondaire est connecté en série avec  $C'$ , ainsi cette capacité avec le secondaire forment un filtre passif du courant de la charge [2].



(a) FAP monophasé

(b) F hybride monophasé

Figure 1.8- D'efférentes configurations d'un filtre actif monophasé.

**b. Filtre actif parallèle à trois fils :**

Il est composé d'un onduleur à trois bras qui ce connecte en parallèle avec le réseau triphasé par l'intermédiaire d'une inductance de couplage. Il injecte en temps réel les composantes harmoniques des courants absorbés par les charges non linéaires connectées au réseau. Ainsi, le courant fourni par la source d'énergie devient sinusoïdal [10][2].

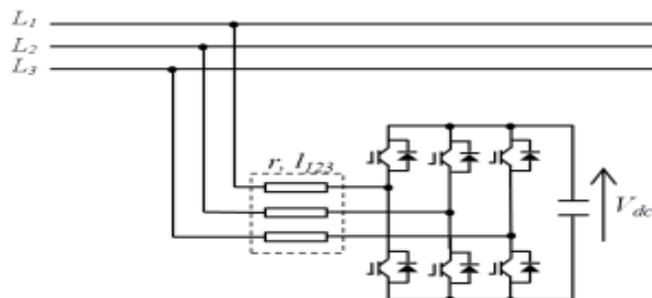


Figure I.9 - Configuration d'un FAP à trois fils.

**c. Filtre actif parallèle à quatre fils :**

Un grand nombre de charges monophasées peuvent être alimentées à partir d'un système triphasé avec le neutre. Elles peuvent causer un courant harmonique excessif dans le neutre, une surcharge due à la consommation de puissance réactive et un déséquilibre. Pour réduire ces problèmes, des compensateurs à quatre fils ont été développés dans les références [17][2]. Les topologies de ce type de filtre seront détaillées dans le chapitre suivant.

**d. Filtrage hybride :**

Afin de réduire le dimensionnement et par conséquent le prix des filtres actifs, l'association de filtres actifs de faible puissance à des filtres passifs peut être une solution. Dans ce cas, les filtres passifs ont pour rôle d'éliminer les harmoniques prépondérants permettant de réduire le dimensionnement des filtres actifs qui ne compensent que le reste des perturbations.

Plusieurs configurations ont été présentées dans la littérature [1], les plus étudiées étant:

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

## I.5 Comparaison entre les filtres passifs et les filtres actifs :

Le tableau suivant donne une comparaison entre les filtres actifs et les filtres passifs selon plusieurs critères.

Tableau I.3 - Caractéristiques des filtres actifs et passifs.

Critère de comparaison	Filtre passif	Filtre actif d'harmoniques
<b>Action sur les courants harmoniques</b>	- Nécessite un filtre pour chaque fréquence - pas d'adaptabilité - risque de résonance	- Agit simultanément sur plusieurs fréquences - Adaptabilité - amélioration de la forme de la tension pas toujours évidente
<b>Influence de la variation de fréquence</b>	- Efficacité réduite	- Aucune conséquence
<b>Influence de la modification de l'impédance</b>	- Risqué de résonance	- Aucune conséquence
<b>Influence de l'augmentation de courant</b>	- Risque de surcharge et de détérioration	- Aucun risque de surcharge, mais efficacité diminué
<b>Augmentation de la charge</b>	- Nécessite des modifications sur le filtre, dans certains cas	- Aucun problème si : $I_f < I_h$
<b>Action sur les harmoniques</b>	- Suivant leurs ordres	- possible, grâce au paramétrage
<b>Modification de la fréquence fondamentale</b>	- Modification impossible	- Possible, grâce à la reconfiguration
<b>Encombrement</b>	- Important	- Faible
<b>Poids</b>	- Important	- Faible
<b>Performance</b>	- Pauvre	- Bonne
<b>Fiabilité</b>	- Pauvre	- Pauvre
<b>Coût</b>	- Réduit	- Elevé
<b>Pertes</b>	- Réduites	- Elevées

## **I.6 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes origines des perturbations affectant les réseaux électriques et les solutions de dépollution existantes.

Ces perturbations étant néfastes pour les installations électriques à cause des dysfonctionnements éventuels qu'ils peuvent engendrer. Par conséquent, leur compensation est amplement souhaitée pour des raisons technico-économiques. Nous avons s'intéressé dans la suite aux solutions modernes tel que le filtre actif parallèle à quatre fil qui sera l'objet de ce mémoire.

# **CHAPITRE II**

## **Structure et Commande du Filtre Actif Parallèle**

## II.1. Introduction :

Dans ce chapitre nous allons présenter deux topologies différentes des filtres actifs, qui constitué de plusieurs parties et les plus grandes de ce filtres sont: **partie de puissance** et **partie de commande**. Cela pour compenser les harmoniques de courant générés par les charges non-linéaires reliées à un réseau électrique à quatre fils notamment ses avantages. tel que l'adaptation aux variation de la charge. Cela permettra d'envisager le cas des charges monophasées et éventuellement déséquilibrées. Une description des défférents constituants du filtre actif parallèle est nécessaire. Nous étudions en détail la méthode des puissances réelle, imaginaire et homopolaire instantanées [1].

## II.2. Constituants d'un filtre actif parallèle à quatre fils :

Un filtre actif parallèle à quatre fils est constitue de plusieurs parties. La figure II.1 présente le schéma global de ce filtre connecte en parallèle avec le réseau électrique alimentant une charge triphasée à quatre fils. Le deux grande parties de ce filtre sont:

- Partie puissance,
- Partie commande.

Ces deux parties vont être détaillées dans les deux sections qui suivent :

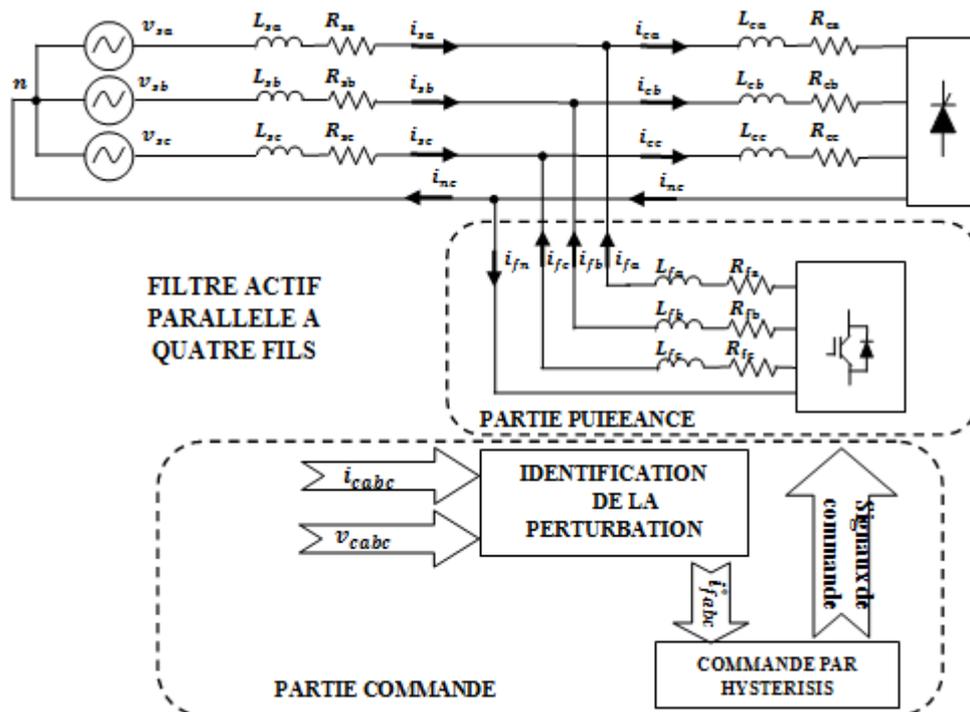


Figure II.1 - Schéma global du FAP à quatre fils connecté au réseau.

### II.3. Étude de la partie puissance :

Dans cette section nous sommes intéressés à la partie puissance du FAP dont les composants sont les suivants :

- L'onduleur à quatre fils,
- Le filtre de couplage,
- Le système de stockage de l'énergie.

#### II.3.1. Description d'un onduleur triphasé à trois bras avec condensateur à point milieu :

La première topologie de filtre actif est constituée de six interrupteurs réversibles en courant commandés à la fermeture et à l'ouverture (transistors bipolaires, IGBT, thyristors ou GTO) en antiparallèle avec une diode. Ils forment les trois bras d'un onduleur triphasé. Un quatrième bras est constitué de deux condensateurs dont le point milieu est relié au neutre du réseau électrique, comme l'illustre la figure II.2 [25][1].

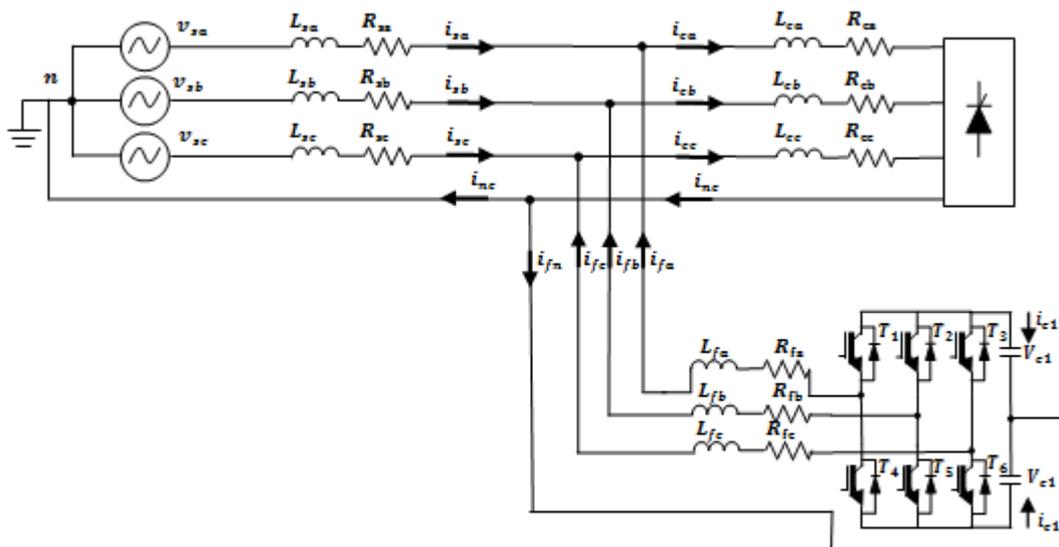


Figure II.2 - Filtre actif parallèle à trois bras avec condensateurs à point milieu.

Le états de commutation pour ce type d'onduleur sont présentés dans le tableau (II.1):

Tableau( II.1): Tensions générées par l'onduleur de tension à trois bras avec condensateur à point milieu.

<b>k</b>	<b>T<sub>3</sub></b>	<b>T<sub>2</sub></b>	<b>T<sub>1</sub></b>	<b>V<sub>f2</sub></b>	<b>V<sub>f2</sub></b>	<b>V<sub>f1</sub></b>
<b>0</b>	0	0	0	$-V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$
<b>1</b>	0	0	1	$-V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$
<b>2</b>	0	1	0	$-V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$
<b>3</b>	0	1	1	$-V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$
<b>4</b>	1	0	0	$V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$
<b>5</b>	1	0	1	$V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$
<b>6</b>	1	1	0	$V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$
<b>7</b>	1	1	1	$V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$

Cette topologie contient huit combinaisons de commande possibles. Ces états de commutations sont obtenus en utilisant les expressions suivantes [13][1] :

$$V_{f1} = T_1 \frac{V_{dc}}{2} - \frac{(1-T_1)V_{dc}}{2} \quad (II.1)$$

$$V_{f2} = T_2 \frac{V_{dc}}{2} - \frac{(1-T_2)V_{dc}}{2} \quad (II.2)$$

$$V_{f3} = T_3 \frac{V_{dc}}{2} - \frac{(1-T_3)V_{dc}}{2} \quad (II.3)$$

Avec :

T<sub>i</sub> = 1 si T<sub>i</sub> est fermé.

T<sub>i</sub> = 0 si T<sub>i</sub> est ouvert.

i = 1 à 3.

### II.3.2. Description d'un onduleur triphasé à quatre bras :

Dans cette topologie, l'onduleur comporte quatre bras constitués de huit interrupteurs, comme l'illustre la figure II.3. Cette configuration a été proposée afin d'éviter le recours à un élément de stockage à point milieu comme celle de la configuration précédente, et aussi le quatrième bras est utilisé pour stabiliser et contrôler le courant du neutre du filtre actif [16][5][2]. Les états de commutation pour ce type d'onduleur sont présentés dans le tableau II.2. Ils sont obtenus grâce aux expressions suivantes :

$$V_{f1} = (T_1 - T_4) V_{dc} \quad (II.4)$$

$$V_{f2} = (T_2 - T_4) V_{dc} \quad (II.5)$$

$$V_{f3} = (T_3 - T_4) V_{dc} \quad (II.6)$$

$$i_{dc} = T_1 i_1 + T_2 i_2 + T_3 i_3 - T_4 i_4 \quad (II.7)$$

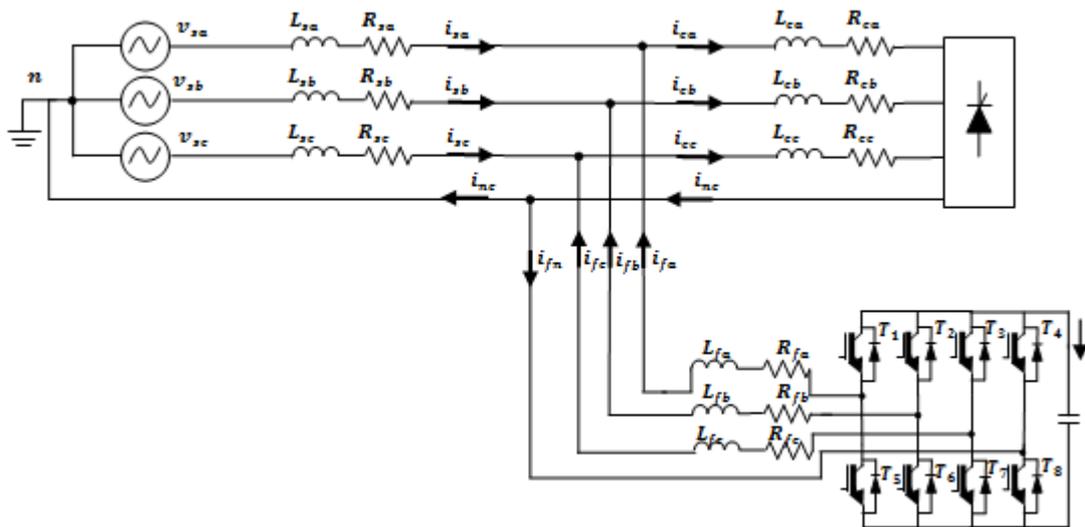


Figure II.3 - Filtre actif parallèle à quatre bras pour un réseau triphasé à quatre fils.

Tableau (II.2): Tensions générées par l'onduleur de tension à quatre bras.

<b>k</b>	$T_4$	$T_3$	$T_2$	$T_1$	$V_{f3}$	$V_{f2}$	$V_{f1}$
<b>0</b>	0	0	0	0	0	0	0
<b>1</b>	0	0	0	1	0	0	$V_{dc}$
<b>2</b>	0	0	1	0	0	$V_{dc}$	0
<b>3</b>	0	0	1	1	0	$V_{dc}$	$V_{dc}$
<b>4</b>	0	1	0	0	$V_{dc}$	0	0
<b>5</b>	0	1	0	1	$V_{dc}$	0	$V_{dc}$
<b>6</b>	0	1	1	0	$V_{dc}$	$V_{dc}$	0
<b>7</b>	0	1	1	1	$V_{dc}$	$V_{dc}$	$V_{dc}$
<b>8</b>	1	0	0	0	$-V_{dc}$	$-V_{dc}$	$-V_{dc}$
<b>9</b>	1	0	0	1	$-V_{dc}$	$-V_{dc}$	0
<b>10</b>	1	0	1	0	$-V_{dc}$	0	$-V_{dc}$
<b>11</b>	1	0	1	1	$-V_{dc}$	0	0
<b>12</b>	1	1	0	0	0	$-V_{dc}$	$-V_{dc}$
<b>13</b>	1	1	0	1	0	$-V_{dc}$	0
<b>14</b>	1	1	1	0	0	0	$-V_{dc}$
<b>15</b>	1	1	1	1	0	0	0

Ces deux premières topologies seront utilisées dans ce mémoire.

Deux autres configurations du FAP à quatre fils sont présentées par la figure II.4.a et II.4.b.

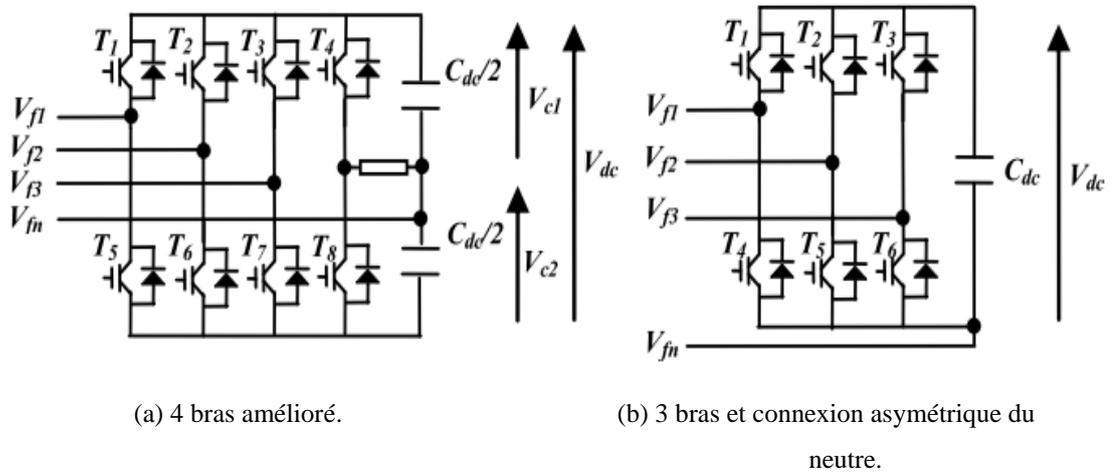


Figure II.4 - Autres topologies de l'onduleur à quatre fils.

### II.3.3. Filtre de couplage :

Le filtre entre l'onduleur et le réseau est appelé filtre de couplage, c'est un filtre passif de premier ordre qui est en réalité une simple inductance avec une résistance interne mais avec des spécificités au niveau de son circuit magnétique (introduction de noyaux en ferrites). Il a deux objectifs, le premier est de générer des courants harmoniques à partir de la différence des tensions entre la sortie du pont onduleur et le réseau [2]. A ce titre, l'inductance  $L_f$  intervient dans la commandabilité du courant du filtre. Le deuxième est de réduire au point de raccordement au réseau (PCC), l'amplitude des crêteaux de tension générés. Ce filtre passif est dimensionné pour satisfaire les deux critères suivants :

- Assurer la dynamique du courant du filtre défini par :

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{di_h}{dt} \quad (\text{II.8})$$

Où  $i_f$ : Courant du filtre

$i_h$  : Courant harmonique de la charge

- Empêcher les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau électrique [21][2].

Une petite valeur de l'inductance du filtre passif assure la dynamique du courant. Contrairement, une valeur relativement grande de celle-là empêche les composantes dues aux

commutations de se propager sur le réseau. Une étude comparative entre 5 approches qui permettent de trouver la valeur de  $L_f$  est faite dans [2].

Dans ce qui suit on présente deux approches qui permettent de déterminer  $L_f$ . En négligeant la résistance de ce filtre de couplage on obtient :

$$\left(\frac{di_f}{dt}\right)_{max} = \frac{V_{fmax} - V_{smax}}{L_f} \quad (\text{II.9})$$

$V_{fmax}$  : La valeur maximale de la tension à l'entrée de l'onduleur

$V_{smax}$  : La valeur maximale de la tension simple au point de raccordement du filtre.

Pour des petites variations du courant du filtre, on obtient :

$$\frac{\Delta i_f}{\Delta T} = \frac{V_{fmax} - V_{smax}}{L_f} \quad (\text{II.10})$$

$\Delta T = \frac{1}{f_{ond}}$  : La période de variation du courant du filtre. En supposant la variation maximale du courant du filtre égale à 25 % de la valeur maximale du courant du réseau, la valeur de l'inductance de couplage est donnée par [18][2] :

$$L_f = \frac{V_{fmax} - V_{smax}}{0.25 i_{smax} f_{ond}} \quad (\text{II.11})$$

Le dimensionnement de  $L_f$  peut être réalisé avec la contrainte que pour une fréquence de commutation donnée, la pente du courant  $i_f$  est plus petite que celle d'une porteuse triangulaire définissant cette fréquence de commutation. La pente de la porteuse triangulaire est définie par :

$$\alpha = 4 \cdot \epsilon \cdot f_c \quad (\text{II.12})$$

Telle que :  $\epsilon$  est l'amplitude de l'onde triangulaire,  $f_c$  est la fréquence de commutation des interrupteurs du filtre actif. La pente maximale de  $i_f$  dans le cas d'un filtre actif à point milieu est donnée par :

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{0.5 V_{dc} + V_{sm}}{L_f} \quad (\text{II.13})$$

D'où une valeur de  $L_f$  estimée à [22] [23][2] :

$$L_f = \frac{0.5 V_{dc} + V_{sm}}{4 \cdot \epsilon \cdot f_c} \quad (\text{II.14})$$

### II.3.4. Système de stockage d'énergie :

Le stockage de l'énergie du côté continu se fait souvent par un système de stockage capacitif représenté par un ou deux condensateurs qui jouent le rôle de sources de tension continue. Dans les applications de compensation d'harmoniques, une tension  $V_{dc}$  élevée améliore la dynamique du filtre actif, par ailleurs, le critère commun pour le choix de la capacité  $C_{dc}$  est en générale la limitation des ondulations de la tension continue. Ces ondulations sont d'autant plus élevées que les harmoniques à compenser sont de basses fréquences et d'amplitudes importante ou la capacité est faible. Un dimensionnement adéquat de la capacité peut-être établi à partir d'un courant type que doit générer le filtre actif, ceci n'est pas toujours facile à réaliser car on ne connaît pas souvent tous les harmoniques qu'on doit compenser, ainsi une méthode plus simple pour le dimensionnement consiste à calculer la capacité à partir du courant harmonique du rang le plus faible  $I_h$  [25][1].

$$C_{dc} = \frac{I_h}{\tau V_{dc} \omega_h} \quad (\text{II.15})$$

Avec  $\tau$  le taux d'ondulation admissible généralement 5% de  $V_{dc}$  et  $\omega_h$  la pulsation du rang  $h$ .

## II.4. Étude de la partie commande :

### II.4.1. Détermination des courants harmoniques de référence :

La charge polluante absorbe un courant constitué d'une composante fondamentale et de composantes harmoniques. Le but du filtrage actif est la génération de courants harmoniques de même amplitude mais en opposition de phase avec ceux absorbés par la charge. Ainsi, le courant absorbé au réseau sera sinusoïdal. Il est ce nécessaire d'identifier avec précision les courants harmoniques de la charge polluante.

Le choix de la méthode utilisée pour isoler la composante harmonique du courant de charge est un facteur déterminant quant aux performances obtenues par le filtre actif (précision, dynamique, ...) [1]. Parmi toutes les méthodes présentées dans la littérature, Dans ce mémoire nous avons étudié la méthode de puissances instantanées.

#### II.4.1.1. Présentation de la méthode de puissances instantanées pour un filtre à quatre fils :

Cette méthode introduite par [24], exploite la transformation de Concordia des tensions simples et des courants de ligne, afin de calculer les puissances réelle, imaginaire et homopolaire instantanées. Elle permet de transformer la composante fondamentale en une composante continue et les composantes harmoniques en composantes alternatives. Cette

transformation est nécessaire si on veut éliminer facilement la composante continue. Le principe de cette méthode est énoncé ci-dessous.

Soient respectivement les tensions simples et les courants de ligne d'un système triphasé avec neutre,  $v_{sa}(t)$ ,  $v_{sb}(t)$ ,  $v_{sc}(t)$  et  $i_{sa}(t)$ ,  $i_{sb}(t)$ ,  $i_{sc}(t)$ . La transformation de Concordia permet de ramener ce système triphasé des axes  $abc$  aux axes  $\alpha\beta 0$ , comme le montre les deux relations suivantes :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sb} \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sb} \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

La transformation de Concordia est définie par :

$$C = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

Après isolation des composantes fondamentales en tension notées  $\bar{v}_{\alpha\beta 0}$  par un PLL, les puissances réelle, imaginaire et homopolaire instantanées sont données par la matrice suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ p_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{v}_\alpha & \bar{v}_\beta & 0 \\ -\bar{v}_\beta & \bar{v}_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & \bar{v}_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

Les puissances instantanées peuvent s'écrire de la façon suivante :

$$p = \bar{p} + \tilde{p} \quad (\text{II.20})$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q} \quad (\text{II.21})$$

$$p_0 = \bar{p}_0 + \tilde{p}_0 \quad (\text{II.22})$$

$\bar{p}$ ,  $\bar{q}$  et  $\bar{p}_0$ : Composantes continues des puissances instantanées.

$\tilde{p}$ ,  $\tilde{q}$  et  $\tilde{p}_0$ : Composantes alternatives des puissances instantanées.

A l'aide d'un filtre passe bas avec une boucle de retour ou d'un filtre passe haut, on peut éliminer de  $p$  et de  $q$  une (des) partie (s) selon les objectifs de la compensation montrés au tableau II.3 suivant.

Tableau (II.3): Les modes de compensation de la commande des puissances instantanées.

Paramètre à compenser	Paramètre de contrôle
Courant harmonique	$p = \tilde{p}$ et $q = \tilde{q}$
Énergie réactive	$p = 0$ et $q = \bar{q}$
Courant harmonique + énergie réactive	$p = \tilde{p}$ et $q = \bar{q}$

Pour la compensation du courant dans le neutre, le courant homopolaire  $i_0$  sera utilisé directement comme référence sans passer par le calcul de la puissance homopolaire et donc l'isolation de la composante fondamentale de la tension homopolaire pour le calcul de la puissance homopolaire n'est pas nécessaire dans cette variante de la méthode des PIRI.

L'objectif dans ce travail est de compenser les harmoniques de courant et l'énergie réactive. Après extraction de  $\tilde{p}$  par un FPB avec un boucle de retour, Les composantes du courant  $i_{f\alpha\beta}^*$  sont alors définies par :

$$\begin{bmatrix} i_{fa}^* \\ i_{f\beta}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{v}_\alpha & \bar{v}_\beta \\ -\bar{v}_\alpha & \bar{v}_\beta \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{II.23})$$

Donc :

$$\begin{bmatrix} i_{fa}^* \\ i_{f\beta}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{\bar{v}_\alpha^2 + \bar{v}_\beta^2} \begin{bmatrix} \bar{v}_\alpha & -\bar{v}_\beta \\ \bar{v}_\beta & \bar{v}_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

Soit :

$$i_{fa}^* = \frac{\bar{v}_\alpha}{(\bar{v}_\alpha^2 + \bar{v}_\beta^2)} \tilde{p} - \frac{\bar{v}_\beta}{(\bar{v}_\alpha^2 + \bar{v}_\beta^2)} q \quad (\text{II.25})$$

$$i_{f\beta}^* = \frac{\bar{v}_\beta}{(\bar{v}_\alpha^2 + \bar{v}_\beta^2)} \tilde{p} + \frac{\bar{v}_\alpha}{(\bar{v}_\alpha^2 + \bar{v}_\beta^2)} q \quad (\text{II.26})$$

$i_{fa}^*$  et  $i_{f\beta}^*$  sont les courants de référence dans le repère de Concordia. On remarque dans les expressions de ces derniers l'absence du courant homopolaire. On prend pour l'homopolaire :  $i_{f0}^* = i_0$

Maintenant, il est aisé de remonter aux courants de référence par la transformation inverse de Concordia [20] [2]. La figure II.5 illustre l'algorithme d'identification.

$$\begin{bmatrix} i_{fa}^* \\ i_{fb}^* \\ i_{fc}^* \end{bmatrix} = C^{-1} \begin{bmatrix} i_{fa}^* \\ i_{f\beta}^* \\ i_{f0}^* \end{bmatrix} \quad (\text{II.27})$$

$$C^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.28})$$

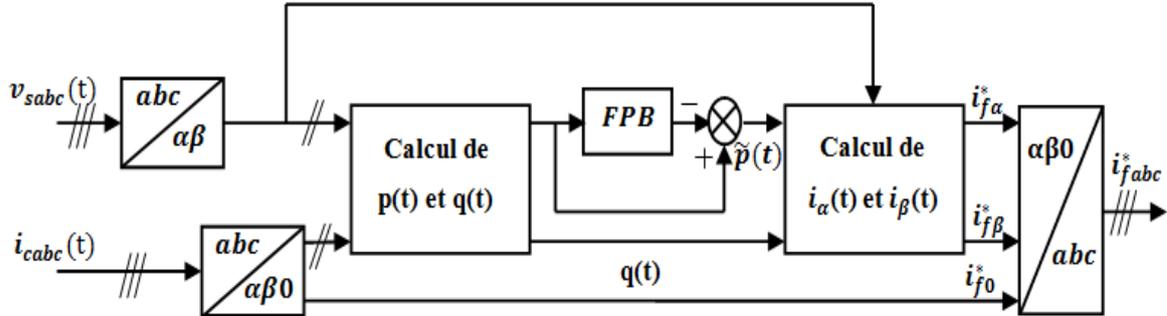


Figure II.5 - Identification par la méthode des puissances instantanées

#### II.4.2 Contrôle de l'onduleur par hystérésis :

Ils existent plusieurs méthodes de commande, les deux principales familles de commande sont :

- commande par hystérésis,
- la commande par modulation de largeur d'impulsions (MLI).

La commande conventionnelle par hystérésis, qui sera utilisée dans ce travail, est très couramment utilisée de par sa simplicité d'utilisation et sa robustesse. En fait, cette stratégie assure un contrôle satisfaisant du courant sans exiger une connaissance poussée du modèle du système à contrôler ou de ses paramètres.

La figure (II.6) expose son principe qui consiste à établir dans un premier temps le signal d'erreur, différence entre le courant de référence  $i_f^*$  et le courant produit par l'onduleur  $i_f$ .

Cette erreur est ensuite comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis afin de fixer les ordres de commande des interrupteurs. Cette commande présente cependant un inconvénient majeur : elle ne permet pas de contrôler la fréquence de commutation des semi-conducteurs, d'où la présence d'un nombre important d'harmoniques dans les courants générés [19][1].

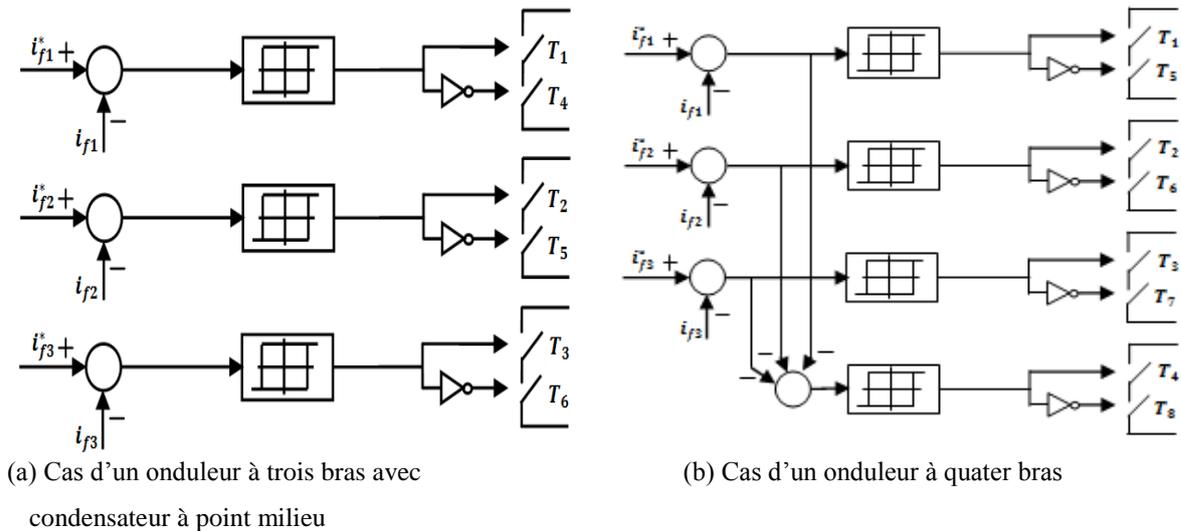


Figure II.6: Principe de la commande par hystérésis.

## II.5. Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre la définition et la structure de filtre actif parallèle à quatre fils, cette structure partagée à deux parties : la partie de puissance et la partie de commande-contrôle, la partie de puissance est représentée par l'onduleur de tension, système de stockage de l'énergie et filtre de sortie, et la deuxième partie qui est la commande-contrôle est représentée par la commande d'onduleur et l'identification des courants perturbés.

# CHAPITRE III

## Simulations et Interprétations des Résultats

### III.1. Introduction :

Un système d'électronique de puissance est un ensemble de conversion d'énergie contient les organes suivants :

- Source d'énergie.
- Convertisseur statique.
- Charge réceptrice.
- Dispositif de commande du convertisseur.

L'étude analytique de ce système est difficile et ne peut être menée, pour un point de fonctionnement donné, qu'avec des hypothèses simplificatrices importantes. C'est pour cette raison que la simulation numérique est devenue l'outil indispensable de l'étude de ces systèmes.

Dans ce chapitre on propose d'étudier la simulation de l'ensemble réseau, charges polluantes, redresseurs triphasés , filtre actif parallèle à trois ou quatre bras sous l'environnement Matlab-Simulink. On donne et on interprète ensuite les résultats de simulation obtenus.

### III.2. Schémas de simulation :

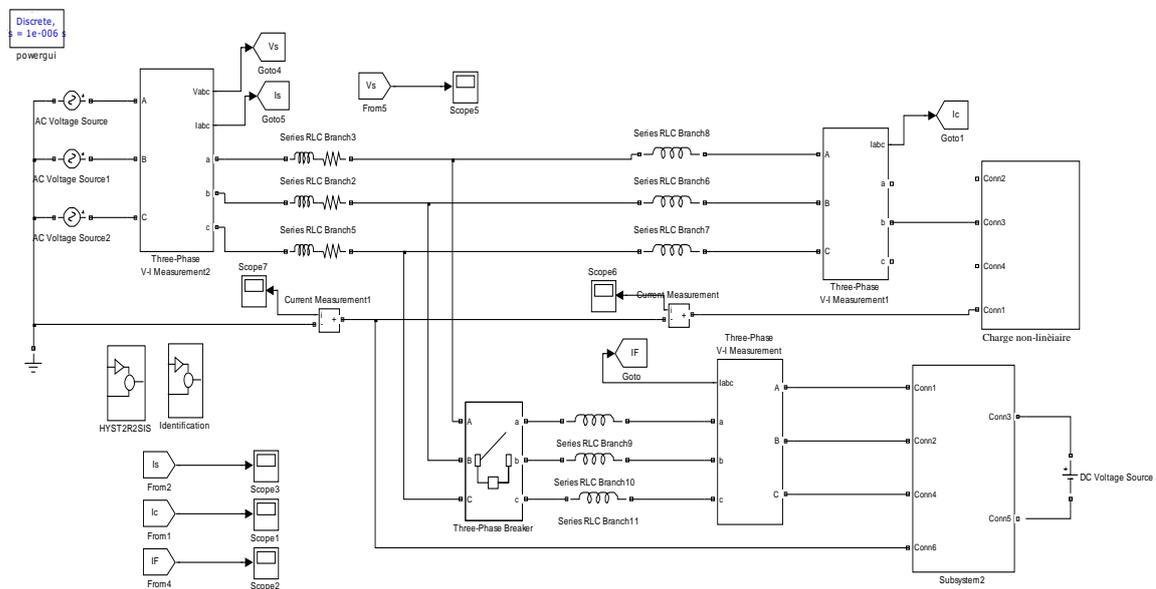


Figure III.1 – Schéma de FAP à quatre fils avec un onduleur à quatre bras sous Matlab- Simulink.

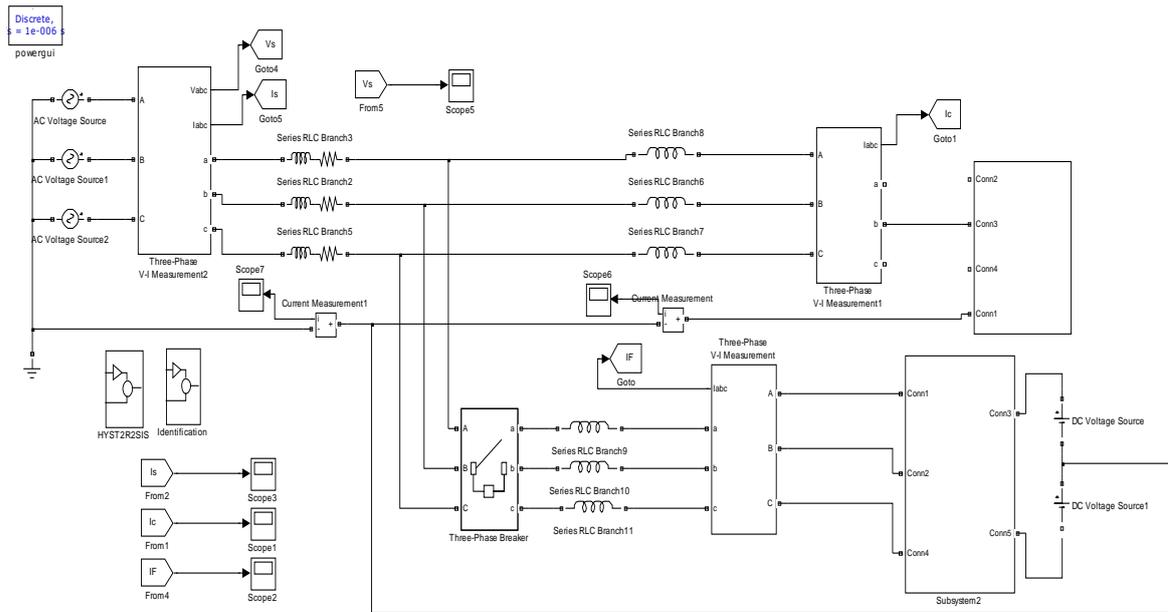


Figure III.2 – Schéma de FAP à quatre fils avec un onduleur à trois bras sous Matlab- Simulink.

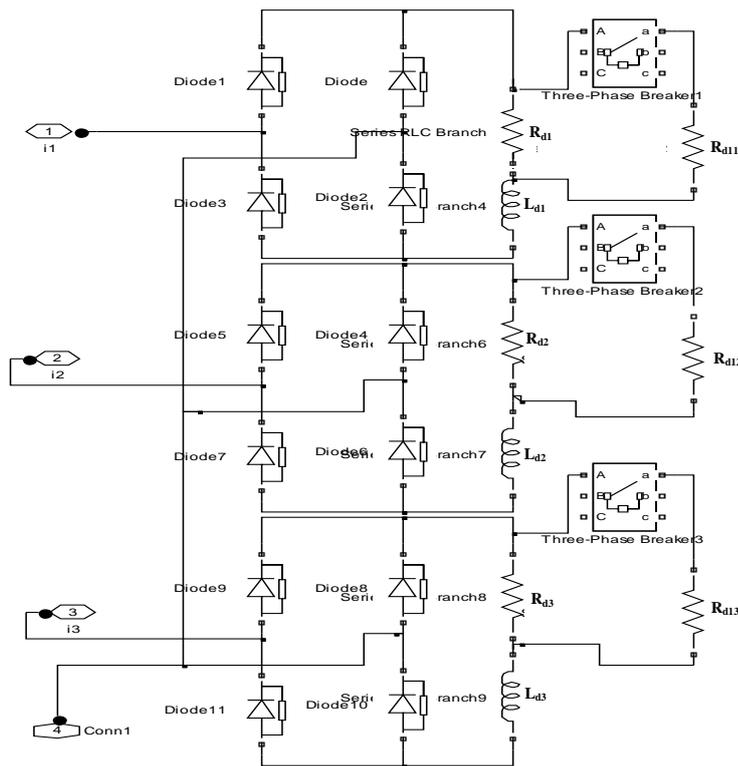


Figure III.3 – charges triphasées non linéaire sous Matlab- Simulink.

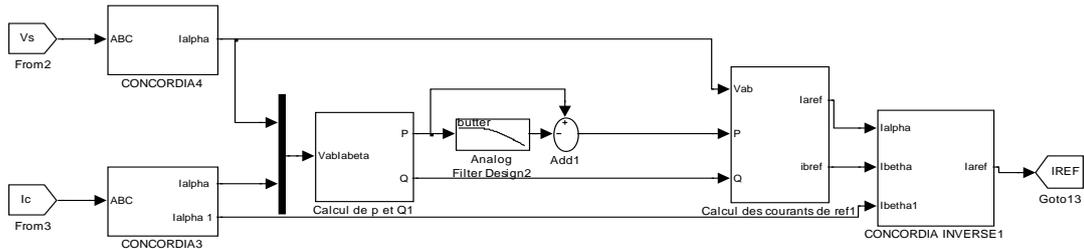


Figure III.4 – Identification par la méthode des puissances instantanées sous Matlab- Simulink.

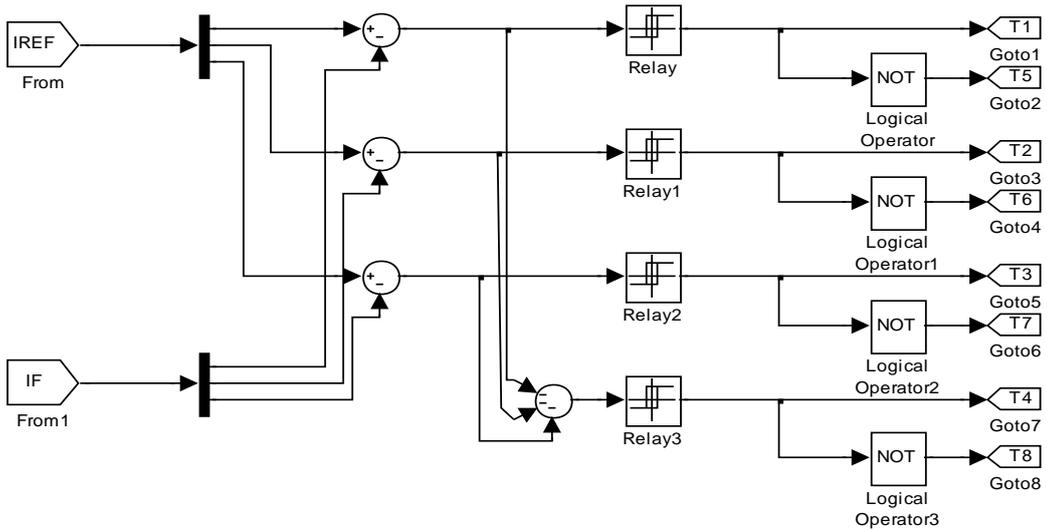


Figure III.5 – commande par hystérésis sous Matlab- Simulink.

III.2.6. Paramètres de la simulation

Pour simuler le modèle de l'association filtre actif-réseau-charge polluante de la figure(III.1) et figure(III.2) sous Matlab-Simulink, on a utilisé les paramètres suivants :

Tableau (III.1) : Paramètres du système étudié [2].

$E[V]$	$F[HZ]$	$L_s[mH]$	$R_s[\Omega]$	$L_c[mH]$	$L_f[mH]$	$V_{dc}[V]$
94	50	2.3	0.42	1	3	200

Pour les charges, nous étudions les deux cas suivants :

- Cas où les trois charges sont identiques :  $R_{d1}= R_{d2}= R_{d3}=12.5 \Omega$ ,  $R_{d11}= R_{d12}= R_{d13}=12.5 \Omega$ ,  
 $L_{d1}= L_{d2}=L_{d3}=200 \text{ mH}$ .
- Cas où les trois charges sont différentes :  $R_{d1}=12.5 \Omega$ ,  $R_{d2}=8 \Omega$ ,  $R_{d3}=17 \Omega$ ,  
 $R_{d11}=12.5 \Omega$ ,  $R_{d12}=12.5 \Omega$ ,  $R_{d13}=12.5 \Omega$ ,  
 $L_{d1}=200 \text{ mH}$ ,  $L_{d2}=250 \text{ mH}$ ,  $L_{d3}=220 \text{ mH}$ .

### III.2.7. Résultats des simulations sous Matlab-Simulink :

#### III.2.7.1. Cas de charge équilibrée :

Dans ce premier cas nous avons pris un système de charge équilibré qui utilisé pour deux filtres actif à (trois ou quatre bras), c'est la raison pour laquelle nous ne tracerons que la courbe du courant de source de la phase 1, ainsi que le spectre d'harmonique de cette phase, les deux autres phases ont la même courbe de courant et le même spectre d'harmonique que ceux de la première phase. Les résultats des simulations du système étudié sont présentés sur les figures suivantes :

##### III.2.7.1.1. Cas de charge équilibrée avec un onduleur triphasé à quatre bras :

###### a- Les courbes avant et après filtrage :

A l'instant ( $t=0.2$  s) on injecte le FAP.

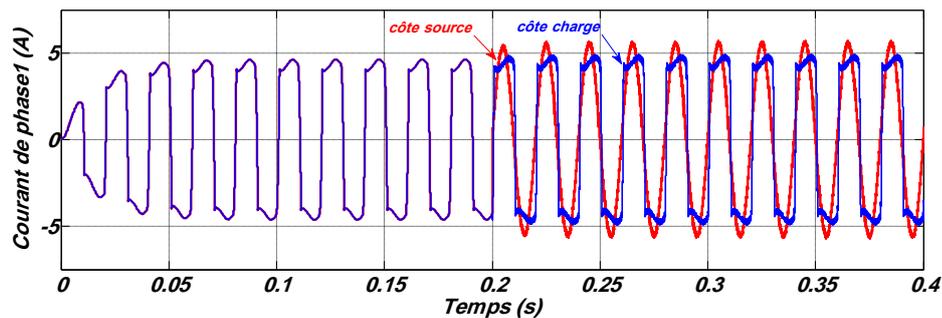


Figure III.6 - Courant de source et de charge avant et après filtrage.

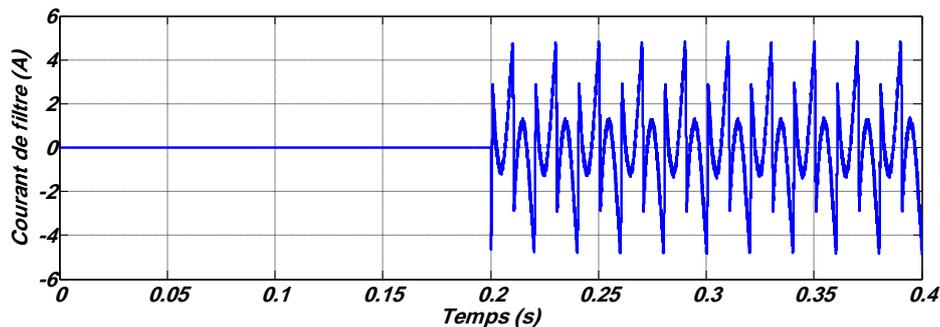


Figure III.7 - Courant de filtre avant et après filtrage.

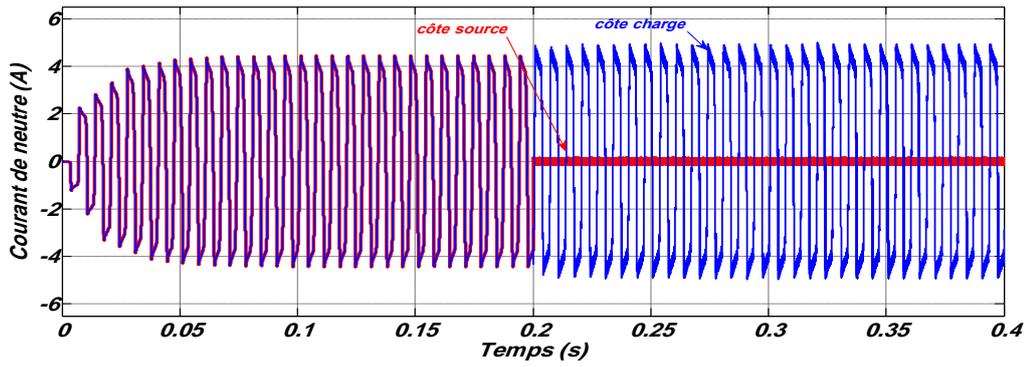


Figure III.8 - Courant de neutre côté source et côté charge avant et après filtrage.

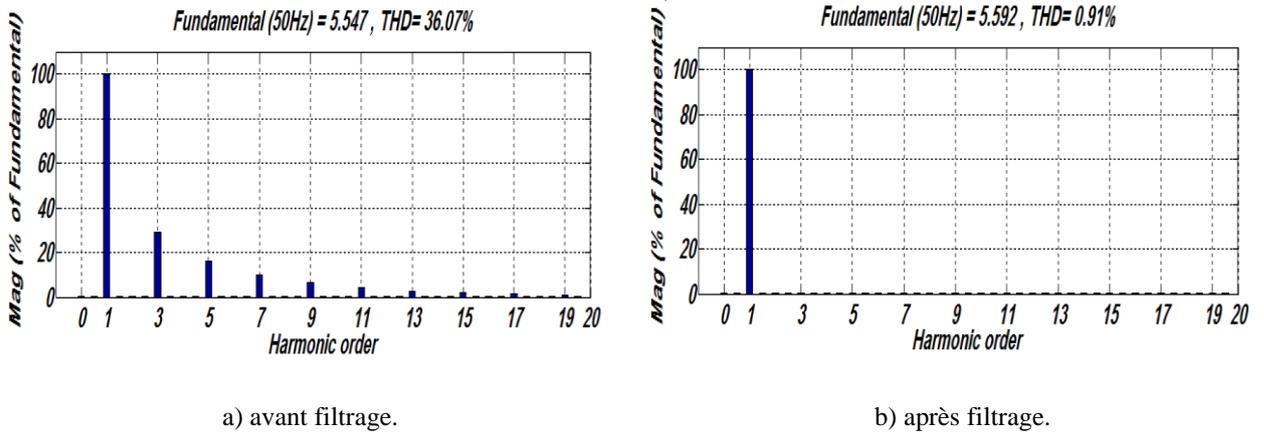


Figure III.9 - Spectre d'harmonique du courant de source.

**b- Les courbes avant et après l'augmentation de la charge :**

A l'instant (t=0.4 s) on augmente la charge.

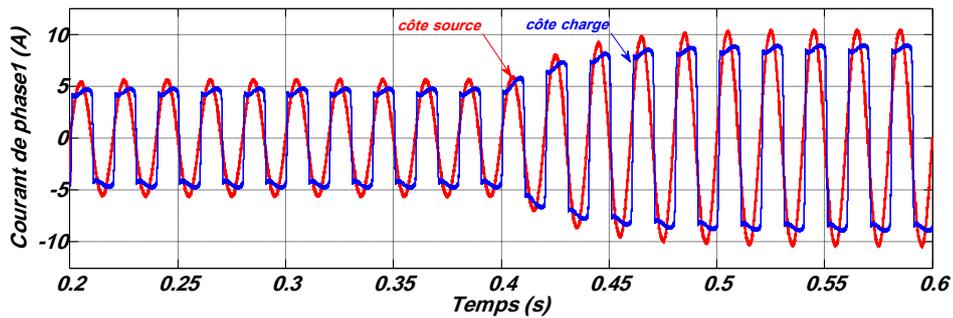


Figure III.10 - Courant de source et de charge avant et après l'augmentation de la charge .

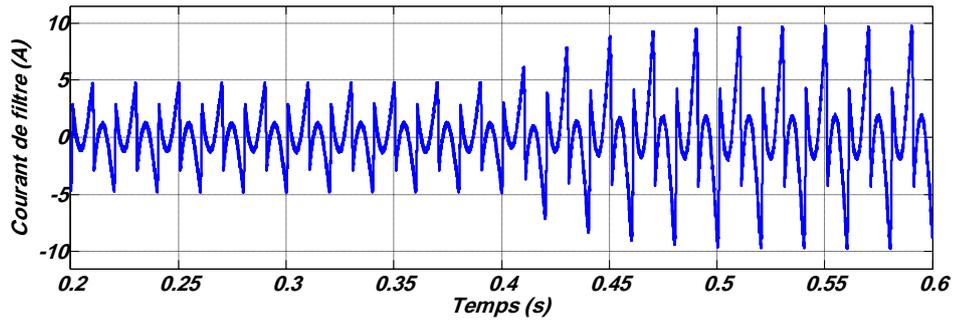


Figure III.11 - Courant de filtre avant et après l' augmentation de la charge.

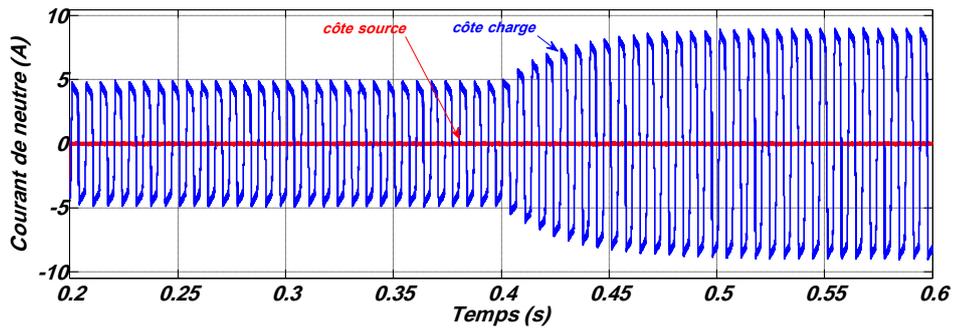
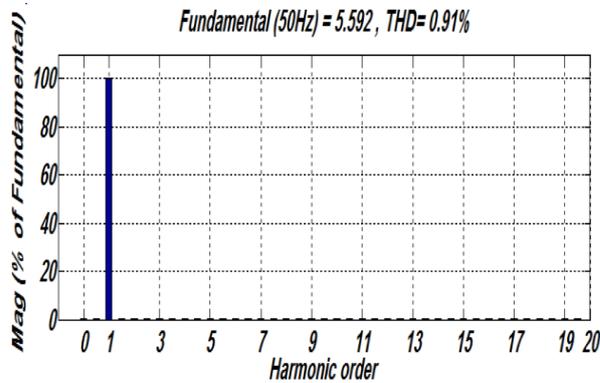
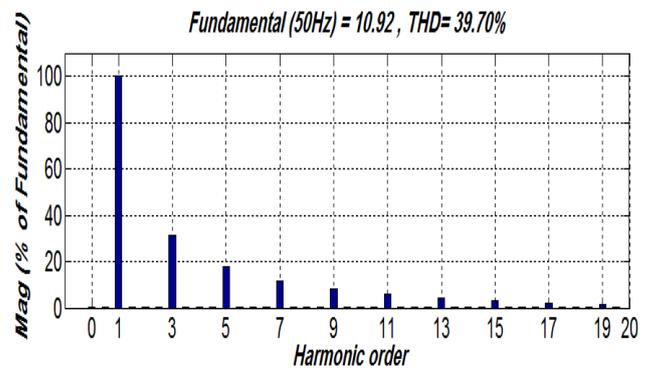


Figure III.12 - Courant de neutre côté source et côté charge avant et après l' augmentation de la charge.



a) côté source



b) côté charge

Figure III.13 - Spectre d'harmonique du courant après l' augmentation de la charge.

### III.2.7.1.2 Cas de charge équilibrée avec un onduleur triphasé à trois bras :

#### a- Les courbes avant et après filtrage :

A l'instant ( $t=0.2$  s) on injecte le courant de FAP.

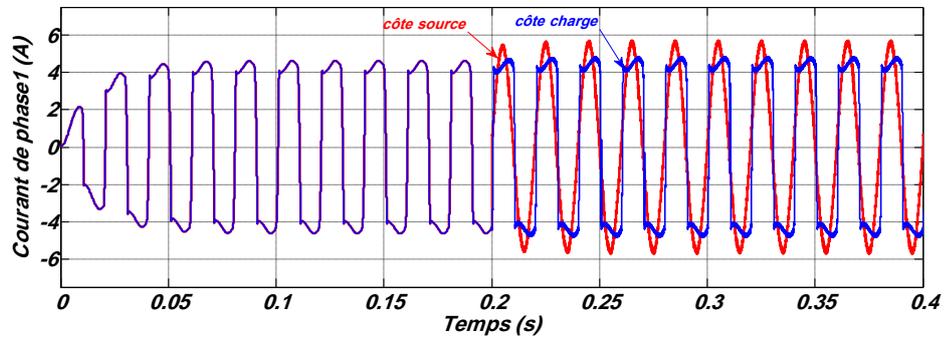


Figure III.14 - Courant de source et de charge avant et après filtrage.

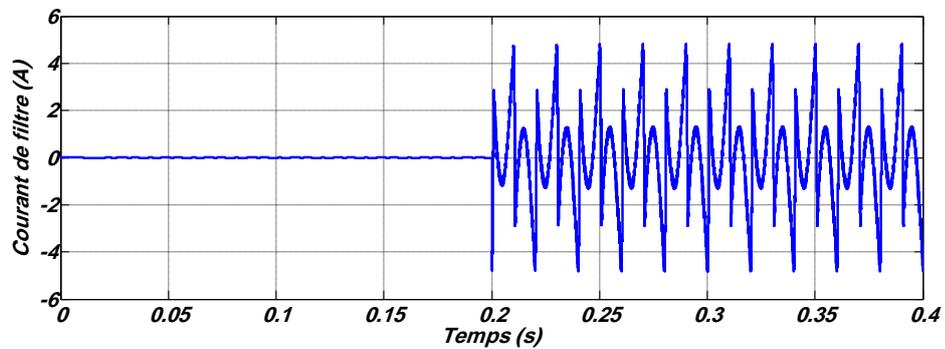


Figure III.15 - Courant de filtre avant et après filtrage.

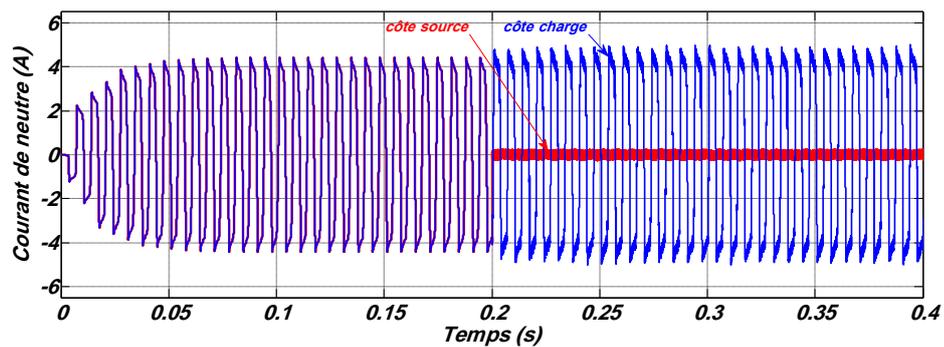
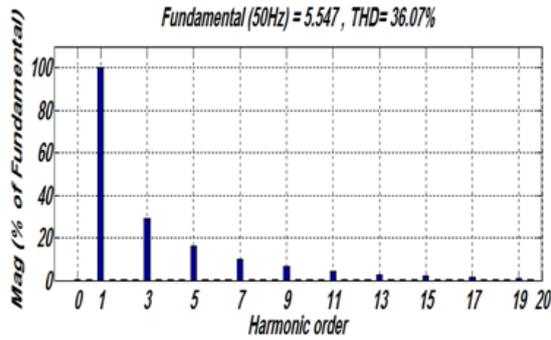
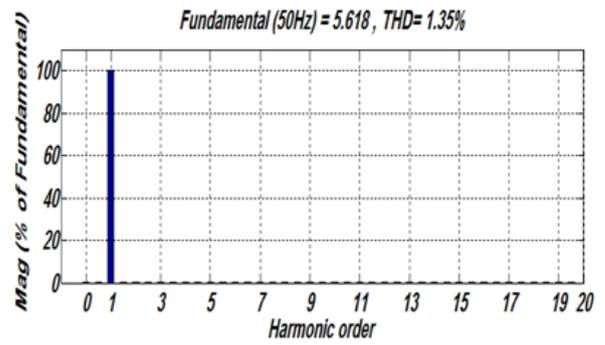


Figure III.16 - Courant de neutre avant et après filtrage.



a) avant filtrage



b) après filtrage

Figure III.17 - Spectre d'harmonique du courant de source.

**b- Les courbes avant et après l'augmentation de la charge :**

A l'instant (t=0.4 s) on a augmentée la charge.

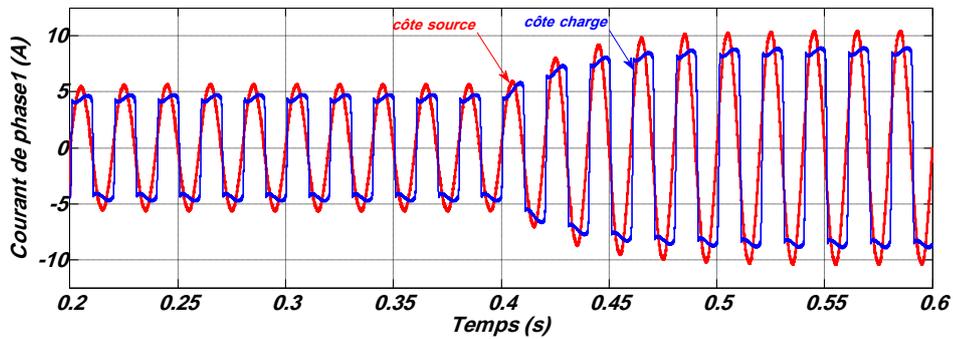


Figure III.18- Courant de source avant et après l'augmentation de la charge .

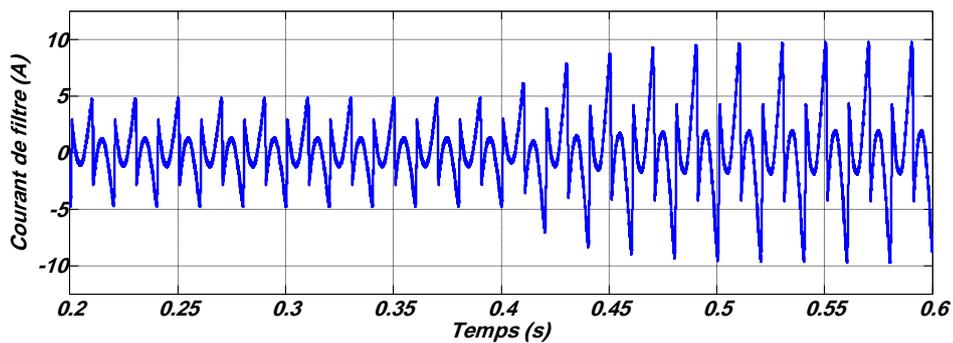


Figure III.19 - Courant de filtre et après l' augmentation de la charge.

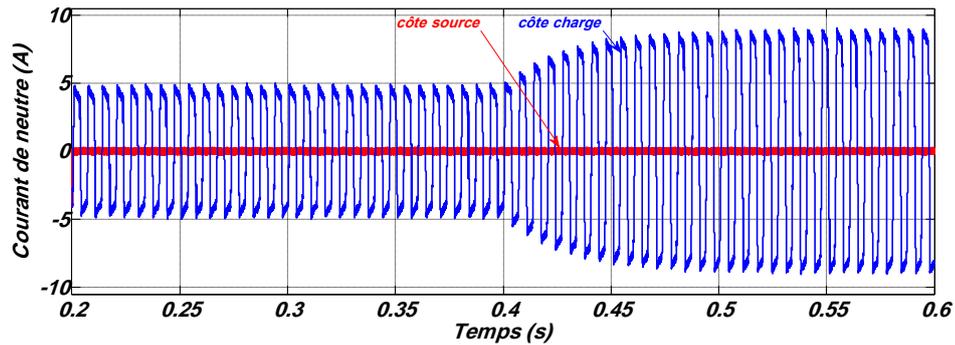
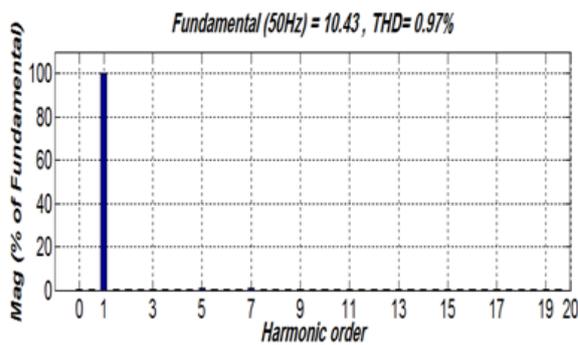
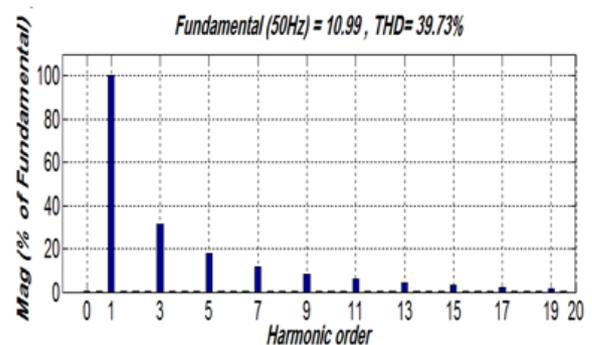


Figure III.20 - Courant de neutre avant et après l'augmentation de la charge.



a) côté source



b) côté charge

Figure III.21 - Spectre d'harmonique du courant après l'augmentation de la charge.

#### ❖ Commentaires :

Dans le cas d'une charge équilibrée avec un onduleur à quatre bras ou trois bras, la forme des courants pour les trois phases, aussi bien que les spectres d'harmoniques, sont identiques. Il suffit de tracer la forme du courant pour la phase 1 uniquement.

Les figures (III.6, III.14) Avant l'insertion du filtre (avant 0.2 s) : on observe le courant du côté charge et du côté source sont confondus et déformés et  $THD_i=36.07\%$  est très élevé et dépasse à 5 %, la limite maximale admissible par la norme IEEE qui est 5 % ( $THD_i$  montrés dans les figures III.9.a, III.17.a).

Après l'insertion du filtre ( 0.2 s à 0.4s) : le courant du côté charge est déformé, mais le côté source reste sinusoïdale et  $THD_i=0.91\%$  (4 bras) ,  $THD_i=1.35\%$  (3bras) sont inférieure à 5 %, (montré dans les figures III.9.b, III.17.b ).

Les figures (III.10 ,III.18) représentent l'étape de l'augmentation de la charge ( 0.4 s à 0.6s) dans les deux cas : on observe le courant de source et de charge sont augmentés , les courants des côtés sources sont sinusoïdale et  $THD_i=0.91\%$  (4 bras) ,  $THD_i=0.97\%$  (3bras) sont inférieure à 5 %, ( montré dans les figures III.13.a et III.21.a), mais dans les côtés charges sont déformés et  $THD_i=39.70\%$  sont très élevé ( montré dans les figures III.13.b et III.21.b).

Les figures III.7 et III.15 représentent les courants injectés par le filtre dans les deux cas on remarque : Avant l'insertion du filtre (avant 0.2 s) : le courant du filtre est nul, après l'insertion du filtre (après 0.2 s) : le filtre injecte les courants harmonique, mais dans les figures III.11 et III.19 sont l'augmentation de la charge parmi (0.4s,0.6s), on remarque les courants injectés par les filtres sont augmentées.

Les figures III.8 et III.16 montrent que les courants du neutre du côté source et de côté charge, on observe dans les deux cas : le courant du neutre du côté source et côté charge ne sont pas nul malgré que la charge est équilibrée dans l'intervalle (0s,0.2s) , mais après l'insertion du filtre ( 0.2 s,0.4s): on observe les courants du neutre du côté source sont nul et les courants de neutre du coté charge ne sont pas nul, dans l'intervalle (0.4s,0.6s) on observe les courants de neutre du coté charge sont augmentées.

Grâce à ces simulations, nous concluons que l'onduleur triphasé à quatre bras est relativement meilleur que l'un onduleur triphasé à trois bras.

### III.2.7.2. Cas de charge déséquilibrée :

Dans ce deuxième cas nous avons pris un système de charges déséquilibré par **le FAP avec un onduleur à quatre bras** , c'est la raison pour laquelle nous tracerons les courbes du courant côté source et côté charge de chaque phase, ainsi que les spectres des harmoniques de chaque phases, Les résultats de simulation du système étudié sont présentés sur les figures suivants :

On injecte le FAP à  $t=0s$

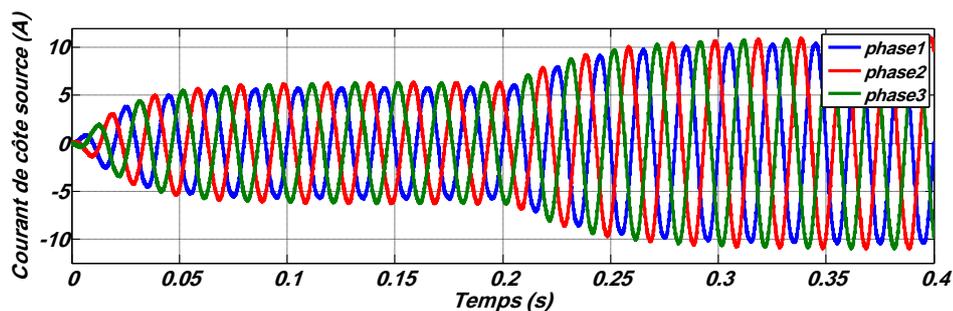


Figure III.22 - Courant de côté source .

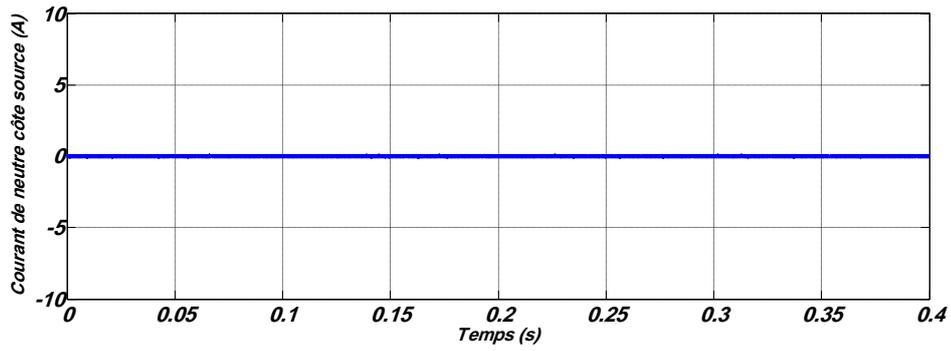
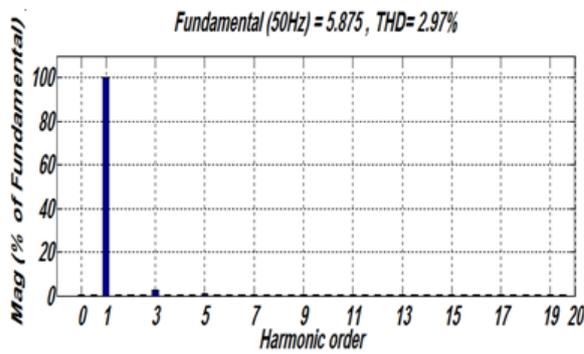
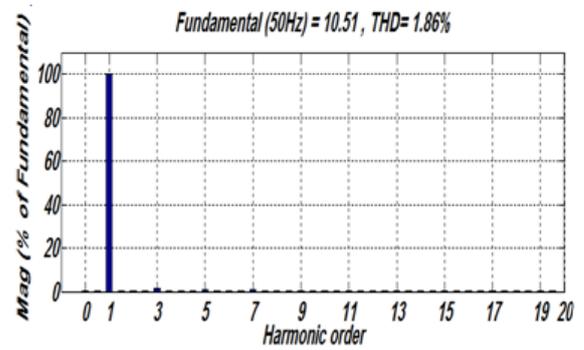


Figure III.23 - Courant de neutre.

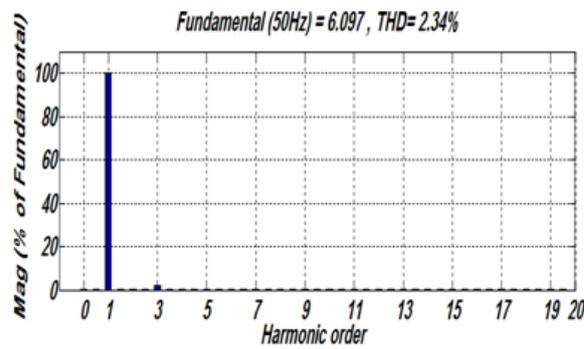


a) avant l' augmentation

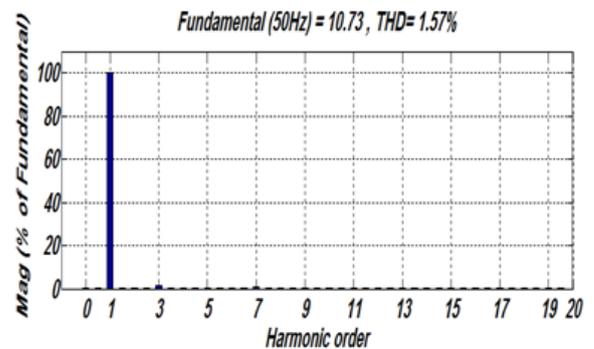


b) après l' augmentation

Figure III.24 - Spectre d'harmonique du courant de la phase 1.

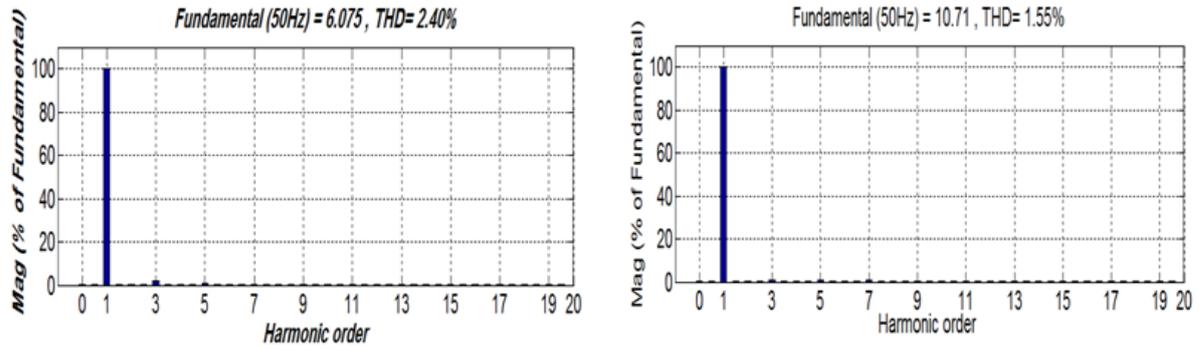


a) avant l' augmentation



b) après l' augmentation

Figure III.25 - Spectre d'harmonique du courant de la phase 2.



a) avant l' augmentation

b) après l' augmentation

Figure III.26 - Spectre d'harmonique du courant de la phase 3.

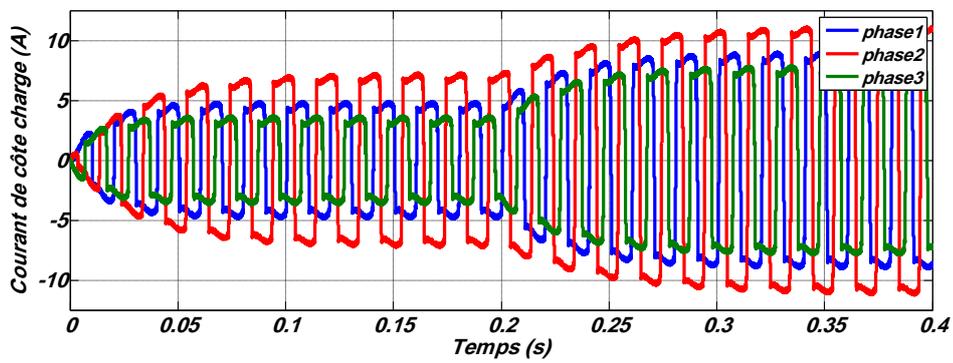


Figure III.27 - Courant de côte charge.

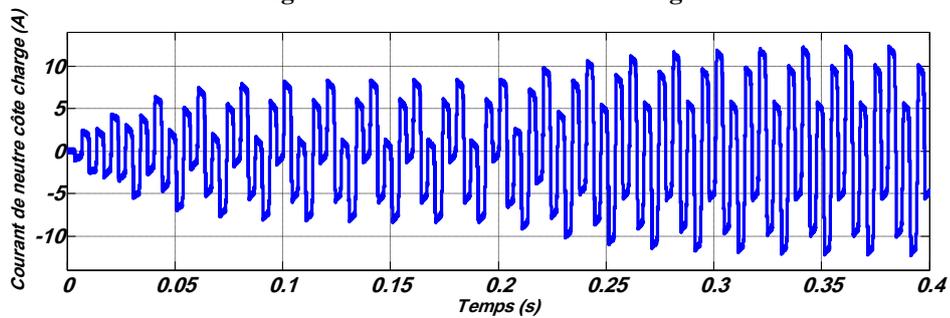


Figure III.28 - Courant de neutre.

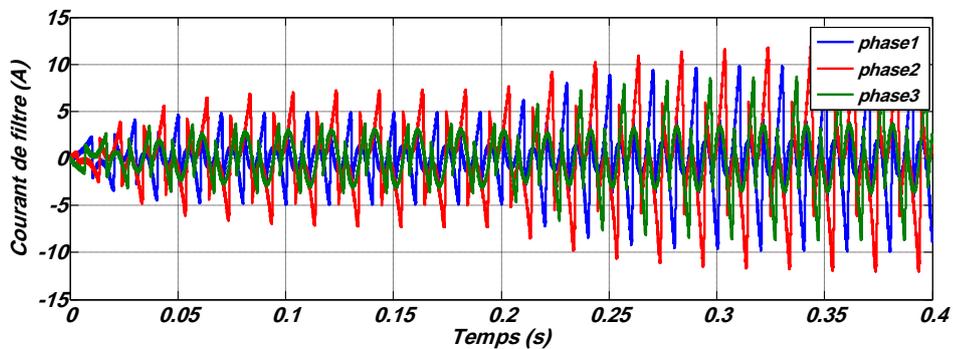
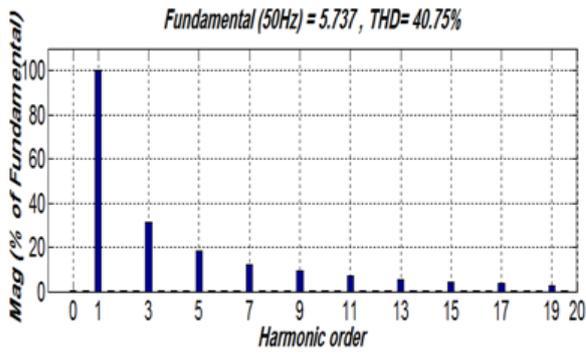
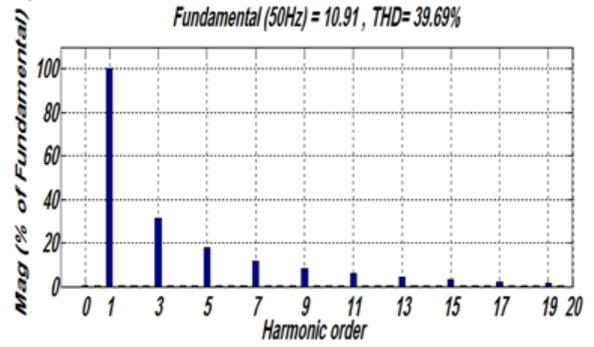


Figure III.29 - Courant de filtre.

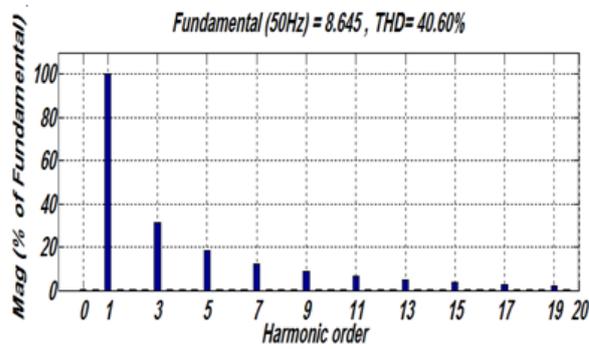


a) avant l' augmentation

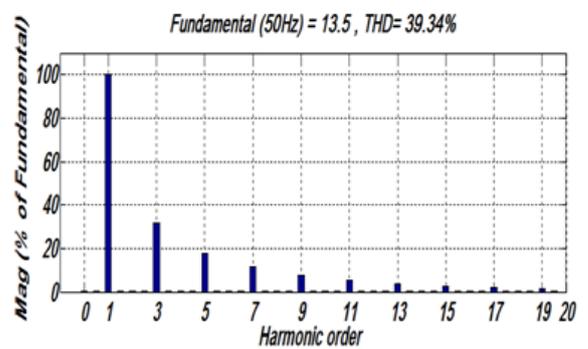


b) après l' augmentation

Figure III.30 - Spectre d'harmonique du courant de la phase 1.

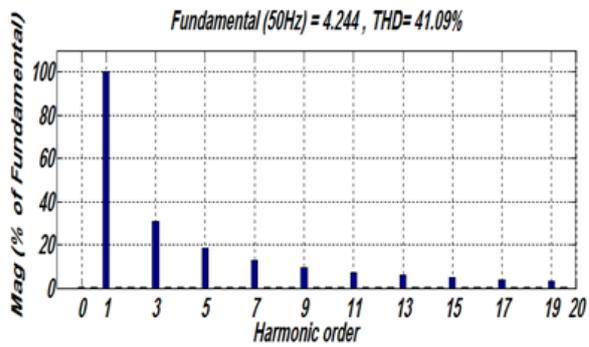


a) avant l' augmentation

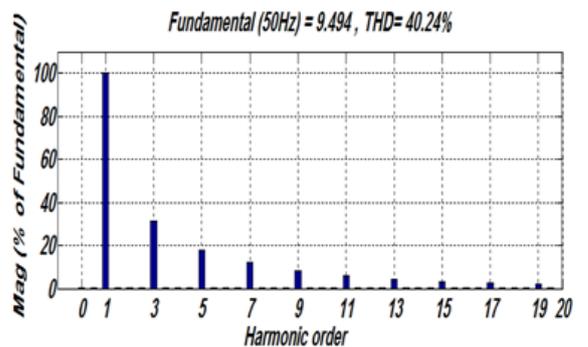


b) après l' augmentation

Figure III.31 - Spectre d'harmonique du courant de la phase 2.



a) avant l' augmentation



b) après l' augmentation

Figure III.32 - Spectre d'harmonique du courant de la phase 3.

**❖ Commentaire :**

La figure (III.22) représente les courants du côté source de trois phases où nous notons: avant l'augmentation (0s-0.2s): les courants de trois phases sont sinusoïdale.

après l'augmentation (0.2s-0.4s): les courants de trois phases sont augmentées et sauvées sur la propriété sinusoïdale.

La figure (III.23) montrent que le courant de neutre du côté source est nul.

Les figures (III.24,III.25 et III.26) représentent les taux de distorsion harmonique des courants du côté source de trois phases avant et après l'augmentation de la charge ,  $THD_i$  on peut voir qu'il est très faible et inférieur 5 %.

La figure (III.27) représente les courants du côté charge de trois phases où nous notons: avant l'augmentation (0s-0.2s): les courants de trois phases sont déformés, après l'augmentation (0.2s-0.4s): les courants de trois phases sont augmentées sauvées la propriété déformable.

La figure (III.28) montre que le courant de neutre du côté charge n'est pas nul est augmenté dans l'intervalle (0.2s-0.4s) après l'augmentation de la charge.

La figure (III.29) représente le courant de filtre où nous notons: le filtre est injecté le courant harmonique (est insertion du filtre), il est augmenté dans l'intervalle (0.2s-0.4s)

Le tableau (III.2): représente le résumé de la valeur du taux de distorsion harmonique du courant obtenir.

Tableau (III.2) : comparaison THD<sub>i</sub> dans les différentes cas de simulation.

Charge équilibrée						
THD <sub>i</sub> [%]	à quatre bras			à trois bras		
	Phase1	Phase2	Phase3	Phase1	Phase2	Phase3
avant filtrage	36.07			36.07		
après filtrage	0.91			1.35		
après l' augmentation	0.91 (côté source)		39.70 (côté charge)	0.97 (côté source)		39.73 (côté charge)
Charge déséquilibrée						
THD <sub>i</sub> [%]	côté source			côté charge		
	Phase1	Phase2	Phase3	Phase1	Phase2	Phase3
avant l' augmentation	2.97	2.34	2.40	40.75	40.60	41.09
après l' augmentation	1.86	1.57	1.55	39.69	39.34	40.24

### III.3. Conclusion :

Dans ce chapitre, on à présenté et commentée les résultats de simulation du FAP à quatre fils, Ainsi le filtrage était très bon dans les différents cas examinés.

La topologie à quatre bras lorsqu'elle est utilisée dans un FAP donne toujours de meilleurs résultats car l'onduleur à quatre bras pilote les trois courants de phase et celui du neutre. Par contre, l'onduleur à trois bras avec condensateurs a point milieu n'en pilote directement que trois courants et le quatrième n'est que le résultat d'une équation [27][2].

## Conclusion Générale

Dans ce travail, le filtre actif parallèle à quatre fils a été étudié en vue d'améliorer la qualité d'énergie dans les réseaux basse tension par la réduction des courants harmoniques créée par les charges non-linéaires. Différents cas de charges (équilibré, déséquilibré et variation de charge) ont été examinés. La méthode des puissances instantanées est utilisée dans la phase d'identification, la commande par hystérésis connue par son efficacité, mais aussi par sa fréquence de commutation variable est adoptée dans la phase de commande du FAP à quatre fils. Deux topologies de l'onduleur de tension du FAP sont examinées : topologie à trois bras avec condensateur à point milieu et topologie à quatre bras.

On peut conclure de ce travail que le filtrage actif parallèle à quatre fils adéquat permet une réduction significative des harmoniques du courant quelque soit la charge (équilibrée, déséquilibrée ou variation de charge). Le courant fourni par la source après filtrage est toujours sinusoïdale presque dépourvue des harmoniques dans tous les cas des simulations, avec un THD max qui ne dépasse pas 5 % ; la valeur maximale ordonnée par la norme IEEE. Toutefois, on a constaté que l'efficacité du filtre est meilleure avec l'onduleur à quatre bras.

L'identification par la méthode des puissances instantanées, utilisée dans ce travail, est largement utilisée, car elle offre l'avantage de choisir la perturbation à compenser avec précision, rapidité et facilité d'implantation. On a constaté qu'elle donne de très bonnes performances.

Enfin et pour continuer ce travail, on propose de faire les simulations dans le cas d'un système monophasé, et d'examiner d'autres méthodes d'identification afin de comparer les résultats de l'identification obtenus dans ce travail avec ceux des méthodes d'identification nouvelles. On peut aussi aborder dans un autre travail le filtrage dans le cas d'un réseau est perturbé, en examinant les cas des perturbations abordées dans le premier chapitre de ce travail.

**BIBLIOGRAPHIES**

- [1] **S. BEN ALI et S. BOUHANAK** «Etude et Simulation d'un Filtre Active Parallèle à Quatre Fils». Mémoire de magister, Université echahid hama lakhder d'el-oued , 2015.
- [2] **T. MAHNI** «Etude et Conception d'un Filtre Actif Parallèle Triphasé à Quatre Fils en vue de sa Commande par des Méthodes d'Intelligence Artificielle». Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider Biskra, 2017 .
- [3] **L.BILAL et O.ABANA** «Stratégies de Commande d'un Filtre Active Parallèle Triphasé». Mémoire de master, Université echahid hama lakhder d'el-oued , 2012.
- [4] **L. ZELLOUMA.** « Contribution à l'étude du filtrage des harmoniques des réseaux de distribution à l'aide du filtre actif » Thèse de doctorat. Université badji mokhtar annaba, 2010.
- [5] **F. HAMOUDI.** « Commande Robuste d'un Filtre Actif Shunt à Quatre Fils ». Mémoire de Magister, Université de Batna, 2008.
- [6] **I. EXEBERRIA-OTADUI.** « Evaluation of Different Strategies for Series Voltage Sag Compensation ». IEEE, P. 1797-1802, 2002.
- [7] **F. FORNANI, R. PROCOPIO and H. J. BOLLEN.** « SSC Compensation Capability of Unbalanced Voltage Sags ». IEEE Transaction on Power Delivery, V. 20, N° 03, p 2030-2037, 2005.
- [8] **M. AL. ALALI.** « Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension ». Thèse Doctorat de l'Université Louis Pasteur Strasbourg I, 2002.
- [9] **T. DEFLANDRE et P. MAURS.** « Les Harmoniques sur les Réseaux Electriques ». Direction des Etudes et Recherche en France -Edition EYROLLES, 1998.
- [10] **L. ZELLOUMA.** « Filtrage actif Parallèle des Harmoniques du Courant Génères Par un Pont Redresseur Triphasé non Commandé ». Mémoire de magister, Université de Badji Mokhtar, Annaba, 2006.
- [11] **C. COLLOMBET J. M. LUPIN Et J. SCHONEK.** « Perturbations Harmoniques dans les Réseaux Pollués et Leur Traitement ». Extrait du Cahier technique n° 152, Schneider Electric, 1999.
- [12] **C. COLLOMBET, J. LUPIN et J. SCHONEK.** «Perturbations Harmoniques dans les Réseaux Pollués, et Leur Traitement», Cahier Technique Schneider Electric n° 152, 1999.
- [13] **S .BOUGUERRA et I.BOURENNANE.** « Filtrage Actifs Parallèles des Réseaux Electriques avec Compensation de l'Energie Réactive ». Mémoire d'ingénieur d'état en génie électrotechnique, Université de m'sila,2007.

## BIBLIOGRAPHIES

---

- [14] **S. BERNARD et G. TROCHAIN.** « *Deuxième Génération de Compensateur Actif d'Harmoniques Forte Capacité Basée sur le Mode d'Injection du Courant* ». MGE UPS SYSTEMS MGE0121UKI, p. 3, 1998.
- [15] **I. GHADBANE.** « *Commande d'un Filtre Actif Triphasé Parallèle Par Différents Régulateurs* ». Mémoire de magistère, Université Mohamed Kheider-Biskra, 2009.
- [16] **A. HAMADI.** « *Contribution à l'Etude des Filtres Hybrides de Puissance Utilisés pour Améliorer la Qualité de l'Energie dans le Réseau Electrique de Distribution* ». Thèse de doctorat, Ecole de Technologie Supérieure-Québec, Canada, 2010.
- [17] **Y. PAL et A. SWARUP.** « *A Review of Compensating Type Custom Power Devices for Power Quality Improvement* ». Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference (POWERCON), p. 1-8, 2008.
- [18] **A.HAMIDI.** « *Contribution à l'Etude du Filtre Hybrides de Puissance Utilisé pour Améliore la Qualité de l'Energie dans les Réseau Electrique de Distribution* » Thèse de doctorat ,Ecole de technologie supérieure –Québec, canada ,2010.
- [19] **Y. PAL et A. SWARUP.** « *A Review of Compensating Type Custom Power Devices for Power Quality Improvement* », Conférence on Power System Technology and IEEE Power India Conférence (POWERCON), p. 1-8, 2008.
- [20] **M. C. BENHABIB.** « *Contribution à l'Etude des Différentes Topologies et Commandes des Filtres Actifs Parallèles à Structure Tension, Modélisation, Simulation et Validation Expérimentale de la Commande* ». Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré-Nancy France, 2004.
- [21] **B. OUAHID.** « *Contribution à l'Analyse des Onduleurs Multiniveaux* ». Mémoire de Magister, Université de Batna, 2005.
- [22] **H. DJEGHLOUD.** « *Filtrage Actif de Puissance* ». Thèse de doctorat, Université de Mentouri-Constantine, p. 3, 2007.
- [23] **D. NEKKAR.** « *Contribution à l'Etude des Stratégies de Commande des Filtres Actifs Triphasés* ». Mémoire de magister, Université de Souk-Ahras, 2014.
- [24] **H. AKAGI, S. OGASAWARA and H. KIM.** « *The Theory of Instantaneous Power in Three-Phase Four-Wire Systems and its Applications* ». Electrical engineering in Japan, V. 135, p. 74-86, 2001.
- [25] **L. ZELLOUMA.** « *Filtrage Actif parallèle des Harmoniques du Courant Générés par un Pont Redresseur Triphasé non Commandé*». mémoire de magister. Université badji mokhtar annaba, 2006.