

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



Université de Ghardaïa

N° d'ordre :  
N° de série :

Faculté des Sciences et Technologies  
Département des Sciences et Technologie

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

**MASTER**

**Domaine :** *Sciences et Technologies*

**Filière :** *Electromécanique*

**Spécialité :** *Maintenance Industriel*

**Par :** **BEN HOUIT Youcef**  
**BEN HOUIT Mohammed**

**Thème**

**AMELIORATION DE LA QUALITE D'ENERGIE  
ELECTRIQUE**

**Soutenu publiquement le : 20/06/2018**

**Devant le jury :**

<b>BEN AOUICHA Karim</b>	<b>MAB</b>	<b>Univ. Ghardaïa</b>	<b>Président</b>
<b>BATON Abdelkader</b>	<b>MAB</b>	<b>Univ. Ghardaïa</b>	<b>Examineur</b>
<b>BAHRI Ahmed</b>	<b>MAB</b>	<b>Univ. Ghardaïa</b>	<b>Examineur</b>
<b>BOURAGHDA Skander</b>	<b>MAB</b>	<b>Univ. Ghardaïa</b>	<b>Encadreur</b>

**Année universitaire 2017/2018**

## المخلص

إن مشكلة التلوث بالتوافقيات في شبكات التوزيع الكهربائية في تفاقم مقلق خاصة مع تزايد استعمال الحملات غير الخطية. تعد التصفية النشطة واحدة من بين أنجع الحلول المقترحة للتصدي لهذه المشكلة. إن اطروحتنا هذه تشرح خطر التوافقيات على الشبكات الكهربائية وسبل الحد من مخاطرها.

في البداية تطرقنا الى مختلف الاضطرابات التي تصيب الشبكات الكهربائية و قمنا بشرح كل اضطراب مصدره، مخاطره والحلول المستعملة للحد منه بعد ذلك توسعنا في شرح التوافقيات في الشبكات الكهربائية وعرضنا الحلول المتبعة للحد منها، ثم اخترنا أحد أنجع الحلول و اكثرها استخداما و توسعنا في دراسته و هو المرشح الفعال المتوازي، في الأخير قمنا بعملية محاكات على MATLAB لشبكة كهربائية تحتوي على احمال غير خطية تسبب تلوث في الشبكة و تشوه في الشكل الجيبي للتيار الكهربائي ولاحظنا كيف ساهم المرشح الفعال المتوازي في التقليل من التشوهات و قمنا بعرض النتائج المتحصل عليها قبل و بعد تفعيل المرشح الفعال المتوازي و لاحظنا الفرق.

في الأخير ختمنا الأطروحة بخاتمة لخصنا من خلالها أهم ما توصلنا اليه في هذه الرسالة.

## Résumé

Le problème de la pollution harmonique dans les réseaux électriques de distribution devient de plus en plus préoccupant avec l'accroissement de l'usage des charges non-linéaires. Le filtrage actif de puissance est l'un des solutions les plus efficaces face à ce problème, Cette thèse explique le risque d'harmoniques sur les réseaux électriques et comment réduire leurs risques. Au début, nous avons abordé les principales perturbations dans les réseaux électriques et expliqué chaque perturbation, Sa source, ses risques et les solutions utilisées, Ensuite, nous expliquons les harmoniques dans les réseaux électriques et les solutions utilisées pour réduire leur effets, Ensuite, nous avons étudié le filtre actif parallèle qui représente la solution la plus efficace, Nous avons simulé un réseau électrique contenant des charges non linéaires qui causent une pollution harmonique et une distorsion du forme d'onde sinusoïdale du courant électrique.

Enfin, nous avons observé comment le filtre actif parallèle a contribué à réduire les déformations d'onde sinusoïdale du courant électrique.

## Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mon père, qui a toujours voulu me voir et moi présentait ma thèse. Mais il est mort quelques mois avant d'obtenir mon diplôme. Que Dieu ait pitié de vous, Père.*

*Pour ma mère Que dieu lui donne bonne santé et longue vie.  
Et bien sûr A mes frères TAHAR et AHMED, RAHMA,  
CHERIFA, NOUR EL HOUDA et IMANE.*

*A toute ma famille, et mes amis, A mon binôme  
MOHAMMED et toute la famille BEN HOUIT.*

*Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que  
ce projet soit possible, je vous dis merci.*

## Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mon père et ma mère. Je demande à Dieu de prolonger leur vie et de leur donner la santé.*

*Pour mes frères. Je demande à Dieu d'avoir une vie heureuse.*

*A toute ma famille, et mes amis, A mon binôme YUCEF et toute la famille BEN HOUIT.*

*Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis merci.*

# Remerciements

Nous aimerions remercier tous ceux qui ont contribué au succès de ce travail et nous ont aidés à écrire cette lettre.

Tout d'abord, nous remercions Mr. BOURAGHDA Skander de l'Université de Ghardaia. Qui nous a donné toutes les informations dont nous avons besoin pour accomplir ce travail.

Et merci à Mr. TRIA Mohammed, l'ingénieur technique de Sonalgaz pour le temps qu'il a passé avec nous. Grâce à sa confiance, nous avons pu terminer le travail complètement. Il fut d'une aide précieuse dans les moments les plus délicats.

Nous aimerions également remercier tous les professeurs de l'Université Ghardaïa, en particulier les professeurs de la Faculté des Sciences et Technologies que nous avons étudiés.

Enfin, nous voudrions remercier toutes les personnes qui nous ont conseillé : la famille de BEN HOUIT, ses amis. Et collègues.

## Liste des tableaux :

Tableau	Designation	page
I.1	Vue d'ensemble des principales perturbations électriques.	7
II.1	Conséquences d'une exposition à long terme aux harmoniques.	25
II.2	Harmoniques dans un système triphasé équilibré.	34
II.3	Conséquences des harmoniques sur les éléments du réseau.	40
II.4	Niveau de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux électriques.	42
III.1	Courants harmoniques d'une alimentation à découpage en fonction de l'impédance de source.	44
IV.1	Tensions en sortie de l'onduleur.	69
V.1	Paramètres du système.	74
V.2	Les résultats comparatifs du THD.	83

## Liste des figures :

figure	Designation	page
I.1	Creux et coupure brève.	8
I.2	Amplitude d'un creux de tension provoqué par : a) un court-circuit, b) le démarrage d'un moteur de forte puissance.	9
I.3	Exemple de surtension.	9
I.4	Fluctuations de tension.	11
I.5	Variation de fréquence.	12
I.6	déséquilibre du système triphasé de tension.	12
I.7	Les harmoniques.	14
II.1	Harmoniques de tension.	22
II.2	Source de tension harmonique.	28
II.3	Impédance harmonique.	29
II.4	Diagramme des puissances.	32
II.5	Circulation des courants harmoniques d'ordre 3 et multiples de 3 dans le conducteur du neutre.	34
II.6	Four à arc alimenté en courant alternatif.	36
II.7	Four à arc alimenté en courant continu.	36
II.8	caractéristiques de quelques générateurs d'harmoniques.	38
III.1	Transformateur à secondaire zigzag et atténuation des harmoniques multiples de 3.	45
III.2	Montage de 2 ponts redresseurs.	46
III.3	Principe de connexion du filtre actif.	46

III.4	Filtre actif parallèle.	47
III.5	Filtre actif série.	48
III.6	Combinaison d'un filtre actif série en parallèle avec un filtre passif parallèle.	49
III.7	Mise en série d'un filtre actif série avec un filtre passif parallèle.	49
III.8	Combinaison d'un filtre actif parallèle avec un filtre actif série :	50
III.9	Schéma de principe de convertisseur à MLI.	51
III.10	Système IPQC.	52
III.11	Système PLC.	52
IV.1	Les techniques d'identification des harmoniques.	56
IV.2	Principe de l'extraction des composantes alternative de p et q.	60
IV.3	Principe de la méthode (pq).	60
IV.4	Représentation vectoriel de passage de repère abc vers le repère (dq).	60
IV.5	Principe de la méthode (dq).	63
IV.6	Principe de la méthode (pqr).	63
IV.7	Relation entre le plan ( $\alpha\beta 0$ ) et le plan (pqr).	64
IV.8	Schéma du circuit de puissance d'un filtre actif parallèle à structure tension.	67
IV.9	Filtre actif à structure tension.	68
IV.10	Principe de commande par MLI.	71
IV.11	Bande d'hystérésis et signal de commande d'un interrupteur.	72
IV.12	Principe de la commande du courant par hystérésis.	72

IV.13	Modèle simplifié d'un contrôleur de bande d'hystérésis.	73
V.1	Modèle de simulation.	75
V.2	Modèle de simulation établi sous MATLAB Simulink.	75
V.3	le courant de la charge avant l'insertion du filtre actif.	75
V.4	le courant de la source avant l'insertion du filtre actif.	76
V.5	Le courant de la source avant l'insertion du filtre actif, phase a.	76
V.6	Le courant de la source avant l'insertion du filtre actif, phase b.	76
V.7	Le courant de la source avant l'insertion du filtre actif, phase c.	77
V.8	Spectre harmonique de courant de la source phase- <i>a</i> - avant filtrage.	77
V.9	Spectre harmonique de courant de la source phase- <i>b</i> - avant filtrage.	78
V.10	Spectre harmonique de courant de la source phase- <i>c</i> - avant filtrage.	78
V.11	le courants injecté par filter actif.	78
V.12	Le courant injecté par filter, phase a.	79
V.13	Le courant injecté par filter, phase b.	79
V.14	Le courant injecté par filter, phase c.	79
V.15	le courant de la source après l'insertion du filtre actif, phase a.	80
V.16	le courant de la source après l'insertion du filtre actif, phase b.	80
V.17	le courant de la source après l'insertion du filtre actif, phase c.	80
V.18	le courant de la source après l'insertion du filtre actif.	80

V.19	Spectre harmonique de courant de la source phase- <i>a</i> - après filtrage.	81
V.20	Spectre harmonique de courant de la source phase- <i>b</i> - après filtrage.	81
V.21	Spectre harmonique de courant de la source phase- <i>c</i> - après filtrage.	82

## Abréviations :

	Designation
FAP	Filtre Actif Parallèle
ASI	Système d'alimentation sans interruption.
SSTS	bien comme interrupteur statique de transfert entre lignes.
THD	Taux de distorsion harmonique.
UPQC	Unified Power Quality Conditioner
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
FFT	Fast Fourier Transform
FPB	Filtre Passe-Bas
PLL	Phase Locked Loop
PI	Proportional Integral
GTO	Gate Turn Off.
MOSFET	Métal Oxyde Semi-Conductor Field Effect Transistor
IGBT	Insolated Gate Bipolar Transistor
GRV	Génératrices à Reluctance Variable
GADA	Génératrice Asynchrone Double Alimentation
IPQC	Improved Power Quality AC-DC Converter
PLC	Power Line Communication

## Symboles

	Designation	Unité
$e_a, e_b \text{ et } e_c$	Tension de phase du réseau.	v
$V \text{ et } V_c$	Fondamentaux sous forme complexe.	-
$V_e$	Valeur efficace du signal analysé, et $V_k$ est son harmonique de rang $k$ .	hz
$V_{ab}$	Tensions sous forme complexe.	v
$k$	Rapport de transformation.	-
$T$	Matrice de transformation.	-
$v_{ABC, bc}$	Tensions du côté primaire et secondaire.	v
$S_n$	Puissance nominale apparente.	w
$V_n$	Tension simple nominale.	v
$u_{cc}$	Tension de court circuit.	v
$P_i$	Puissance active.	w
$Q_i$	Puissance réactive	w
$V_s$	Tension de source	v
$i_s$	Courant de source	a
$p$	Puissance instantané active	w
$q$	Puissance instantané réactive	w
$P_{avg}$	power average	-
$V_{dc}$	Tension continue de l'onduleur	v
$h$	Rang de l'harmonique	%
$i_f$	Courant de filtre	a
$i_l$	Courant de charge	a
$i_{ref}$	Courant de référence	a
$R_f$	Résistance de filtre de sortie	$\Omega$
$L_f$	Inductance de filtre de sortie	H

# Table des matières

<i>AMELIORATION DE LA QUALITE D'ENERGIE ELECTRIQUE</i>	1
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : LES PRINCIPAUX PERTURBATION DANS LES RESEAUX ELECTRIQUE	
I.1. INTRODUCTION	3
I.2. QUALITE DE L'ENERGIE ELECTRIQUE	4
I.3. CLASSIFICATION DES PERTURBATIONS ELECTRIQUES	5
I.3.1. Creux de tension et coupures brèves	8
I.3.1.1. Définition, origine et conséquences	8
I.3.2. Surtensions	9
I.3.2.1. Définition, origine	9
I.3.3. Les fluctuations rapides de tension (flickers)	11
I.3.3.1. Définition et origine	11
I.3.3.2. Conséquences	11
I.3.4. Variation de la fréquence	12
I.3.4.1. Définition, origine et conséquences	12
I.3.5. Les dissymétries du système de tension appelées déséquilibre	12
I.3.5.1. Définition, origine et Conséquences	12
I.3.6. Harmoniques et interharmoniques	13
I.3.6.1. Définition et origine des harmoniques	13
I.3.6.2. Interharmoniques	15
I.3.7. Solutions pour améliorer la qualité de l'énergie électrique	15
I.3.7.1. Non symétrie (Déséquilibres) de la tension	16
I.3.7.2. Creux de tension et coupures	17
I.3.7.3. Harmoniques	17
I.3.7.4. Surtensions	18
I.3.7.5. Fluctuations de la tension	19
I.4. CONCLUSION	20
CHAPITRE II : ETUDE DE LA POLLUTION HARMONIQUE	
II.1. INTRODUCTION	21
II.2. HARMONIQUES & INTER-HARMONIQUES	21
II.3. PERTURBATIONS HARMONIQUES	23
II.3.1. Nature physique du phénomène	23
II.3.2. Identification des harmoniques	23
II.3.3. Définitions & aspects théoriques des phénomènes	25

II.3.3.1.Harmoniques d'un signal périodique	25
II.3.3.2.Décomposition en série de Fourier	27
II.3.3.3.Analyse d'un signal	27
II.3.3.4.Pourcentage d'harmoniques	28
II.3.4.Harmoniques de courant & de tension	28
II.3.4.1.Courant harmonique	28
II.3.4.2.Tension harmonique	28
II.3.4.3.Loi d'Ohm généralisée & impédance harmonique	29
II.3.5.Distorsion harmonique	29
II.3.5.1.Taux harmonique de rang h : THH	29
II.3.5.2.Taux global de distorsion harmonique : THD	29
II.3.5.3.Taux de distorsions pondérées : TDP	30
II.3.6.Facteur de puissance	31
II.3.7.Harmoniques dans un système triphasé	33
II.3.7.1.Système triphasé équilibré	33
II.3.7.2.Système triphasé déséquilibré	34
II.3.8.Interharmoniques	35
II.3.8.1.Charges non linéaires produisant les interharmoniques	35
II.3.8.2.Signaux de télécommande de 175[Hz] sur les réseaux de distribution	35
II.4.ORIGINE DES PERTURBATIONS HARMONIQUES	37
II.4.1.Appareils de production, de transport & de distribution	37
II.4.2.Secteur industriel	37
II.4.3.Secteur tertiaire	37
II.4.4.Secteur domestique	38
II.5.CARACTERISTIQUES DE QUELQUES GENERATEURS D'HARMONIQUES :	38
II.5.1.Échauffement	38
II.5.2.Interférences avec les réseaux de télécommunication	39
II.5.3.Excitation des résonances	39
II.5.4.Mauvais fonctionnement pour les dispositifs électriques	39
II.5.5.Autres effets	39
II.6.NORMES & REGLEMENTATION	41
II.7.CONCLUSION	42
CHAPITRE III : STRATEGIES DE DEPOLLUTION DES HARMONIQUES	
III.1.INTRODUCTION	43
III.2.SOLUTION TRADITIONNELLE	43
III.2.1.Surdimensionnement de l'installation électrique	43
III.2.2.Augmentation de la puissance de court-circuit	43
III.2.3.Transformateur à couplage spécial	44

III.2.4.Modification du convertisseur polluant	45
III.2.4.1.Redresseurs dodécophasés	45
III.2.4.2.Méthodes d'injection d'harmonique dans le neuter	45
III.2.4.3.Transformateurs de réjection de l'harmonique	46
III.3.SOLUTIONS NOUVELLES	46
III.3.1.Filtre actif ou conditionneur actif d'harmoniques	46
III.3.2.Filtre actif de puissance parallèle	47
III.3.3.Filtre actif de puissance série	47
III.3.4.Filtre actif de puissance hybride	48
III.3.4.1.Filtre actif de puissance série en parallèle avec des filtres passifs parallèles	49
III.3.4.2.Filtre actif de puissance série en série avec des filtres passifs parallèles	49
III.3.4.3.Conditionneur actif de puissance	50
III.3.4.4.Redresseur à principe de la MLI	50
III.4.SOLUTION NON CONVENTIONNELLES	51
III.4.1.Système improved power quality AC-DC converter IPQC	51
III.4.2.Système Power Line Communication PLC	52
III.4.3.Filtrage actif à l'aide d'une machine synchrone à double alimentation	52
III.5.CONCLUSION	53
CHAPITRE IV : LES METHODES D'IDENTIFICATION ET DE COMMANDE DU FAP	
IV.1.INTRODUCTION	54
IV.2.TECHNIQUES D'IDENTIFICATION DES HARMONIQUES	55
IV.2.1.Identification dans le Domaine Fréquentiel	56
IV.2.1.1.Transformée de Fourier rapide (FFT)	57
IV.2.1.2.Transformée de Fourier discrète (DFT)	57
IV.2.1.3.Transformée de Fourier discrète récursive (DFTR)	58
IV.2.2.Identification dans le Domaine Temporel	58
IV.2.2.1.Théorie de la puissance instantanée (pq)	58
IV.2.2.2.Théorie du référentiel synchrone (dq)	61
IV.2.2.3.Théorie des puissances instantanées dans le référentiel (pqr)	63
IV.3.LA PARTIE PUISSANCE D'UN FILTRE ACTIF PARALLELE A STRUCTURE TENSION	67
IV.3.1.L'onduleur de tension	67
IV.3.2.Filtre de découplage	69
IV.3.3.Système de stockage d'énergie	69
IV.4.CONTROLE DES COURANTS DU FILTRE ACTIF (PARTIE COMMANDE)	70
IV.4.1.Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)	70
IV.4.2.Commande par hystérésis	71
IV.5.CONCLUSION	73

CHAPITRE V :SIMULATIN & RESULTATS	
V.1.SIMULATION	74
V.2.DESCRPTION DU MODELE A ETUDIER	74
V.3.RESULTATS AVANT L'INSERTION DU FAP	76
V.3.1. THD	77
V.4. RESULTAS APRES L'INSERTION DU FAP	79
V.4.1.TH D	81
V.5. COMPARAISON DES RESULTATS	82
V.6. CONCLUSION	83
CHAPITRE VI : CONCLUSION & PERSPECTIVE	
VI.1.CONCLUSION	84
VI.2.PERSPECTIVES	85
Références bibliographiques	86

# INTRODUCTION GENERALE

## INTRODUCTION GENERALE :

L'utilisation de charges non linéaires, telles que des redresseurs à diodes ou thyristors, des alimentations à découpage, etc..., provoque l'injection d'une énorme quantité d'harmoniques de courant dans les réseaux de distribution. Ces harmoniques provoquent des distorsions de la forme de courant de la source ce qui conduit à des pertes additionnelles dans les transformateurs et dans les capacités des lignes, et des défauts de fonctionnement d'équipements électroniques sensibles.

Le fonctionnement normal de tous les producteurs et tous les consommateurs de l'énergie électrique réside dans la supposition que le courant et la tension du système triphasé soient sinusoïdaux et symétriques, par conséquent, il est nécessaire de réduire les harmoniques en dessous de 5% comme spécifié dans la norme harmonique IEEE519 [1].

Le respect des normes de la qualité de l'énergie électrique impose, si une charge non linéaire est connectée au réseau électrique, de concevoir un système qui restreint la dissipation des composantes harmoniques.

Pour pallier aux problèmes de pollution harmonique dans les réseaux électriques de distribution plusieurs solutions ont été proposées pour limiter les harmoniques de courant injectés dans le réseau par des charges non linéaires, parmi elles : Les filtres passifs, qui sont souvent appelés filtres piègeurs d'harmoniques, ont été utilisés pour éliminer les harmoniques de courants et améliorer le facteur de puissance [2]. Malgré sa simplicité et son faible coût, le filtre passif est lié aux variations de l'impédance de la source et peut mener à une résonance non voulue avec le réseau. De plus, ce type de filtre présente une non- adaptabilité aux variations de la charge et du réseau.

Grâce aux progrès remarquables réalisés au cours des dernières années dans le domaine d'électronique de puissance et l'électronique numérique, ont permis de concevoir des dispositifs de filtrage modernes des harmoniques auto-adaptables appelés filtrage actifs. Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à compenser les perturbations responsables de la dégradation de la qualité d'énergie.

Le filtre actif parallèle comporte deux fonctions principales une fonction d'identification de courants harmoniques et une fonction de commande d'onduleur pour injecter les courants de compensation. [3].

Ainsi, le choix de la topologie du filtre actif parallèle se présente comme la solution la plus standard pour le filtrage des courants harmoniques.

Le principe de base des filtres actifs a été introduit par Sasaki et Machida au cours des années 70 [4]. Dès lors, l'intérêt y s'est renforcé d'une part par l'émergence de semi-conducteur de commutation, notamment les IGBT, et MOSFET caractérisés par une fréquence de commutation rapide et une structure à gâchette isolée [5,6], et de l'autre part, par la disponibilité des DSP, des FPGA, des convertisseurs analogiques/numériques, des capteurs de courant et de tension à de bons prix [7]. Un filtre actif de puissance est un convertisseur continu-alternatif (onduleur) dont la vocation est la reproduction de composantes harmoniques identiques à celles qu'on souhaite éliminer, mais en opposition de phase. En outre, les nouveaux filtres actifs sont supérieurs en qualité de filtrage, non volumineux, et plus flexibles en fonctionnement que leurs comparables passifs [8].

Dans ce contexte, cette thèse traite des différents aspects concernant la qualité de l'énergie électrique. Nous examinons les perturbations affectant la qualité de l'onde, les normes pour limiter l'émission des harmoniques et les principaux moyens de mitigation usuels. Nous développons des algorithmes et stratégies de commande des dispositifs de mitigation. Le travail présenté comporte quatre chapitres organisés comme suit :

- Dans le premier chapitre, nous abordons en premier lieu les différents problèmes affectant la qualité de l'énergie électrique, ce qui tend à montrer leurs origines et leurs conséquences sur les installations.
- Dans le deuxième chapitre, nous étudions l'origine des harmoniques et leur effet sur les réseaux électriques.
- Dans le Troisième chapitre, nous abordons les solutions utilisées pour réduire l'impact des harmoniques traditionnelles et modernes.
- Dans le quatrième chapitre, nous expliquons la solution la plus efficace dans l'atténuation des harmoniques et la plus moderne c'est le filtre parallèle actif mécanisme d'action, composants, méthodes d'identification harmoniques, et les mécanismes de commande.

Enfin. Nous avons conclu la thèse par une conclusion résumant les points les plus importants.

# Chapitre I

## Les principaux perturbations dans les réseaux électriques

## I.1. INTRODUCTION :

Depuis de nombreuses années, le distributeur d'énergie électrique s'efforce de garantir la qualité de la fourniture d'électricité. Les premiers efforts se sont portés sur la continuité des services afin de rendre toujours disponible l'accès à l'énergie chez l'utilisateur. Aujourd'hui, les critères de qualité ont évolué avec le développement des équipements où l'électronique prend une place prépondérante dans les systèmes de commande et de contrôle.

L'énergie électrique est fournie sous forme de tension constituant un système sinusoïdal triphasé dont les paramètres caractéristiques sont les suivants :

- La fréquence.
- L'amplitude des trois tensions.
- La forme d'onde : Qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde.
- Le déséquilibre : La symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leur déphasage relatif, [9].

La qualité d'énergie peut être affectée, soit du fait de certains incidents inhérents à la nature physique et aux sujétions liées à l'exploitation du réseau, soit du fait de certains récepteurs. Ces défauts se manifestent sous forme de différentes perturbations affectant un ou plusieurs des quatre paramètres précédemment définis. On a donc quatre possibilités distinctes de perturbation :

- Les fluctuations de la fréquence à [50 Hz] : elles sont rares et ne sont observées que lors de circonstances exceptionnelles, par exemple certains défauts graves du réseau, au niveau de la production ou du transport.
- Les variations de l'amplitude : il ne s'agit pas des variations lentes de tension qui sont corrigées par les transformateurs de réglage en charge, mais de variations rapides de tension ou de creux de tension se présentant souvent sous forme d'à-coups brusques. Les creux de tension peuvent être soit isolés, soit plus ou moins répétitifs, de forme régulière ou non.
- La modification de la forme d'onde de la tension : cette onde n'est alors plus sinusoïdale, et peut être considérée comme représentable par une onde fondamentale à [50 Hz], associée soit à des harmoniques de fréquence multiple entier de [50 Hz], soit même parfois à des ondes de fréquence quelconque.
- La dissymétrie du système triphasé : que l'on appelle déséquilibre. On peut, en plus, mentionner un type particulier de perturbations difficile à classer puisqu'il concerne tout à la fois l'amplitude et la forme d'onde : ce sont les variations transitoires d'amplitudes dont la durée est inférieure à 10 ms, [10].

## I.2. QUALITE DE L'ENERGIE ELECTRIQUE, [11] :

La notion globale de qualité de l'énergie peut être décomposée en deux axes : la continuité de la tension et de la qualité de la tension.

- Continuité de la tension :

La continuité de l'alimentation en tension et en courant relève de la conception des réseaux publics et industriels, de la qualité de leurs matériels et des bonnes pratiques de maintenance et d'exploitation. La continuité dépend à la fois des choix techniques et des investissements réalisés pour assurer l'alimentation d'un point particulier ou d'une zone donnée. C'est donc le résultat d'un compromis « technico-économique », explicite ou implicite. La continuité de l'alimentation est l'un des éléments importants de la qualité de la fourniture perçue par les clients : un client doit pouvoir compter sur son alimentation avec la puissance et aux instants prévus par son contrat.

La continuité de l'alimentation se mesure par le nombre de coupures d'alimentation d'un point donné — on parle simplement de « coupure » — par unité de temps.

Dans les normes, deux types de coupures sont définies : les coupures dites longues, de durée supérieure ou égale à min, et les coupures dites brèves, de durée inférieure à 3 min.

- Qualité de la tension :

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

- la fréquence.
- l'amplitude des trois tensions.
- la forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde.

La symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leur déphasage relatif.

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

- Variations de l'amplitude :

Il ne s'agit pas des variations lentes de la tension qui sont corrigées par les régulateurs en charge des transformateurs, mais des variations rapides isolés, soit plus ou moins répétitifs, de forme régulière (créneaux) ou non.

- Modifications de la forme de l'onde de tension :

L'onde n'est plus sinusoïdale et peut être considérée comme la superposition d'une onde à fréquence fondamentale à [50Hz] et de tensions harmoniques dont la fréquence est un multiple entier de la fréquence fondamentale et de tensions interharmoniques à des fréquences quelconques.

- Dissymétrie du système triphasé (déséquilibre) :

Dans un système triphasé, l'alimentation de charges monophasées (trains, fours électriques de grande puissance) entraîne des dispersions sur les modules des tensions et leurs déphasages ne sont plus égaux.

- Variations de la fréquence fondamentale à [50Hz] :

Comme la fréquence est la grandeur d'équilibrage instantané entre la production et la puissance appelée, les variations de fréquence sont, en principe, inévitables. En pratique, elles sont rares et minimales dans les réseaux interconnectés et ne sont observées que lors de circonstances exceptionnelles, par exemple, lors de certains défauts de grande ampleur en réseau ou de production.

### **I.3. CLASSIFICATION DES PERTURBATIONS ELECTRIQUES :**

En se basant sur les paramètres caractérisant la tension et énumérés au paragraphe précédent, on distingue quatre familles de perturbations électriques :

- Les variations de l'amplitude (creux de tensions, coupures brèves et surtensions, flicker).
- les fluctuations de la fréquence autour de la fréquence fondamentale.
- les modifications de la forme d'onde (harmoniques, interharmoniques, bruits).
- la dissymétrie du système triphasé : déséquilibre.

Un autre type de classification des perturbations électriques peut également être élaboré en se basant sur leur durée, [12] :

- les perturbations transitoires.
- les perturbations de courte durée.
- les perturbations permanentes.

Les perturbations électriques transitoires ont une durée de moins d'une demi-période fondamentale. Elles ont pour principale origine les manœuvres d'ouverture et de fermeture sur le réseau de transport et de distribution, mais également des phénomènes naturels tels que la foudre.

Les perturbations de courte durée sont les creux de tension, les coupures brèves et les surtensions, qui sont généralement provoquées par la présence de court-circuit. Elles se caractérisent par des variations importantes de l'amplitude de la tension, et peuvent avoir des conséquences néfastes et coûteuses sur les équipements électriques.

Dans la catégorie « perturbations permanentes » on retrouve les harmoniques, le bruit, le déséquilibre et les variations de tension et de fréquence. Elles sont généralement provoquées par la présence de charges non linéaires et fluctuantes au sein du réseau électrique. Elles se caractérisent par de faibles variations de l'amplitude, et sont à l'origine d'échauffement, de pertes supplémentaires, de vieillissement prématuré des équipements électriques et de dysfonctionnements sur certains appareillages de contrôle-commande.

On peut également remarquer que les origines des perturbations électriques peuvent être classées en deux grandes catégories :

- les défauts au sein des réseaux électriques.
- la présence de charges non-linéaires ou fluctuantes.

Enfin, les effets des perturbations électriques peuvent eux aussi être divisés en deux grandes familles :

- les effets à court terme (déclenchement des appareils, dégâts matériels, ...).
- les effets à long terme (pertes supplémentaires, échauffements, vieillissements).

Le tableau I.1 récapitule les remarques précédentes en présentant les principales perturbations, leurs origines ainsi que leurs conséquences. L'amplitude de la tension est également indiquée en pu (perunits) pour les perturbations importantes au niveau de l'amplitude et en % pour les variations faibles d'amplitude, [13].

Tableau : I.1. Vue d'ensemble des principales perturbations électriques, [13].

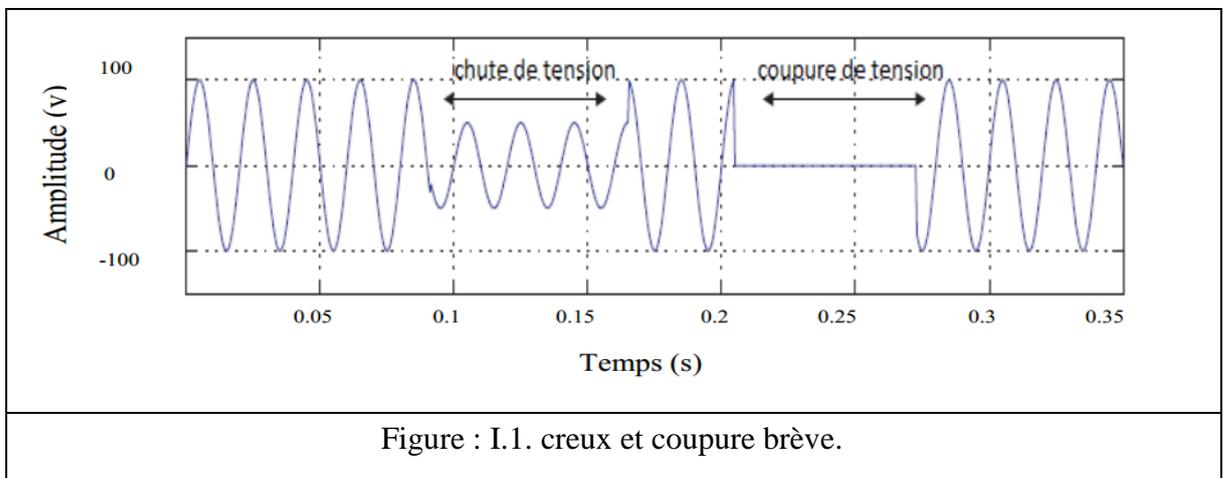
Type de perturbation	Origine	Consequences	Solutions possible
Coupure longue	Court-circuit, surcharge, déclenchement intempestif, (maintenance)	Arrêts d'équipements, pertes de production, dégâts	Alimentation de secours (réseau), alimentation sans interruption (ASI)
Creux de tension et coupure brève	Court-circuit, (enclenchement de gros moteur)	Arrêts d'équipements, pertes de production, dégâts	Conditionneur de réseau, conception de l'équipement sensible, alimentation sans interruption
Fluctuation rapide (flicker)	Installations fluctuantes (four à arc, soudeuse, moteur à démarrage fréquent, éolienne...)	Papillotement de l'éclairage	Compensateur synchrone, compensateur statique de puissance réactive, conditionneur actif, condensateur série
Harmonique	Installations non linéaires (électronique de puissance, arcs électriques...)	Effets thermiques (moteurs, condensateurs, conducteurs de neutre...), diélectriques (vieillessement d'isolant) ou quasi instantanés (automatismes)	Filtrage actif ou passif, self anti-harmonique, déclassement d'appareil
Interharmonique	Installations non linéaires et fluctuantes (four à arc, soudeuse, éolienne), changeurs de fréquence, télécommande centralisée	Papillotement de l'éclairage fluorescent, dysfonctionnement d'automatismes, dégâts mécaniques sur machines tournantes	Filtrage actif ou passif, amortissement de filtres anti-harmoniques, conception de l'équipement sensible
Déséquilibre	Installations déséquilibrées (traction ferroviaire...)	Echauffement de machines tournantes, vibrations, dysfonctionnement de protections	Dispositif d'équilibrage, conditionneur de réseau
Surtension	Court-circuit, commutations, foudre	Déclenchements, danger pour les personnes et pour les matériels	Séparation galvanique, parasurtenseur, enclenchement "synchronisé", résistance de pré-insertion

### I.3.1. Creux de tension et coupures brèves :

#### I.3.1.1. Définition, origine et conséquences :

Un creux de tension est une baisse brutale de la tension en un point du réseau électrique à une valeur comprise (par convention) entre 90% et 10% par rapport à la tension de référence ( $U_{ref}$ ), suivie d'un rétablissement de cette tension après un court laps de temps compris entre la demi-période fondamentale du réseau (8 ms à 16ms) et une minute. La tension de référence est généralement la tension nominale pour les réseaux BT et la tension déclarée ou avant perturbation pour les réseaux MT et HT (voir figure I.1).

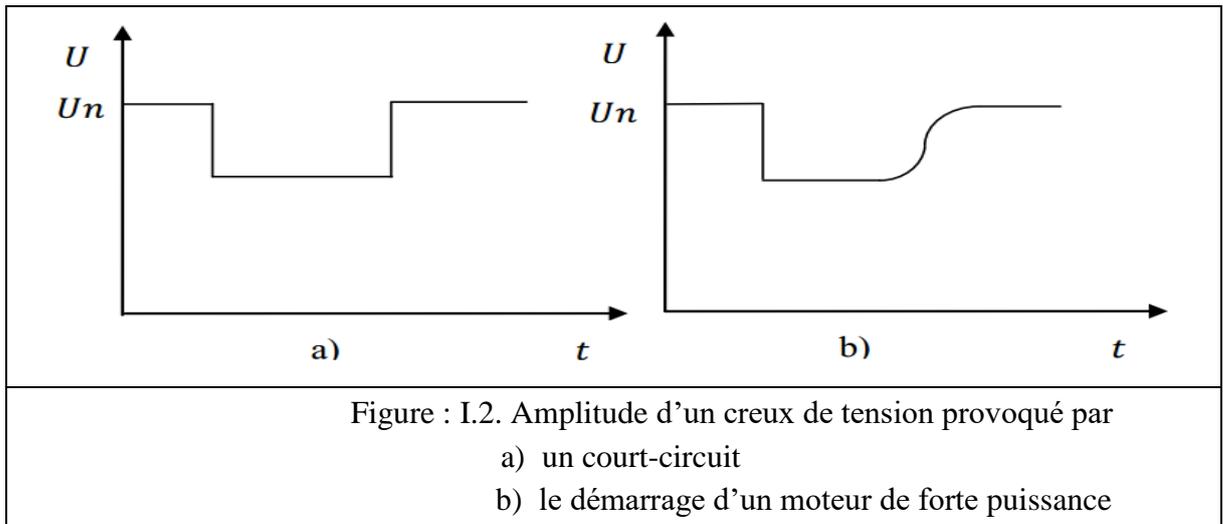
Les coupures brèves sont un cas particulier des creux de tension de profondeur supérieure à 90% (IEEE1159) et de durée allant jusqu' à 1 minute.



Les creux de tension ont pour principale origine les courts-circuits affectant le réseau électrique ou les installations raccordées, et le démarrage des moteurs de forte puissance. Toutefois, les courts-circuits restent la principale cause de creux de tension et de coupures brèves. Ils engendrent des variations brusques de l'amplitude de la tension et pour cette raison, les creux de tension correspondants se caractérisent par une forme rectangulaire en fonction de temps (voir figure I.2a). Les courts-circuits peuvent affecter une, deux ou trois des phases et peuvent engendrer des déphasages supplémentaires entre elles, [14].

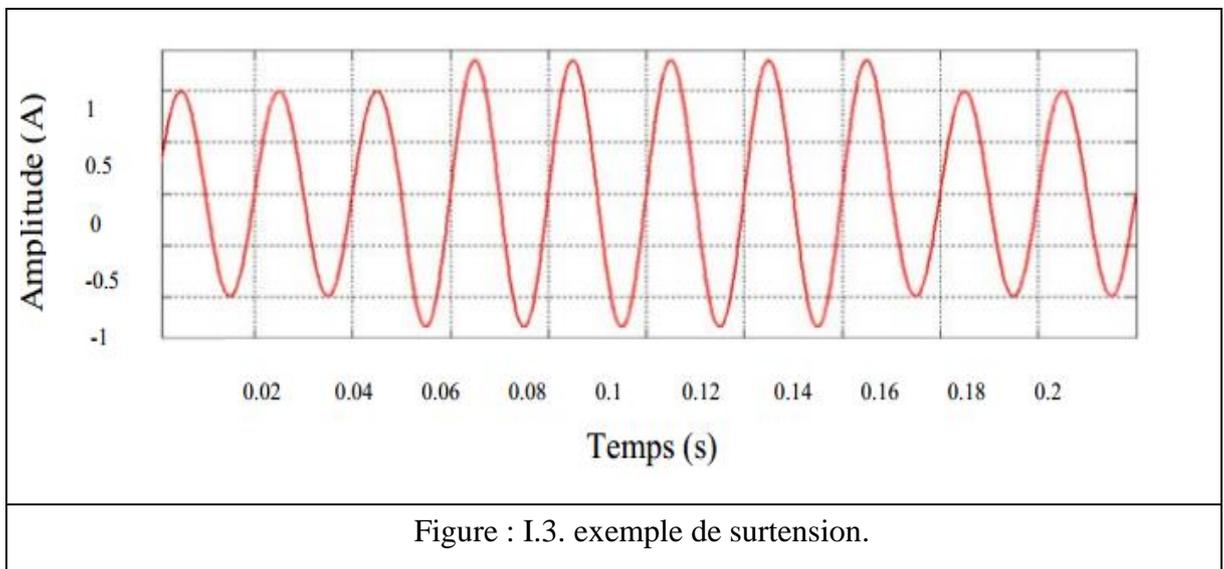
Les moteurs de forte puissance (asynchrones essentiellement) peuvent également être à l'origine des creux de tension. En général, le courant des moteurs atteint au moment de leur démarrage 5 à 6 fois le courant nominal et diminue progressivement lorsque la machine se rapproche de sa vitesse nominale. Cette surintensité produit une chute de tension qui décroît avec la diminution du courant (voir figure I.2b). Les creux de tensions engendrés par le démarrage des moteurs de forte puissance durent entre quelques secondes et quelques dizaines de seconde et se caractérisent par des chutes de tension sur les trois phases.

Enfin, les creux de tension peuvent également être engendrés par la saturation des transformateurs ou des modifications dans la structure du réseau. Cependant, ces perturbations provoquent rarement des chutes de tension importantes.



Les creux de tension sont les perturbations électriques les plus pénalisantes du fait de leur fréquence et de la sensibilité de nombre d'appareillages présents dans les réseaux industriels. Il faut néanmoins souligner que les coupures brèves peuvent avoir des conséquences plus graves (à la reprise), mais sont bien moins fréquentes, [13].

### I.3.2.Surtensions, [10] :



#### I.3.2.1.Définition, origine :

Toute tension appliquée à un équipement  $t$  dont la valeur de crête sort des limites d'un gabarit défini par une norme ou une spécification est une surtension (voir figure I.3). Les surtensions sont de trois natures :

- Temporaires à fréquence industrielle.
- De manœuvre.
- D'origine atmosphérique (foudre).  
Elles peuvent apparaître :
  - En mode différentiel (entre conducteurs actifs ph/ph – ph/neutre).
  - En mode commun (entre conducteurs actifs et la masse ou la terre).

### **I.3.2.1.1.Surtensions à fréquence industrielle :**

- Par définition elles sont à la même fréquence que celle du réseau (50 Hz ou 60 Hz).  
Elles sont aussi causées par les défauts d'isolement.
- Ferro résonance, Il s'agit d'un phénomène oscillatoire non linéaire rare, souvent dangereux pour le matériel, se produisant dans un circuit comportant un condensateur et une inductance saturable.
- Rupture du conducteur de neutre.
- Défauts du régulateur d'un alternateur ou d'un régleur en charge du transformateur.
- Surcompensation de l'énergie réactive.

### **I.3.2.1.2.Surtensions de manœuvre :**

Leurs conséquences sont très diverses selon le temps d'application, la répétitivité, l'amplitude, le mode (commun ou différentiel), la raideur du front de montée et la fréquence :

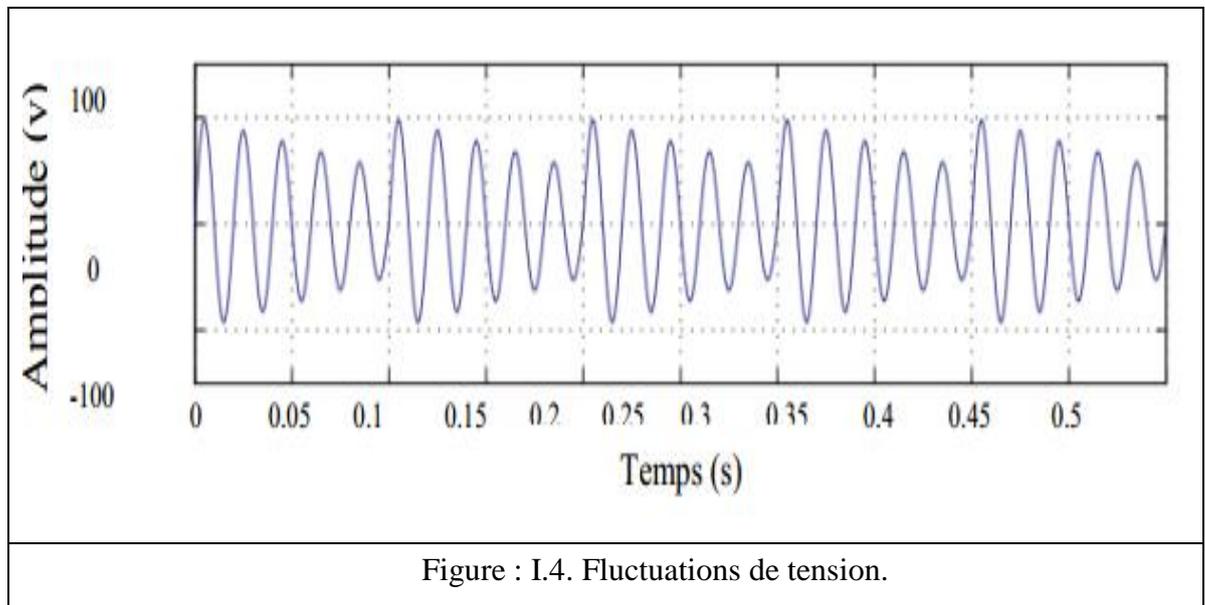
- Claquage diélectrique, cause de destruction de matériel sensible (composants électroniques...).
- Dégradation de matériel par vieillissement (surtensions non destructives mais répétées).
- Coupure longue entraînée par la destruction de matériel (perte de facturation pour les distributeurs, pertes de production pour les industriels).
- Perturbations des circuits de contrôle commande et de communication à courant faible.
- Contraintes électrodynamiques et thermiques (incendie) causées par :
  - La foudre essentiellement.
  - Les surtensions de manœuvre qui sont répétitives et dont la probabilité d'apparition est nettement supérieure à celle de la foudre et de durée plus longue.

### I.3.3. Les fluctuations rapides de tension (flickers) :

#### I.3.3.1. Définition et origine [10] :

Les variations de tension sont des variations de la valeur efficace ou de la valeur crête d'amplitude inférieure à 10 % de la tension nominale et les fluctuations de tension sont une suite de variations de tension ou des variations cycliques ou aléatoires de l'enveloppe d'une tension dont les caractéristiques sont la fréquence de la variation et l'amplitude, comme illustré sur la figure I.4.

- Les variations lentes de tension sont causées par la variation lente des charges connectées au réseau.
- Les fluctuations de tension sont principalement dues à des charges industrielles rapidement variables comme les machines à souder, les fours à arc, les laminoirs.



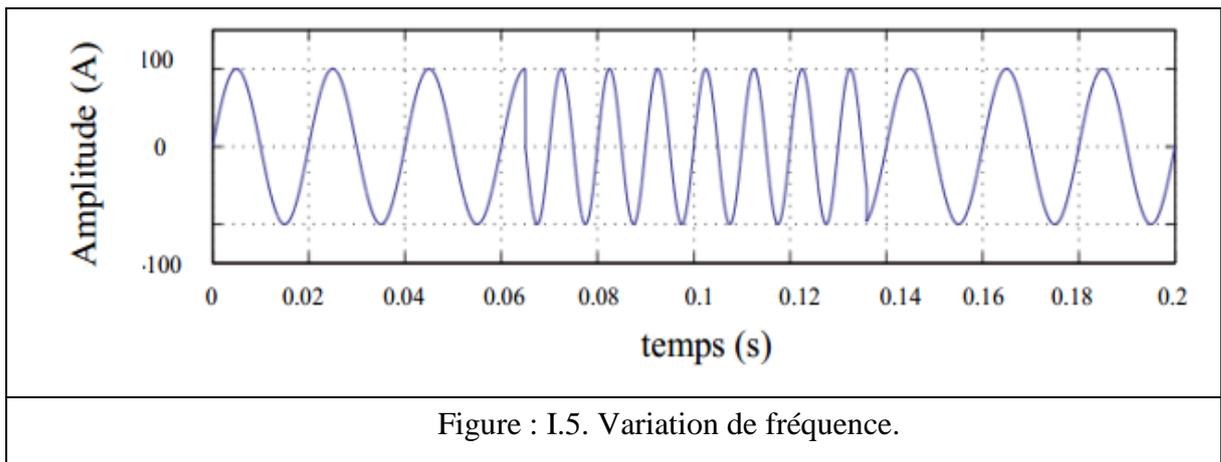
#### I.3.3.2. Conséquences, [10] :

Comme les fluctuations ont une amplitude qui n'excède pas  $\pm 10\%$ , la plupart des appareils ne sont pas perturbés. Le principal effet des fluctuations de tension est la fluctuation de la luminosité des lampes (papillotement ou flicker). La gêne physiologique (fatigue visuelle et nerveuse) dépend de l'amplitude des fluctuations, de la cadence de répétition des variations, de la composition spectrale et de la durée de la perturbation.

### I.3.4. Variation de la fréquence :

#### I.3.4.1. Définition, origine et conséquences, [9] :

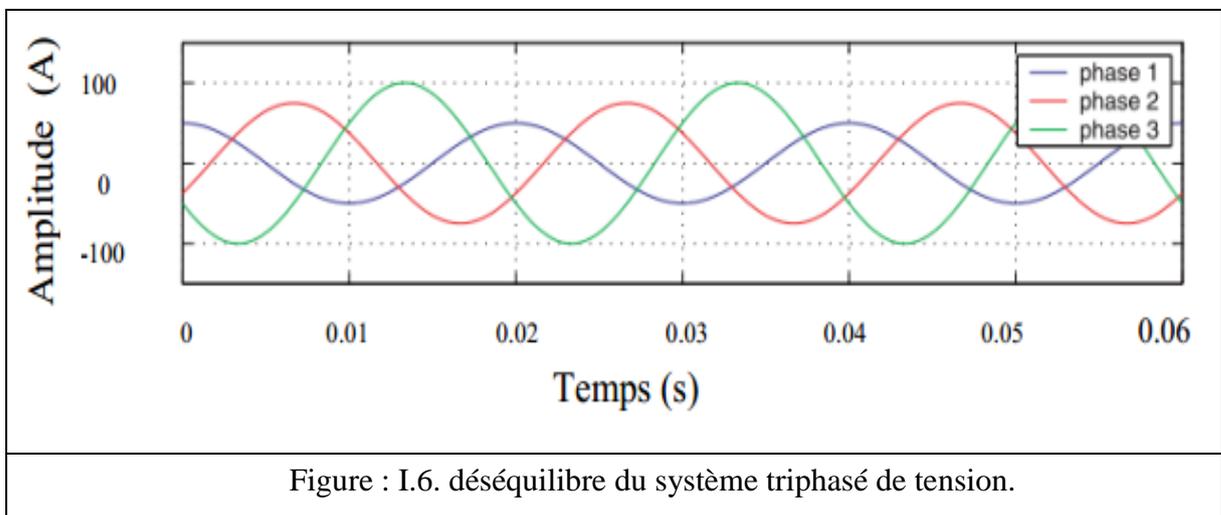
Une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome voir la figure I.10. Au niveau des réseaux de distribution ou de transport, cette variation de la fréquence est très rare et n'est présente que lors de circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle  $[50\text{Hz}] \pm 1\%$ .



### I.3.5. Les dissymétries du système de tension appelées déséquilibre, [15] :

#### I.3.5.1. Définition, origine et Conséquences :

Trois grandeurs de même nature et de même pulsation forment un système triphasé équilibré lorsqu'elles ont la même amplitude et lorsqu'elles sont déphasées de  $\pm 120^\circ$ . Lorsque les grandeurs ne vérifient pas ces conditions de phase et d'amplitude, on parle d'un système triphasé déséquilibré (figure I.6).



Les déséquilibres sont généralement dus à des charges monophasées car dans ce cas les courants absorbés sur les trois phases sont d'amplitude et/ou de phase différente, d'où un déséquilibre des trois tensions. Le déséquilibre des tensions peut également être dû à des charges triphasées, lorsque celles-ci ne sont pas symétriques.

On parle d'un déséquilibre d'amplitude lorsque les trois tensions n'ont pas la même valeur efficace, et d'un déséquilibre de phase lorsque le déphasage entre les trois phases successives n'est pas de  $120^\circ$ . Le niveau de déséquilibre est lié à la fois à la puissance et la localisation des charges perturbatrices, et à la puissance de court-circuit du réseau amont. Le bouclage des réseaux, favorable à l'obtention d'une puissance de court-circuit élevée, permet de diminuer le degré de déséquilibre.

Les déséquilibres de tension engendrent des composantes inverses de courant, qui provoquent des couples de freinage parasites et des échauffements dans les moteurs à courant alternatif. Ils peuvent également perturber le fonctionnement des dispositifs à thyristors à commande de phase.

### **I.3.6. Harmoniques et interharmoniques, [15] :**

#### **I.3.6.1. Définition et origine des harmoniques :**

La distorsion harmonique est un phénomène périodique qui désigne la superposition, sur l'onde fondamentale de [60 Hz], des ondes également sinusoïdales et de fréquences multiples de celle de la fondamentale. La décomposition en série de Fourier d'une onde quelconque permet l'obtention de ses composantes harmoniques comme l'illustre la figure I.7. Néanmoins, des inter-harmoniques ayant des fréquences non multiples de la fréquence fondamentale peuvent parfois exister. Le rang d'une harmonique est défini comme :

$$T = \frac{f_n}{n} \quad (I.3)$$

Où  $f_n$  et  $f$  désignent la fréquence de l'harmonique et la fréquence fondamentale, respectivement.

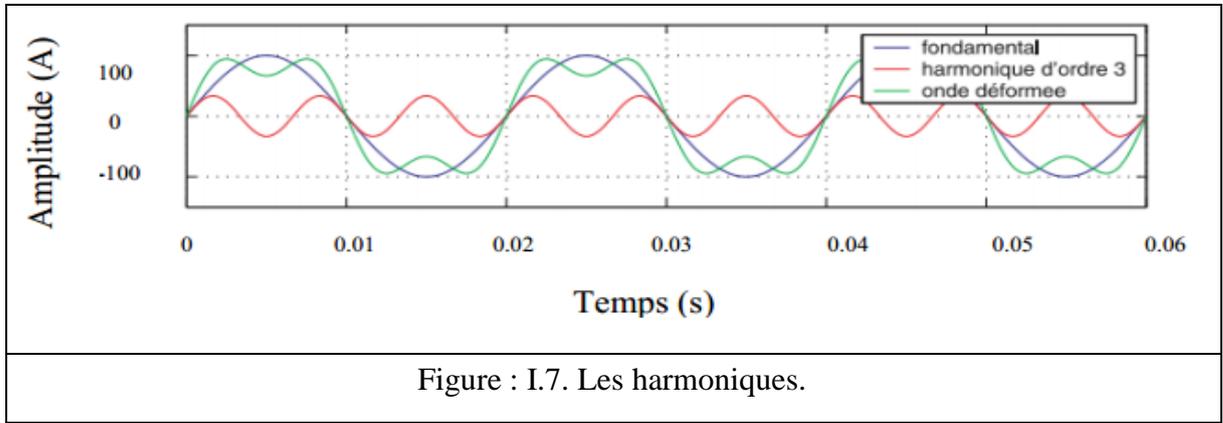


Figure : I.7. Les harmoniques.

Afin de pouvoir quantifier le contenu harmonique dans un signal  $(t)$  périodique, la Distorsion Harmonique Totale  $THD$  est le facteur le plus souvent utilisé. Le  $THD$  peut être calculé pour un courant ou une tension comme suit :

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{nmax} y_n^2}}{y_1} \quad (I.4)$$

où  $Y_n$  désigne la valeur efficace de l'harmonique de rang  $n$  dans le signal  $y(t)$  et  $nmax$  est le rang maximal considéré pour le calcul (généralement  $nmax = 40$  ou  $50$ ).

La valeur efficace du signal  $(t)$  est reliée au  $THD$  par la relation suivante :

$$Y = \sqrt{\sum_{n=2}^{nmax} y_n^2} = y_1 \sqrt{1 + TDH^2} \quad (I.5)$$

Le taux individuel  $\tau_n$  de l'harmonique de rang  $n$  est défini par :

$$\tau_n = \frac{y_n}{y_1} \quad (I.6)$$

Pour une même valeur efficace, les formes d'ondes peuvent être différentes. Par conséquent, un facteur permettant de caractériser la forme d'onde est le facteur de crête, et il est défini comme le rapport de la valeur crête du signal sur sa valeur efficace :

$$F_{CR} = \frac{\tilde{y}}{y} \quad (I.7)$$

Les harmoniques sont générées par des charges non linéaires absorbant un courant non sinusoïdal. Actuellement, les équipements à base de thyristors constituent la principale source de ces harmoniques. Ces appareils, dont les caractéristiques électriques varient avec la valeur de la tension, sont assimilables à des générateurs de courants harmoniques : appareils d'éclairage fluorescent, variateurs de vitesse, redresseurs, téléviseurs, ordinateurs, etc. Les perturbations électriques affectant l'un des quatre paramètres cités précédemment peuvent se

manifeste 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.3.6.2. Interharmoniques :**

Les interharmoniques sont superposées à l'onde fondamentale mais ne sont pas des multiples entiers de la fréquence du réseau. L'apparition des interharmoniques est en augmentation et leurs origines principales sont les convertisseurs de fréquence, les variateurs de vitesse et d'autres équipements similaires de contrôle-commande.

### **I.3.7. Solutions pour améliorer la qualité de l'énergie électrique, [10] :**

Une dégradation de qualité peut conduire à une modification du comportement, des performances ou même à la destruction des équipements et des procédés qui en dépendent avec des conséquences possibles sur la sécurité des personnes et des surcoûts économiques.

Ceci suppose trois éléments :

- un ou plusieurs générateurs de perturbations.
- un ou plusieurs récepteurs sensibles à ces perturbations.
- entre les deux un chemin de propagation de ces perturbations.

Les solutions consistent à agir sur tout ou sur une partie de ces trois éléments soit de façon globale (installation) soit de façon locale (un ou plusieurs récepteurs).

Ces solutions peuvent être mises en œuvre pour corriger un dysfonctionnement dans une installation, d'agir de façon préventive en vue du raccordement de charges polluantes, de mettre en conformité l'installation par rapport à une norme ou à des recommandations du distributeur d'énergie et de réduire la facture énergétique (réduction de l'abonnement en kVA, réduction de la consommation).

Les récepteurs n'étant pas sensibles aux mêmes perturbations et avec des niveaux de sensibilité différents, la solution adoptée, en plus d'être la plus performante d'un point de vue technico-économique, doit garantir un niveau de qualité de l'énergie électrique sur mesure et adapté au besoin réel.

Un diagnostic préalable effectué par des spécialistes, de façon à déterminer la nature des perturbations contre lesquelles il faut se prémunir (par ex. les remèdes sont différents selon la durée d'une coupure), est indispensable. Il conditionne l'efficacité de la solution retenue.

L'étude, le choix, la mise en œuvre et la maintenance (qui assure l'efficacité dans le temps) de solutions doivent aussi être effectués par des spécialistes.

L'utilité même de choisir une solution et de la mettre en œuvre dépend :

- Du niveau de performance souhaité :

Un dysfonctionnement peut être inadmissible s'il met en jeu la sécurité des personnes (hôpitaux, balisage des aéroports, éclairages et systèmes de sécurité des locaux recevant du public, auxiliaires de centrale...).

- Des conséquences financières du dysfonctionnement :

Tout arrêt non programmé, même très court, de certains procédés (fabrication de semi-conducteurs, sidérurgie, pétrochimie...) conduit à une perte ou à une production de mauvaise qualité.

- Du temps de retour sur investissement souhaité :

C'est le rapport entre les pertes financières (matières premières, pertes de production...) provoquées par la non-qualité de l'énergie électrique et le coût (étude, mise en œuvre, fonctionnement, maintenance) de la solution.

D'autres critères tels que les habitudes, la réglementation et les limites de perturbations imposées par le distributeur sont aussi à prendre en compte.

### **I.3.7.1. Non symétrie (Déséquilibres) de la tension :**

Puisque les courants déséquilibrés dans un réseau électrique basse tension résultent généralement des charges monophasées et biphasées mal réparties, les solutions sont :

- Equilibrer les charges monophasées sur les trois phases.
- Diminuer l'impédance du réseau en amont des générateurs de déséquilibre en augmentant les puissances des transformateurs et la section des câbles.
- Prévoir une protection adaptée des machines.
- Augmentation de la puissance de court-circuit.
- Dispositif de rééquilibrage.
- Modification de l'architecture du réseau.
- Compensation de la puissance réactive.

### **I.3.7.2.Creux de tension et coupures :**

Les tensions perturbatrices dans un réseau électrique basse tension sont principalement les creux de tension qui sont généralement causées par la circulation des courants harmoniques et/ou déséquilibrés.

Pour dépolluer les réseaux électriques de ces perturbations, on peut limiter la circulation des courants perturbateurs en utilisant les solutions traditionnelles présentées précédemment dans le cas des perturbations de non symétrie de tension.

Quant à la solution la plus fréquente dans les milieux sensibles (hôpitaux, sites industriels...etc.) est d'utiliser des groupes électrogènes qui se substituent au réseau électrique.

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

La solution moderne pour la compensation des creux de tension se base sur l'utilisation de dispositifs de compensation à réserve d'énergie comme les ASI (Alimentation Sans Interruption). Ces dispositifs sont intercalés en série entre le réseau polluant et l'installation à désensibiliser pour assurer une fourniture de l'énergie électrique même pendant les creux de tension ou les coupures brèves. Le problème est la limitation en puissance de ces dispositifs et leur autonomie qui n'est pas toujours adaptée à la durée des creux de tension ou aux coupures brèves.

### **I.3.7.3.Harmoniques :**

Trois orientations sont possibles pour les supprimer, ou au moins réduire leur influence :

A. Réduction des courants harmoniques générés :

- Inductance de ligne.
- Utilisation de redresseurs dodécaphasés.
- Appareils à prélèvement sinusoïdal.

Cette méthode consiste à utiliser des convertisseurs statiques dont l'étage redresseur exploite la technique de commutation MLI qui permet d'absorber un courant sinusoïdal.

**b. Modification de l'installation :**

- Immuniser les charges sensibles à l'aide de filtres.
- Augmenter la puissance de court-circuit de l'installation.
- Déclasser des équipements.
- Confiner les charges polluantes.

En premier, il faut raccorder les équipements sensibles aussi près que possible de leur source d'alimentation. Ensuite, il faut identifier puis séparer les charges polluantes des charges sensibles, par exemple en les alimentant par des sources séparées ou par des transformateurs dédiés. Tout cela en sachant que les solutions qui consistent à agir sur la structure de l'installation sont, en général, lourdes et coûteuses.

Protections et surdimensionnement des condensateurs.

**c. Filtrage :**

- Le filtrage passif.
- Le filtrage actif.
- Le filtrage hybride.

**Cas particulier des disjoncteurs :**

Les harmoniques peuvent provoquer des déclenchements intempestifs des dispositifs de protection, pour les éviter il convient de bien choisir ces appareils.

**Le déclasserment :**

Cette solution, applicable à certains équipements, est une réponse facile et souvent suffisante à la gêne occasionnée par les harmoniques.

**I.3.7.4.Surtensions :**

Obtenir une bonne coordination d'isolement c'est réaliser la protection des personnes et des matériels contre les surtensions avec le meilleur compromis technico-économique. Elle nécessite de :

- Connaître le niveau et l'énergie des surtensions pouvant exister sur le réseau.
- Choisir le niveau de tenue aux surtensions des composants du réseau permettant de satisfaire aux contraintes.
- Utiliser des protections quand cela est nécessaire.
- En fait, les solutions à retenir dépendent du type de surtensions rencontrées.

**I.3.4.7.1.Surtensions à fréquence industrielle :**

- Mettre hors service tout ou une partie des condensateurs en période de faible charge.
- Eviter de se trouver dans une configuration à risque de ferrorésonance ou introduire des pertes (résistances d'amortissement) qui amortissent le phénomène.

**I.3.7.4.2.Surtensions de manœuvre :**

- Limiter les transitoires provoqués par la manœuvre de condensateurs, par l'installation de self de choc, résistances de pré insertion.
- Placer des inductances de ligne en amont des convertisseurs de fréquence pour limiter les effets des surtensions transitoires.
- Utiliser des disjoncteurs de branchement différentiels et sélectif.

**I.3.7.4.3.Surtensions atmosphériques :**

- Protection primaire : elle protège le bâtiment et sa structure contre les impacts directs de la foudre (paratonnerres, cages maillées (Faraday), câbles de garde / fil tendu).
- Protection secondaire : elle protège les équipements contre les surtensions atmosphériques consécutives au coup de foudre. Des parafoudres (de moins en moins des éclateurs) sont installés sur les points des réseaux HT et en MT particulièrement exposés et à l'entrée des postes MT/BT.

**I.3.7.5.Fluctuations de la tension :**

Les fluctuations produites par les charges industrielles peuvent affecter un grand nombre de consommateurs alimentés par la même source. L'amplitude de la fluctuation dépend du rapport entre l'impédance de l'appareil perturbateur et celle du réseau d'alimentation. Les solutions consistent à :

- Changer de mode d'éclairage : Les lampes fluorescentes ont une sensibilité plus faible que les lampes à incandescence.
- Installer une alimentation sans interruption : Elle peut être économique lorsque les utilisateurs perturbés sont identifiés et regroupés.
- Modifier le perturbateur: Le changement du mode de démarrage de moteurs à démarrages fréquents permet par exemple de réduire les surintensités.

- Modifier le réseau :

Augmenter la puissance de court-circuit en raccordant les circuits d'éclairage au plus près du point d'alimentation.

Eloigner « électriquement » la charge perturbatrice des circuits d'éclairage en alimentant la charge perturbatrice par un transformateur indépendant.

- Utiliser un compensateur automatique: Cet équipement réalise une compensation en temps réel phase par phase de la puissance réactive. Le flicker peut être réduit de 25 % à 50 %.

- Placer une réactance série : En réduisant le courant appelé, une réactance en aval du point de raccordement d'un four à arc peut réduire de 30 % le taux de flicker.

#### **I.4.CONCLUSION :**

Les problèmes de la qualité de l'énergie sont multiples et de nature différentes. Plus que jamais la question de la qualité d'énergie représente un domaine séparé. Depuis les lignes de transmission de la haute tension jusqu'aux appareils domestiques.

Les différents types de perturbations qui dégradent la qualité d'énergie électrique ainsi leurs origines. Comme nous avons pu le constater, les creux de tension, les harmoniques et le non symétrie (déséquilibre) de tension ont des effets néfastes sur les équipements électriques. Ces perturbations ont des conséquences différentes selon le contexte économique et le domaine d'application : de l'inconfort à la perte de l'outil de production, à la dégradation du fonctionnement jusqu'à la destruction totale de ces équipements, voire même à la mise en danger des personnes.

En dernière analyse, tout électricien est obligé aujourd'hui à connaître les différentes perturbations de la qualité d'énergie, soit pour prendre les bonnes dispositions lors de l'installation de matériels pollueurs, soit pour concevoir une installation nouvelle en toute connaissance de cause.

# Chapitre II

## Etude De la pollution harmonique

## **II.1.INTRODUCTION :**

Généralement, le distributeur d'énergie délivre l'énergie électrique sous forme d'un système triphasé de tensions sinusoïdales. Les paramètres caractéristiques de ce système sont la fréquence, l'amplitude, la forme d'onde, qui doit être sinusoïdale et la symétrie du système triphasé. Mais depuis quelques années, avec l'évolution technologique des composants d'électronique de puissance les distributeurs d'énergie rencontrent plusieurs problèmes liés à l'accroissement du nombre de convertisseurs statiques raccordés aux réseaux de distribution d'énergie. En effet, ces convertisseurs sont des sources polluantes qui absorbent des courants non sinusoïdaux et consomment pour la plupart de la puissance réactive.

Les harmoniques générés sont des perturbations permanentes affectant la forme d'onde du courant du réseau. Ces perturbations se superposent à l'onde fondamentale. Elles ont donc pour conséquence de modifier l'onde de tension ou de courant ce qui se traduit par une dégradation du facteur de puissance et/ou par la génération de courants et de tensions alternatives de fréquence différente de celle du fondamental.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les sources des harmoniques, l'influence du raccordement des convertisseurs statiques sur les réseaux électriques et leurs environnements et ensuite les normes.

## **II.2.HARMONIQUES & INTER-HARMONIQUES, [16] :**

Les harmoniques sont des tensions ou des courants sinusoïdaux dont la fréquence est un multiple entier de la fréquence du réseau en général, nous différencions 2 types d'harmoniques :

- Les harmoniques de courant dus à la présence de charges non linéaires telles que les appareils d'éclairage fluorescents, les fours à arc, les redresseurs, les variateurs électroniques de vitesse, qui peuvent être identifiés à une source de courant harmonique.
- Les harmoniques de tension issus du réseau lui-même dus, en général, à des petites imperfections de construction des bobinages des différents matériels du réseau eux-mêmes, tels que les machines tournantes et les transformateurs qui, pratiquement, ne délivrent pas une tension purement sinusoïdale. Ces harmoniques peuvent être identifiés à une source de tension harmonique (Figure. II.1).

La tension du réseau peut contenir des composantes fréquentielles qui ne sont pas des multiples entiers du fondamental. Ce type de composantes sont, communément, appelées inter-harmoniques. Elles peuvent apparaître soit sous forme de fréquence discrète, soit sous

forme de spectres à large bande. Leurs sources principales sont les cyclo-convertisseurs, les convertisseurs de fréquence, les machines synchrones, les machines à souder et les fours à arc.

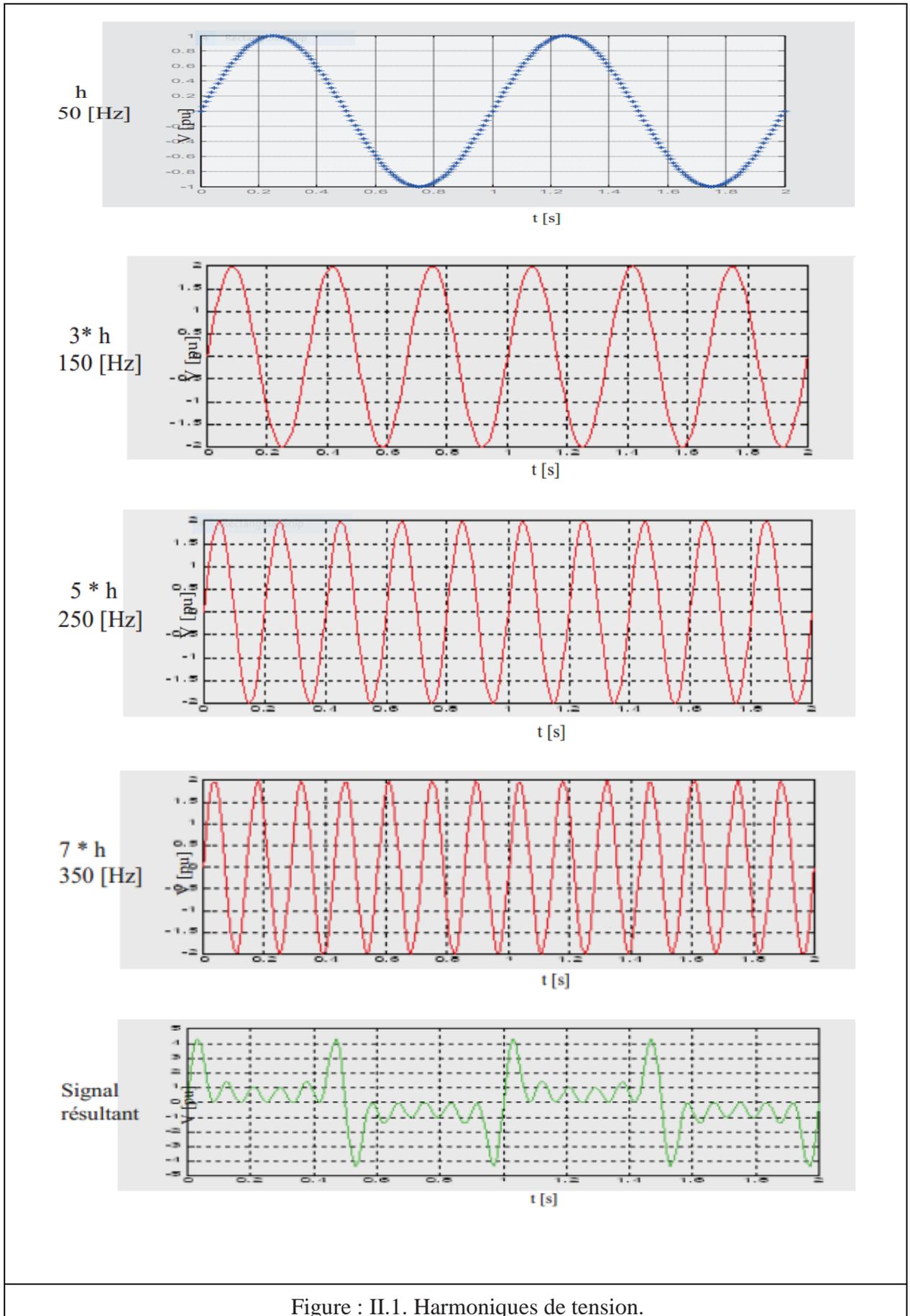


Figure : II.1. Harmoniques de tension.

## II.3.PERTURBATIONS HARMONIQUES :

### II.3.1.Nature physique du phénomène :

La plupart des appareils électriques raccordés à un réseau alternatif nécessitent, pour leur bon fonctionnement, une alimentation sinusoïdale 50 [Hz] dans la majorité des pays au monde et 60 [Hz] dans quelques pays tels que les USA, le Japon,... En Algérie, par exemple, les installations industrielles consommatrices absorbent, théoriquement, un courant sinusoïdal à 50 [Hz]. Les charges dites passives, comme les résistances de chauffage ou les condensateurs absorbent, elles-aussi, un courant sinusoïdal à 50 [Hz]. Par contre, certains appareils absorbent un courant périodique, mais non sinusoïdal [17]. Le signal, ainsi obtenu, sera déformé et sera caractérisé par la superposition d'un certain nombre, juxtaposé, d'onde sinusoïdale de fréquence  $f_h$  dite fréquence multiple de la fréquence de l'harmonique fondamentale  $f$  reliées, entre-elles, par :

$$f_h = hf = 50h \quad (\text{II.1})$$

Avec  $h$  et le rang harmonique d'ordre 1, 2, 3...

Ils produisent sur le réseau qui les alimente une déformation de la tension, qui n'est alors plus sinusoïdale. On dit qu'ils sont non linéaires et qu'ils émettent des courants harmoniques vers le réseau. La présence d'appareils non linéaires sur un réseau électrique peut entraîner des dysfonctionnements des autres appareils raccordés à proximité.

Ces signaux de tension et/ou de courant, ainsi déformés, peuvent être traités et analysés par la fameuse technique des séries de Fourier ou par l'analyse spectrale de Fourier. Elle consiste à décomposer un signal périodique de forme quelconque en une somme de signaux sinusoïdaux dont chacun est dit harmonique de fréquence  $f_h$ , définie par l'équation (II.1). Le problème des harmoniques se traite en examinant le réseau électrique soumis de façon indépendante, à chacune de ces fréquences harmoniques. On octroie à cette technique le principe de superposition, malgré le non linéarité des sources provoquant les déformations dites harmoniques.

### II.3.2.Identification des harmoniques, [17] :

Les problèmes d'harmoniques peuvent se traduire de différentes façons. Certains sont spectaculaires. La manifestation, la plus fréquente, est la destruction des condensateurs de compensation de l'énergie réactive. Cet effet est, généralement, facile à détecter car, d'une part, il se produit très rapidement après la mise en service des condensateurs. De plus, il est toujours associé à une modification récente de l'installation. Ceci se produit, le plus souvent,

en cas de modification de la puissance des batteries de compensation d'énergie réactive. Cependant, il peut, également, apparaître à la mise hors service ou parfois en service d'un transformateur en parallèle avec un groupe d'autres transformateurs. L'installation de nouveaux convertisseurs (comme les variateurs de vitesse) ou la modification de technologie des convertisseurs déjà en place est aussi une cause d'apparition du phénomène. Etant le siège de courants harmoniques très importants, dus à un phénomène de résonance, les installations, dans ce cas, ont une réaction plus ou moins rapide selon l'acuité du phénomène. Quelle que soit la cause, une mesure des courants harmoniques permet, aisément, de confirmer le diagnostic. Ce ne sont pas toujours les condensateurs qui sont les premiers endommagés. Les disjoncteurs et matériels de ligne sont, également, soumis aux courants harmoniques. Il n'est pas exceptionnel, dans ce cas, de constater la destruction d'un disjoncteur ou d'un contacteur. De même, un câble peut chauffer au point de détruire son isolant ou encore de prendre feu. Ce type de phénomène, à court terme, est aisément décelable, car il est toujours lié à la présence de très forts courants harmoniques. Mais, si certains effets sont assez caractéristiques, d'autres ont des conséquences qui sont, à moyen ou à long terme, plus insidieuses. Ces derniers sont difficiles à identifier de façon formelle et ce pour 3 principales raisons :

- La simultanéité de plusieurs perturbations sur le réseau est fréquente. La présence d'harmonique est souvent associée à la présence de surtensions transitoires dues, par exemple, aux commutations des thyristors d'un convertisseur.
- Les effets différés ne surviennent pas forcément au moment de la contrainte maximale.
- La corrélation avec le phénomène responsable est donc difficile, voire, parfois impossible.
- La sensibilité réelle des appareils, qui d'ailleurs est aujourd'hui assez mal connue, varie selon les modèles.

Dans ces conditions, l'identification de la cause du phénomène ne peut se faire que par la mesure des tensions harmoniques présentes sur le réseau. On peut les mesurer à l'aide d'un voltmètre sélectif ou encore à l'aide d'un analyseur harmonique de tensions.

Une première méthode consiste à mesurer le taux de distorsion harmonique. Ce critère est donné par la plupart des analyseurs harmoniques actuels et même certains multimètres. Il représente une bonne approximation de la contrainte globale subie par les appareils raccordés au réseau. La mesure consiste, ensuite, à rapprocher les valeurs contenues dans le tableau II.1. Ce tableau est issu de l'expérience des experts appelés à traiter les problèmes d'harmoniques chez les utilisateurs. Il constitue une référence qu'il faut interpréter avec un certain recul, en fonction de la situation réelle. Dans l'avenir, ces valeurs sont susceptibles d'évoluer selon les technologies et la sensibilité des matériels. Une autre méthode de mesure consiste à

déterminer la valeur efficace « vraie » du courant (TRMS) circulant dans les conducteurs alimentant les batteries de compensation d'énergie réactive, à l'aide d'un multimètre et d'une pince ampérométrique. On compare ensuite la valeur lue à la puissance réactive des condensateurs en service donnée par :

$$I1 = \frac{103 Q[kVAr]}{\sqrt{3u1[v]}} \quad (II.2)$$

Lorsque la valeur du courant mesurée dépasse 1.3 fois la valeur théorique du courant à 50 [Hz], il faut suspecter un problème d'harmoniques sur le réseau.

Tableau : II.1. Conséquences d'une exposition à long terme aux harmoniques.

Taux de distorsion harmonique en tension	Conséquences d'une exposition à long Terme
TDH < 5%	Problèmes inexistant dans la plupart des cas.
5% < TDH < 7%	Des problèmes peuvent survenir sur des matériels, anormalement, sensibles.
7% < TDH < 10%	Des problèmes commencent à apparaître sur des appareils de conception plus robuste.
TDH > 10%	Les effets à long terme sont, pratiquement, certains.

### II.3.3. Définitions & aspects théoriques des phénomènes :

#### II.3.3.1. Harmoniques d'un signal périodique, [17] :

La forme des ondes de courant et de tension relevée sur les réseaux industriel et tertiaire s'éloigne assez de la circulation sur le réseau de courants non sinusoïdaux. La question pratique est de savoir quel impact a, l'ensemble de tous les courants non sinusoïdaux, sur la tension. On sait répondre en partie à cette question : comme tous les éléments du réseau ont un comportement linéaire, l'effet sur la tension de l'ensemble des courants est la superposition de l'effet qu'aurait chaque courant individuellement. Reste un problème de taille : quel effet, un courant donné, a-t-il sur la tension ? On sait répondre quand le courant est sinusoïdal, avec les techniques qui utilisent les notions d'impédance complexe ou de diagramme de Fresnel. Mais, cela paraît bien plus compliqué car les formes de courant peuvent être très différentes de la sinusoïde pure. Pourtant, la solution consiste à utiliser la décomposition en série de Fourier qui s'appuie sur le fait que tout signal périodique peut être représenté par une somme d'ondes sinusoïdales : une onde à la fréquence fondamentale de 50 [Hz] et des ondes de fréquence multiple de la fréquence fondamentale (les harmoniques).

Alors, quel que soit le courant injecté, grâce à la linéarité du comportement du réseau, on est amené à examiner l'effet d'un courant sinusoïdal injecté dans un réseau (courant et tension dans chaque élément). L'effet global s'obtiendra en superposant chaque effet élémentaire. Cette décomposition, dite harmonique, est un artifice mathématique très commode. Ceux qui l'utilisent ont été amenés à parler des harmoniques comme d'un phénomène physique à part entière. Dans la réalité, on observe seulement des signaux non sinusoïdaux.

Si l'on n'avait pas connu cette méthode, on aurait eu à résoudre, dans le domaine temporel, des équations du type :

$$v(t) = R(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (\text{II.3})$$

Ce qui est faisable, mais plus laborieux. Grâce à la décomposition en série de Fourier, ou décomposition harmonique, on traite des équations algébriques du type :

$$V = RI + jL\omega I = ZI \quad \text{Avec} \quad Z = R + j\omega L \quad (\text{II.4})$$

Où le paramètre temps n'apparaît pas de façon explicite. Il s'y substitue par le terme :

$$\omega = 2\pi f \quad (\text{II.5})$$

D'où la dénomination de domaine fréquentiel. L'intérêt de la décomposition harmonique est de faciliter les calculs dans l'analyse et la synthèse des réseaux. Ainsi, on peut dissocier l'étude fondamentale de celle relative aux fréquences harmoniques. On traite le problème global en autant de problèmes linéaires qu'il y en a de rangs harmoniques.

$$U_1 = Z_1 I_1 \quad (\text{II.6})$$

$$U_h = Z_h I_h \quad (\text{II.7})$$

Il faut noter que  $U_h$ ,  $Z_h$  et  $I_h$  ont des grandeurs vectorielles qu'on peut décrire par leur amplitude et leur phase. Grâce à cette décomposition, l'analyse des impédances rencontrées par les courants harmoniques peut être représentée sous la forme amplitude ou phase en fonction de la fréquence. La connaissance des vecteurs de courant et des impédances du réseau permet de déterminer les vecteurs de tension harmonique en chaque point du réseau.

### II.3.3.2. Décomposition en série de Fourier, [17] :

Le signal  $s(t)$  peut représenter un courant ou une tension. Il est périodique de période  $T$ , de fréquence  $f = 1/T$  et de pulsation  $\omega$ . Ce signal  $s(t)$  peut se décomposer de la façon suivante :

$$s(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} [a_h \cos(\omega h t) + b_h \sin(\omega h t)] \quad (\text{II.8})$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T s(t) dt \quad \text{Avec } h = 0 \quad (\text{II.9})$$

$$a_h = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) \cos(\omega h t) dt \quad \text{Avec } h \geq 1 \quad (\text{II.10})$$

$$b_h = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) \sin(\omega h t) dt \quad \text{Avec } h \geq 1 \quad (\text{II.11})$$

Sous forme compacte, l'équation (II.8) peut s'écrire :

$$s(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} c_h \sin(\omega h t + \theta_h) \quad (\text{II.12})$$

$$\text{Avec } c_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2} \quad \text{et } \theta = \arctan \frac{a_h}{b_h}$$

Le terme  $[a_h \cos(\omega h t) + b_h \sin(\omega h t)]$  ou  $c_h \sin(\omega h t + \theta_h)$  est l'harmonique de rang  $h$ . La grandeur  $c_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2}$  est l'amplitude de l'harmonique. Il faut noter qu'on utilise très souvent le terme amplitude pour désigner la valeur efficace harmonique donnée par :

$$c_{effh} = \frac{c_h}{\sqrt{2}} \quad (\text{II.13})$$

$C_1$  est l'amplitude fondamentale. La grandeur  $\theta_h$  est la phase de l'harmonique de rang  $h$  et  $a_0$  est la composante continue du signal. Jusqu'à présent, les appareils générant des harmoniques ont, en grande majorité, un spectre d'émission inférieur à 2500 [Hz]. C'est la raison pour laquelle le domaine d'étude des harmoniques s'étend, généralement, de 100 à 2500 [Hz] correspondant aux rangs  $h$  compris entre 2 et 50 ( $2 \leq h \leq 50$ ).

### II.3.3.3. Analyse d'un signal, [18] :

Un procédé couramment utilisé pour décrire un signal est l'évaluation de sa valeur efficace. La valeur efficace d'un signal  $s(t)$  périodique de période  $T$  est donnée par :

$$S_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T s^2(t) dt} \quad (\text{II.14})$$

La valeur efficace d'un signal déformé tient compte de la présence de toutes les composantes harmoniques, interharmoniques et de la composante continue. Lorsqu'un signal comporte des composantes harmoniques, sa valeur efficace est, donc, différente de la valeur

efficace du signal fondamental. Il est, alors, possible d'évaluer grossièrement la déformation du signal en comparant la valeur efficace de la composante fondamentale avec celle du signal.

**II.3.3.4. Pourcentage d'harmoniques :**

C'est le pourcentage entre la valeur efficace harmonique et celle du fondamental.

$$\tau_h[\%] = 100 \cdot \frac{s_{eff\ h}}{s_{eff}} \tag{II.15}$$

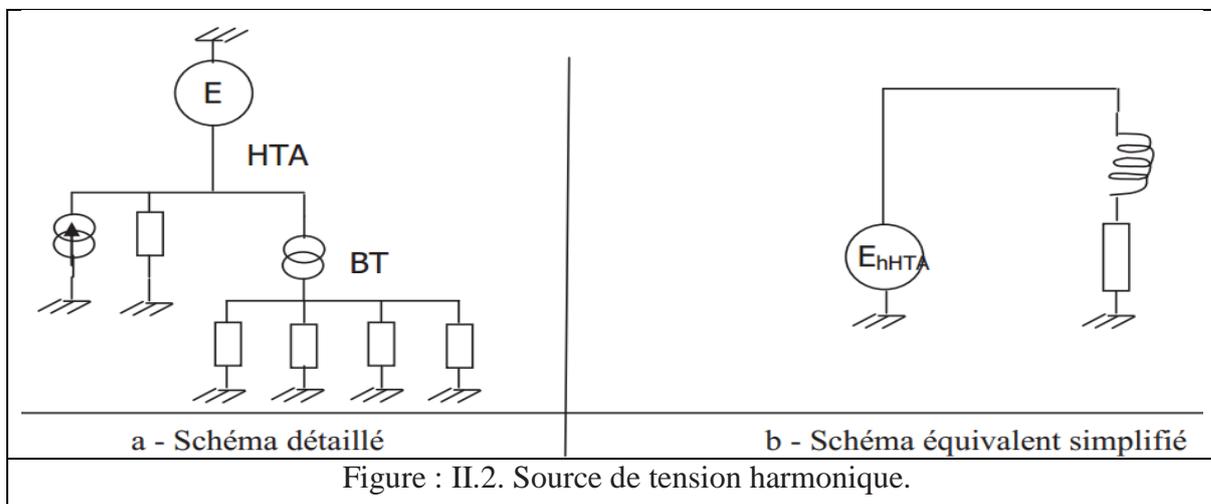
**II.3.4. Harmoniques de courant & de tension :**

**II.3.4.1. Courant harmonique, [18] :**

Dans la plupart des cas, les harmoniques présents dans les réseaux électriques proviennent de la prolifération de charges non linéaires. On dit qu'une charge est non linéaire quand, soumise à une tension sinusoïdale à 50 [Hz], elle n'absorbe pas un courant purement sinusoïdal à 50 [Hz]. Ces charges se comportent, approximativement, comme des sources de courants harmoniques, c'est-à-dire que le courant harmonique est fixé par la charge et non par l'impédance ou la tension du réseau. Une charge passive est une charge ne comportant pas de systèmes de commutation rapide, autorisant un découpage de l'onde fondamentale de 50 [Hz], contrairement aux charges actives. Les charges actives utilisent toujours des commutateurs électroniques de puissance.

**II.3.4.2. Tension harmonique, [17] :**

On peut parler de source de tension pour décrire l'état d'un réseau perturbé par une forte charge non linéaire. En effet, le raccordement d'un récepteur de faible puissance ne modifie presque pas le niveau préexistant (Figure.II.2).



### II.3.4.3. Loi d'Ohm généralisée & impédance harmonique, [18] :

L'impédance présentée dépend de la fréquence du réseau considéré. On peut définir en tout point d'un réseau une impédance harmonique  $Z_h$ , qui dépend du rang harmonique  $h$  considéré. Elle représente la mise en parallèle de toutes les lignes qui convergent vers ce point. Les courants harmoniques émis par une charge perturbatrice se partagent entre les différentes lignes. Le produit des harmoniques de courant provenant des charges non linéaires par l'impédance harmonique du réseau, en un point donné du réseau, crée des harmoniques de tension déterminés par la loi d'Ohm généralisée (Figure.II.4) :

$$V_h = Z_h I_h \quad (\text{II.16})$$

### II.3.5. Distorsion harmonique, [17] :

Plusieurs expressions peuvent être utilisées pour quantifier la déformation d'un signal.

#### II.3.5.1. Taux harmonique de rang $h$ : THH

On caractérise la déformation par le taux harmonique  $S_h(\%)$  de rang  $h$ , défini par :

$$THH = S_h(\%) = \frac{C_h}{C_1} 100 = 100 \frac{S_{eff,h}}{S_{eff}} = \tau_h[\%] \quad (\text{II.17})$$

$C_h$  représente la composante harmonique de rang  $h$  et  $C_1$  représente la composante fondamentale.

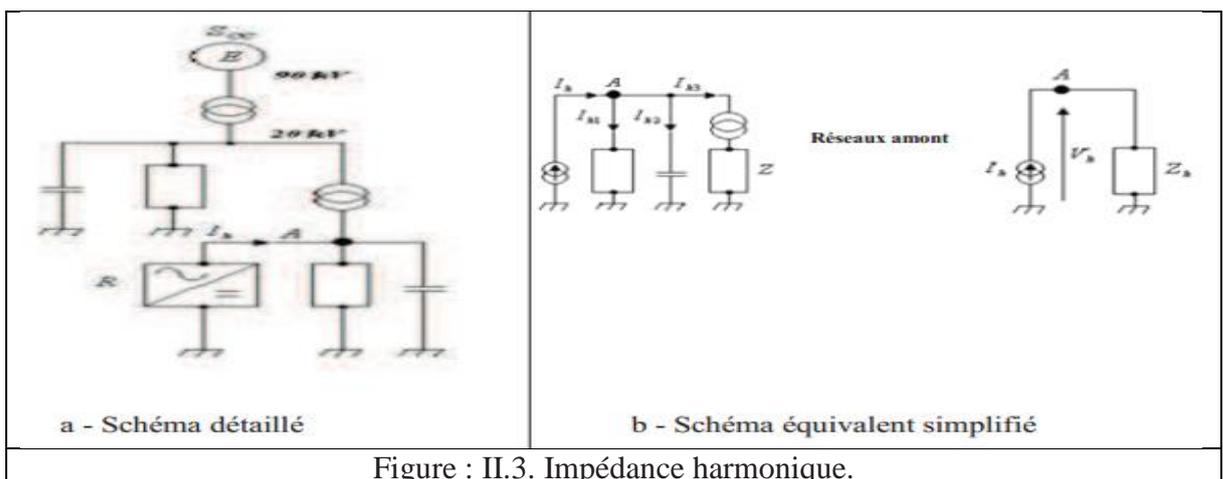


Figure : II.3. Impédance harmonique.

#### II.3.5.2. Taux global de distorsion harmonique : THD :

Il donne une mesure de l'influence thermique de l'ensemble des harmoniques. Il est donné par le rapport de la valeur efficace des harmoniques à celle de la valeur efficace du fondamental.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} c_h^2}}{c_1} \quad (\text{II.18})$$

Selon la sensibilité des appareils, des rangs plus ou moins élevés, sont pris en compte. La tendance actuelle dans les normes est de considérer les harmoniques jusqu'au rang  $h = 50$ . Précisons que, dans les normes CEI, on trouve une autre définition du *THD*.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} c_h^2}}{S_{eff}} \quad (\text{II.19})$$

Bien qu'elle donne une mesure analogique des signaux plus aisée, cette notion est de moins en moins utilisée. En général, les harmoniques pris en compte dans un réseau électrique sont inférieurs à 2500 [Hz]. Ceci correspond au domaine des perturbations basses fréquences au sens de la normalisation.

Les harmoniques de fréquence plus élevée sont fortement atténués par l'effet de peau et par la présence des inductances de lignes. De plus, les appareils générant des harmoniques ont, en grande majorité, un spectre d'émission inférieure à 2500 [Hz]. C'est la raison pour laquelle le domaine d'étude des harmoniques s'étend, généralement, de 100 à 2500 [Hz], correspondant aux rangs  $2 \leq h \leq 50$ .

### II.3.5.3. Taux de distorsions pondérées : TDP

Afin de tenir compte de la spécificité de certains types de matériels tels que les condensateurs, les inductances ou les moteurs, on peut utiliser les *TDP* en tension. Ils sont définis en fonction de la tension réduite  $u_h = \frac{U_h}{U_1}$  [pu].

- Pour les condensateurs :

$$TDP_{Xe} = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} h^2 u_h^2} \quad (\text{II.20})$$

- Pour les inductances :

$$TDP_{Xe} = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} \frac{u_h^2}{h^2}} \quad (\text{II.21})$$

- Pour les moteurs :

$$TDP_M = \sqrt{\sum_{h=1}^{13} \frac{u_h^2}{h^2}} \quad (\text{II.22})$$

**II.3.6.Facteur de puissance, [19] :**

Pour un système monophasé comportant une source de tension, une ligne et une charge, les expressions instantanées du courant simple de charge  $i(t)$  et de sa tension simple  $v(t)$  peuvent s'écrire sous la forme :

$$i(t) = \sum_{h=1}^{\infty} I_h \sin(h\omega t + \alpha_h) \quad (\text{II.23})$$

Avec  $\alpha_h$ : déphasage du courant harmonique de rang  $h$ .

$$v(t) = \sum_{h=1}^{\infty} V_{sh} \sin(h\omega t + \beta_h) \quad (\text{II.24})$$

Avec  $\beta_h$ : déphasage de la tension harmonique de rang  $h$ .

Les valeurs efficaces de la tension et du courant sont :

$$V_{eff} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} \quad (\text{II.25})$$

Avec  $V_h$  : Valeur efficace de la tension harmonique d'ordre  $h$ .

$$I_{eff} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (\text{II.26})$$

Avec  $I_h$  : Valeur efficace du courant harmonique d'ordre  $h$ .

Dans le cas d'un réseau triphasé équilibré, la puissance apparente est définie par :

$$S = 3V_{eff} I_{eff} = 3 \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (\text{II.27})$$

La puissance active est définie par :

$$P = 3 \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos(\varphi_h) \quad (\text{II.28})$$

Avec  $\varphi_h = \beta_h - \alpha_h$

Le facteur de puissance  $FP$  peut être exprimée par :

$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos(\varphi_h)}{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}} \quad (\text{II.29})$$

Dans le cas où la tension du réseau est sinusoïdale, le facteur de puissance devient :

$$F_p = \cos \varphi_1 \tag{II.30}$$

La puissance réactive d'un système triphasé équilibré, résultant du déphasage entre les grandeurs fondamentales du courant et de la tension est alors :

$$Q = 3V_1 I_1 \sin \varphi_1 \tag{II.31}$$

Pour tenir compte de la participation des harmoniques dans la puissance apparente, nous utilisons la notion de la puissance déformante D :

$$D = 3V_1 \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \tag{II.32}$$

La puissance apparente, pour un système triphasé équilibré pollué par les harmoniques, peut s'écrire :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \tag{II.33}$$

Le facteur de puissance  $F_p$ , dans ce cas, sera donc :

$$F_p = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \tag{II.34}$$

Le facteur de puissance est dégradé par la présence des harmoniques. La figure II.5 montre le diagramme de Fresnel tridimensionnel, mettant en relief l'argument du facteur de puissance pour les systèmes triphasés équilibrés pollués.

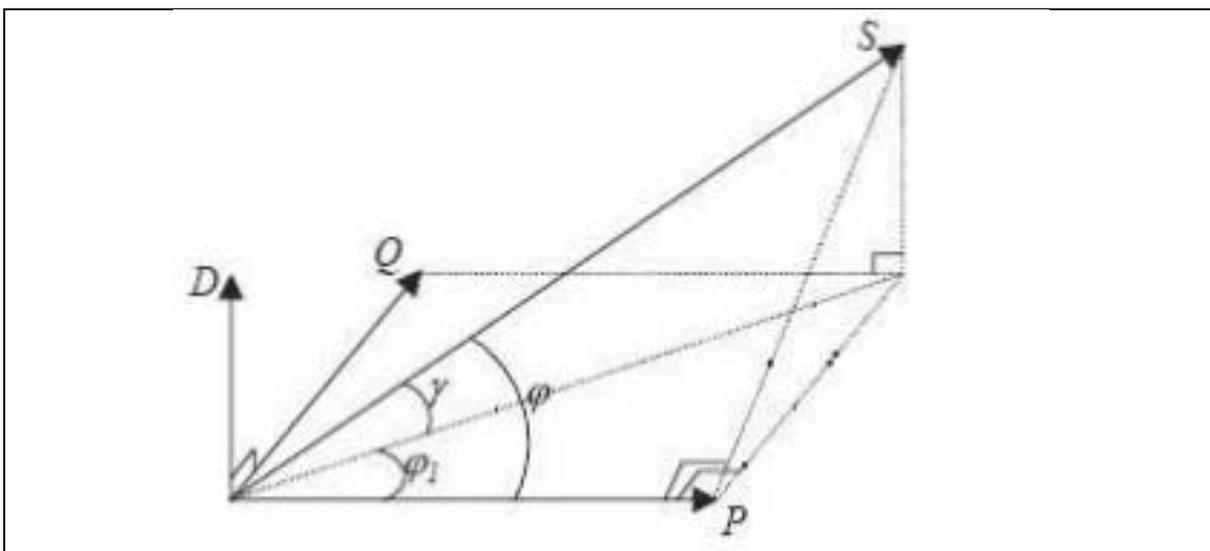


Figure : II.4. Diagramme des puissances.

### II.3.7. Harmoniques dans un système triphasé :

#### II.3.7.1. Système triphasé équilibré, [18] :

Si on alimente un système de charge triphasé équilibré par un système de tensions triphasé équilibré, il s'écoule des courants équilibrés  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$  (respectivement sur les phase  $a$ ,  $b$  &  $c$ ) tel que :

$$I_b(t) = I_a(t - \frac{T}{3}) \quad (\text{II.35})$$

$$I_c(t) = I_a(t - \frac{2T}{3}) \quad (\text{II.36})$$

Les expressions des signaux harmoniques de rang  $h$ , en négligeant leurs interactions mutuelles, sont :

$$S_{h,a}(t) = S_h \sin(hwt) \quad (\text{II.37})$$

$$S_{h,b}(t) = S_h \sin\left(hwt - \frac{2\pi h}{3}\right) \quad (\text{II.38})$$

$$S_{h,c}(t) = S_h \sin\left(hwt - \frac{4\pi h}{3}\right) \quad (\text{II.39})$$

Si le réseau comporte un conducteur de neutre, les courants harmoniques d'ordre 3 ou multiples de 3 dus aux 3 phases s'y ajoutent car ils sont synchrones.

Supposons 3 courants  $i_a(t)$ ,  $i_b(t)$  &  $i_c(t)$  équilibrés et déphasés d'un tiers de période comme suit :

$$i_a(t) = I \cos(wt) \quad (\text{II.40})$$

$$i_b(t) = I \cos\left(w\left(t + \frac{T}{3}\right)\right) \quad (\text{II.41})$$

$$\text{Avec } T = \frac{2\pi}{w}$$

$$i_c(t) = I \cos\left(w\left(t + \frac{2T}{3}\right)\right) \quad (\text{II.48})$$

Les harmoniques d'ordre 3 de ces courants sont obtenus en remplaçant  $w$  par  $3w$  comme suit :

$$i_{a3}(t) = I_3 \cos(3wt) \quad (\text{II.43})$$

$$i_{b3}(t) = I_3 \cos(3wt + wT) = I_3 \cos(3wt + 2\pi) = I_3 \cos(3wt) \quad (\text{II.44})$$

$$i_{c3}(t) = I_3 \cos(3wt + 2wT) = I_3 \cos(3wt + 4\pi) = I_3 \cos(3wt) \quad (\text{II.45})$$

On a, alors :

$$i_{a3}(t) + i_{b3}(t) + i_{c3}(t) = 3I_3 \cos(3\omega t) \quad (\text{II.46})$$

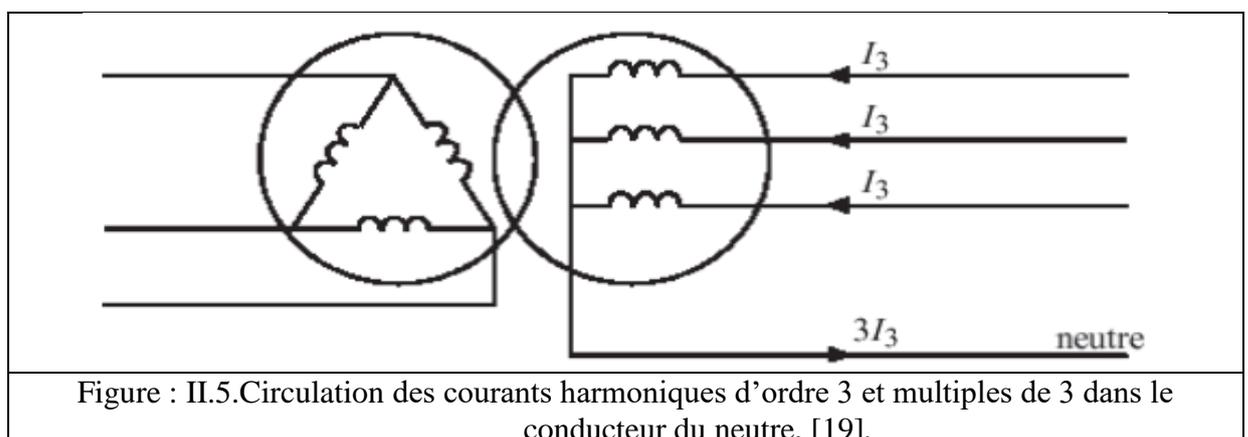
La figure II.11 montre la circulation des courants harmoniques 3 et multiples de 3 dans le conducteur du neutre.

### II.3.7.2. Système triphasé déséquilibré :

Pour l'étude des systèmes déséquilibrés, il est nécessaire de décomposer les signaux étudiés en système direct, inverse et homopolaire. Pour effectuer cette décomposition, on généralise et adapte la méthode de Fortescue, développée en 1918, pour la composante fondamentale de 50 [Hz] et pour les fréquences harmoniques, [17].

Tableau : II.2. Harmoniques dans un système triphasé équilibré, [17].

Rang harmonique h	Signal	Types d'harmoniques
h = 3k+1 k : nombre entier	$s_h \sin(h\omega t)$ $s_h \sin(h\omega t - \frac{2\pi h}{3})$ $s_h \sin(h\omega t - \frac{4\pi h}{3})$	Les harmoniques forment dans ce cas un système triphasé direct.
h = 3k-1	$s_h \sin(h\omega t)$ $s_h \sin(h\omega t - \frac{4\pi h}{3})$ $s_h \sin(h\omega t - \frac{2\pi h}{3})$	Les harmoniques forment dans ce cas un système triphasé inverse.
h = 3k	$s_h \sin(h\omega t)$ $s_h \sin(h\omega t)$ $s_h \sin(h\omega t)$	Les harmoniques forment dans ce cas un système triphasé homopolaire.



### **II.3.8.Interharmoniques, [20] :**

Les interharmoniques sont des signaux de fréquence non multiple à la fréquence fondamentale. Certains sont émis par les charges non linéaires. D'autres sont injectés, intentionnellement, par les distributeurs sur leurs réseaux pour télécommander des relais et piloter les changements de tarification des compteurs domestiques et professionnels.

#### **II.3.8.1.Charges non linéaires produisant les interharmoniques :**

La grande majorité des tensions et courants interharmoniques sur le réseau est générés par des convertisseurs de fréquence statiques. C'est le cas des variateurs de vitesse pour moteurs asynchrones qui renvoient vers le réseau des fréquences non multiples de la fréquence de sortie.

Les fours à arc sont, également, de fortes sources de courants interharmoniques. De simples machines tournantes peuvent aussi générer des courants interharmoniques de basses fréquences en présence d'une charge fluctuante. Mais, par rapport aux perturbations générées par des convertisseurs, leur amplitude est peu importante. Les fours à arc utilisés en sidérurgie peuvent être à courant alternatif ou à courant continu.

##### **II.3.8.1.1.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... (Figure. II.6).

##### **II.3.8.1.2.Four à arc à courant continu :**

L'arc est alors alimenté par l'intermédiaire d'un redresseur (Figure. II.7). L'arc est plus stable qu'en courant alternatif. Le courant absorbé se décompose en :

- Un spectre semblable à celui d'un redresseur.
- Un spectre continu de niveau inférieur à celui d'un four à courant alternatif.

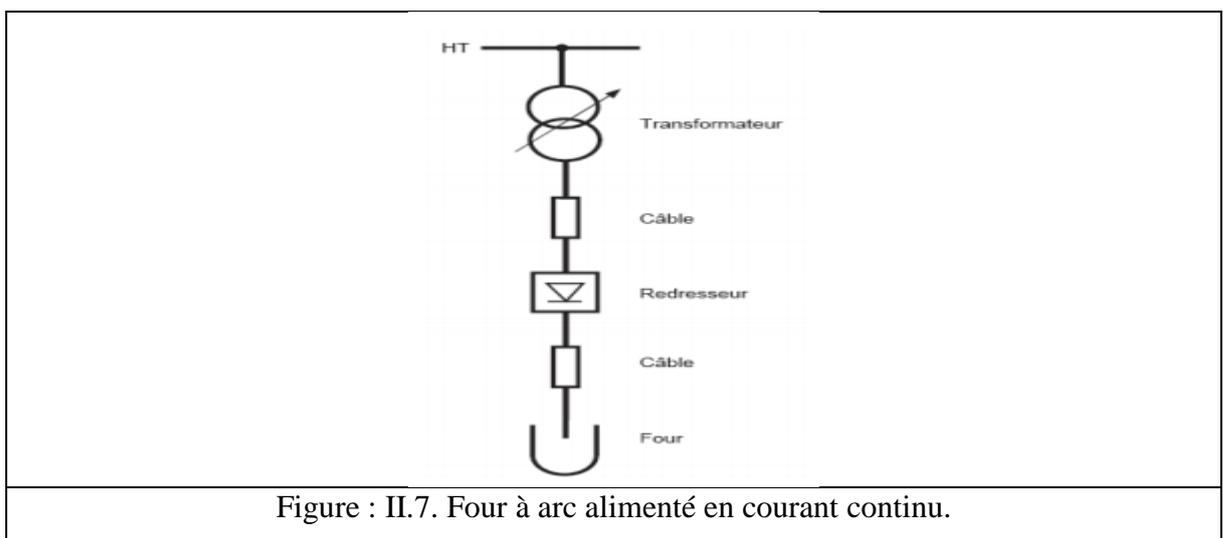
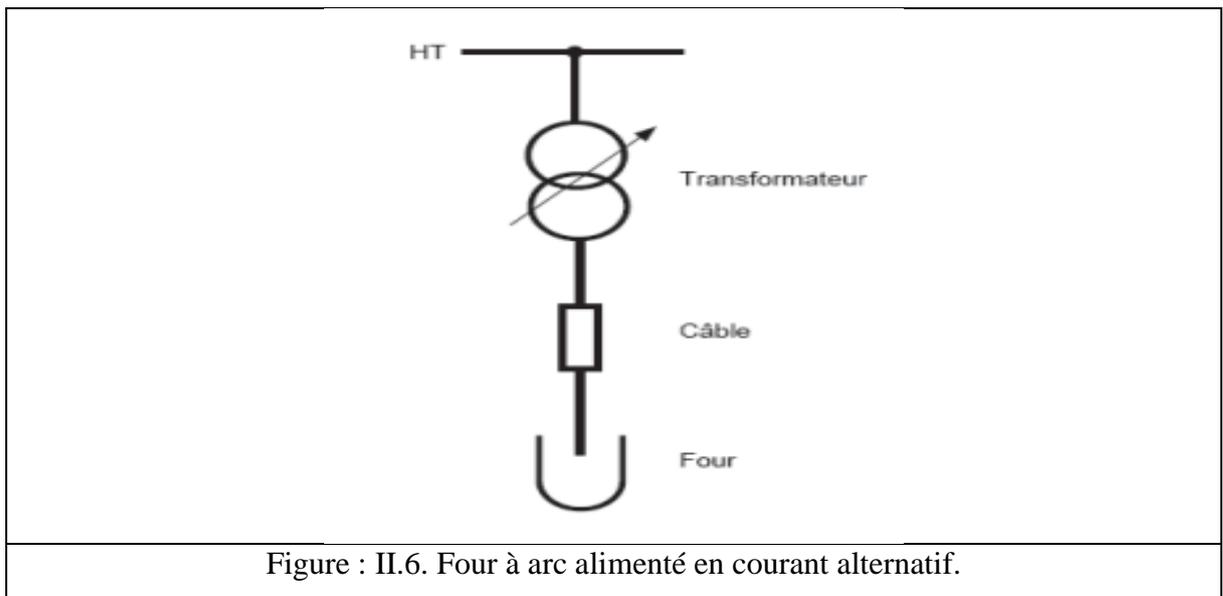
#### **II.3.8.2.Signaux de télécommande de 175[Hz] sur les réseaux de distribution :**

Les compagnies de distribution d'électricité injectent des signaux de télécommande à des fréquences interharmoniques. Les émetteurs des signaux de télécommande sont placés au secondaire des transformateurs HTB/HTA, pour diffuser ce signal sur l'ensemble du réseau

HTA et BT [21]. Il existe des émetteurs de tension branchés en parallèle. Les relais, placés chez les utilisateurs, sont sensibles au taux de ce signal à 175 [Hz] :

$$\tau_{175[Hz]} = \frac{V_{175[Hz]}}{V_{50[Hz]}} \tag{II.47}$$

Les relais sont conçus pour fonctionner si le taux du signal reçu est supérieur à 0.9 [%]. Ils ne fonctionnent pas si ce taux est inférieur à 0.6 [%]. La propagation des signaux de télécommande sur les réseaux peut être perturbée, par exemple, par la présence de selfs antiharmoniques.



## II.4.ORIGINE DES PERTURBATIONS HARMONIQUES :

### II.4.1.Appareils de production, de transport & de distribution, [22] :

Cette catégorie concerne les appareils utilisés par les distributeurs d'énergie électrique. Parmi eux, on peut citer les alternateurs, les transformateurs et les convertisseurs de fréquence. La distorsion de la tension due aux matériels du réseau possède un taux, généralement, faible. Les imperfections de construction (dissymétrie, distribution non sinusoïdale du champ dans les alternateurs) des bobinages des machines tournantes, des alternateurs et des transformateurs, sont à l'origine de la pollution harmonique de la tension du réseau. Par conséquent, la machine synchrone produit les harmoniques au réseau en vue de la distribution de sa force électromotrice représentée par l'équation suivante :

$$F(x) = \frac{2\sqrt{2IN}}{\pi} \sin(\omega t) \sum_{h=1}^{\infty} \sin h\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \quad (\text{II.48})$$

Où  $\lambda$  est la longueur d'onde,  $I$  représente le courant parcourant les enroulements de la machine et  $N$  représente le nombre de conducteurs par fente.

### II.4.2.Secteur industriel, [18] :

Les convertisseurs d'électronique de puissance (redresseurs, gradateurs), les fours à arc, les fours à induction et les variateurs de vitesse constituent les principales causes de la distorsion harmonique dans le milieu industriel. Ils sont la cause majeure de la détérioration de la qualité du réseau. Les convertisseurs d'énergie fonctionnant en commutation absorbent des courants riches en harmoniques. La circulation de ces courants à travers l'impédance de court-circuit dégrade la forme d'onde du réseau au point de raccordement de l'installation. L'importance de cette pollution est d'autant plus grande que la puissance de conversion est grande et que la puissance de court-circuit est faible.

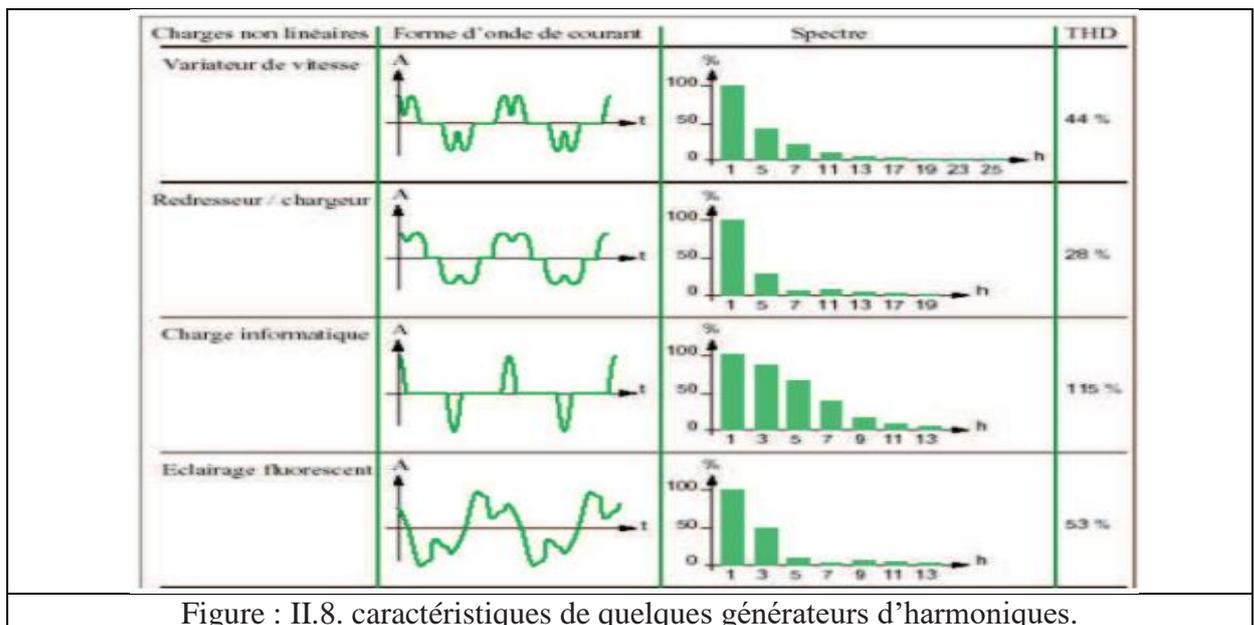
### II.4.3.Secteur tertiaire, [18] :

Avec le développement de l'informatique, de la climatisation et des éclairages à base de tubes fluorescents, la clientèle tertiaire contribue de façon significative à la pollution harmonique. Les activités les plus concernées dans ce secteur sont les administrations, les centres commerciaux, les hôpitaux et les bureaux. Le montage électronique, le plus répandu dans ce secteur, est le redresseur monophasé à filtre capacitif utilisé comme étage d'entrée des dispositifs électriques tels que les alimentations de téléviseurs, des ordinateurs, des lampes à ballast et des variateurs de vitesse des machines électriques. Malheureusement, ce montage présente la particularité d'injecter des courants dont le THD est très élevé ( $100 [\%] < \text{THD} < 180 [\%]$ ). Ce taux varie selon l'application et dépend du dimensionnement de la charge du

coté continu. Le gradateur monophasé tient, également, une place prépondérante en tant que charge non linéaire. Il est aussi utilisé, principalement, pour la commande de l'intensité des lampes, la commande de certains fours de cuisson et la régulation de puissance.

#### II.4.4.Secteur domestique, [23] :

Le secteur résidentiel contribue pour une part importante à la pollution harmonique observée sur les réseaux. Les principaux équipements électriques perturbateurs sont les appareils électroménagers, les téléviseurs, les variateurs de lumière et les lampes fluorescentes (Figure. II.8).



### II.5.CARACTERISTIQUES DE QUELQUES GENERATEURS D'HARMONIQUES :

Les harmoniques rencontrés sur les réseaux électriques (en tension ou en courant) ont un grand nombre d'effets néfastes sur le fonctionnement du réseau. La présence des courants harmoniques, qui peuvent déformer la tension, dus aux charges non linéaires sont capables de perturber le fonctionnement des autres dispositifs connectés au réseau. Les principales conséquences des effets nocifs engendrés à court terme sont rappelées dans ce qui suit.

#### II.5.1.Échauffement, [18] :

Les courants harmoniques génèrent des pertes supplémentaires et par conséquent des échauffements. Ces pertes Joule dans les équipements se décomposent en la somme des pertes issues du fondamental et de celles engendrées par les harmoniques :

$$P_{joule} = RI^2 = RI_1^2 + R \sum_{h=2}^{\infty} I_h^2 \quad (II.49)$$

### **II.5.2. Interférences avec les réseaux de télécommunication, [18] :**

Le couplage électromagnétique entre les réseaux électriques et de communication peut provoquer des interférences. Le courant circulant dans le réseau électrique engendre un champ magnétique qui induit un courant dans les conducteurs des réseaux de communication. L'importance des interférences dépend de l'amplitude et de la fréquence des courants électriques ainsi que de l'importance du couplage électromagnétique entre les réseaux.

### **II.5.3. Excitation des résonances, [18] :**

Des équipements constitués de capacités ou d'inductances peuvent avoir des fréquences de résonance proches de celles des harmoniques. Ainsi, les harmoniques sont amplifiés et ils peuvent apparaître des surtensions ou des surintensités qui détériorent les câbles et font disjoncter les fusibles. La présence des harmoniques réduit, également, le rendement des moteurs et des transformateurs en augmentant les pertes d'énergie par hystérésis et par les courants de Foucault. De plus, ces effets nocifs instantanés (échauffement, surtension, surintensité,...) provoquent un vieillissement accéléré des appareils électriques.

### **II.5.4. Mauvais fonctionnement pour les dispositifs électriques, [18] :**

En présence des harmoniques, les tensions (ou les courants) peuvent changer de signe plusieurs fois dans une demi-période du réseau. Par conséquent, tout appareil de mesure ou système de régulation numérique (les équipements de protection) dont le fonctionnement est basé sur le passage par zéro de grandeurs électriques peut être perturbé.

### **II.5.5. Autres effets, [20] :**

Ils sont cités ci - après :

Augmentation du niveau sonore et de la pulsation du couple dans les machines électriques.

- Accélération du vieillissement des équipements d'éclairage et des batteries de condensateurs.
- Influence sur les relais de protection.

Tableau : II.3. Conséquences des harmoniques sur les éléments du réseau.

Matériels	Gêne liée à la pollution harmonique	Seuils admissibles de distorsion
Alternateurs	ertes supplémentaires, dans les enroulements statoriques et, principalement, dans les amortisseurs, liées à la circulation des courants harmoniques.	Distorsion de tension = 10 % (pour petites machines) Distorsion de courant = 5 % (machines de fortes puissances)
Lignes	Pertes ohmiques supplémentaires.	Distorsion de tension = 3 % Distorsion de courant = 1.7 %
Câbles	Pertes ohmiques supplémentaires, surtout dans les câbles de retour du neutre où circulent les courants harmoniques d'ordres 3 ou homopolaires. Pertes diélectriques liées à la distorsion de tension pouvant entraîner des détériorations. Corrosion des câbles en aluminium sous l'effet de la circulation des courants harmoniques pairs associés à une composante continue.	Distorsion de tension = 10 % Tension harmonique individuelle %
Transformateurs	Pertes supplémentaires dans les enroulements liées à la circulation des courants harmoniques. Pertes supplémentaires dans le fer (par courants de Foucault). Risque de saturation en présence des composantes continues.	Distorsion de tension = 10 % Distorsion de courant = 7 %
Moteurs	Pertes supplémentaires dans les enroulements, principalement, liées à la distorsion de tension, proportionnelle à $\frac{u_h^2}{h^2}$ Limitation des performances en puissance.	Distorsion de tension = 15 % Distorsion de courant = 10 %
Circuits de protection divers de la clientèle	Risque de déclenchements impératifs attribués aux distorsions de tension et à des particularités des circuits alimentés	Présence de perturbation si $6\% < \frac{u_h}{u_1} < 12\%$
Lampes à décharge pour éclairage, appareils médicaux & générateurs de rayons X	Risque de vacillement sous l'effet de tension harmonique de rang 2. Perturbation par surtension en valeur de crête liée aux distorsions de la tension.	Présence de perturbation si $\frac{u_h}{u_1} = 3\%$ Présence de perturbation si $\frac{u_h}{u_1} = 10\%$
Ordinateurs, électronique de puissance	Troubles fonctionnels liés à la distorsion de tension.	Distorsion de tension = 5 %
Condensateurs de puissance	Pertes diélectriques supplémentaires aboutissant au vieillissement du condensateur.	Tension harmonique individuelle $\frac{u_h}{u_1} = \frac{83\%}{h}$ non cumulable avec d'autres fréquences harmoniques.

## II.6.NORMES & REGLEMENTATION, [20] :

Afin de pouvoir garantir un niveau de qualité suffisant à l'ensemble des utilisateurs, les distributeurs sont amenés à fixer ou à faire fixer des limites aux perturbations engendrées par certains utilisateurs. Pour cela, il s'agit de définir :

- D'une part, un taux de distorsion maximum permettant un fonctionnement correct de la plupart des utilisations (niveau de compatibilité).
- D'autre part, un taux de perturbations maximum pour chacun des utilisateurs, afin que les effets cumulés des différentes perturbations produites, permettent la compatibilité de fonctionnement entre tous les matériaux raccordés sur le même réseau.

Tous doivent fonctionner correctement.

Par conséquent, si cette compatibilité est nécessaire entre abonnés, elle l'est également à l'intérieur des installations des abonnés eux-mêmes (tertiaire ou industriel). L'utilisateur final est tributaire du niveau de perturbations induites par les matériels qu'il installe. C'est pourquoi, il est important que les fabricants affichent clairement quels sont les niveaux de perturbations engendrées par leurs produits.

Des normes doivent, donc, fixer les niveaux de perturbations harmoniques acceptables, pour les réseaux et pour les pollueurs afin de limiter, préventivement, les dysfonctionnements occasionnés par les harmoniques. Ces normes sont appliquées suivant 4 règles :

- Limites d'émission : Elles sont fixées soit par installation, soit par appareil. Ces limites garantissent le maintien, en tout point, des niveaux de compatibilité.
- Niveaux d'immunité : Ils permettent de garantir à l'utilisateur un fonctionnement de l'équipement sur un réseau perturbé dans certaines limites.
- Niveaux de compatibilité : Ils sont, généralement, des taux de tension harmonique à ne pas dépasser en tout point du réseau. Le maintien de ces niveaux garantit un fonctionnement correct de tous les appareils.
- Niveaux de planification : Ils représentent des seuils de perturbations décidés par un gestionnaire de réseau, tel que le niveau de compatibilité qu'il ne soit pas dépassé.

Par exemple, la norme CEI 1000-2-2 pour les équipements raccordés à un réseau basse tension permet de garantir à l'utilisateur un fonctionnement de l'équipement sur un réseau perturbé dans certaines limites. Un extrait de la norme CEI 1000-2-2 est donné au tableau II.2.

Tableau : II.4.Niveau de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux électriques.

Harmoniques impairs non multiples de 3		Harmoniques impairs multiples de 3		Harmoniques pairs	
Rang harmonique h	Tension harmonique %	Rang harmonique h	Tension harmonique %	Rang harmonique h	Tension harmonique %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3	21	0,2	8	0,5
17	2	> 21	0,2	10	0,5
19	1,5			12	0,2
23	1,5			> 12	0,2
25	1,5				
> 25	12.7 / h				

## II.7.CONCLUSION :

Dans ce chapitre, nous avons vu les harmonies, les types, les sources et les problèmes qui les ont provoqués et nous en avons discuté en détail.

La pollution harmonique est un problème relativement récent. Il apparaît de façon remarquable qu'un pollueur de réseau peut être également victime des harmoniques. Cette pollution affecte non seulement la propre installation, mais aussi les consommateurs voisins. La technologie récente permet de compenser à peu près toutes les irrégularités survenant sur les réseaux. En contrepartie, un investissement non négligeable est requis. Une telle protection s'imposera à l'avenir de plus en plus.

Chapitre III

Stratégies  
de dépollution des  
harmoniques

### **III.1.INTRODUCTION :**

Les systèmes d'électronique de puissance utilisée pour l'amélioration de la qualité de l'énergie sont essentiellement des systèmes de compensation. Ils travaillent en combinaison avec le réseau, en superposant leur énergie à celle de ce dernier [22]. Deux types de solutions sont envisageables. La première consiste à utiliser des convertisseurs statiques peu ou moins polluants, tandis que la seconde réalise un filtrage des composantes harmoniques [24]. Afin de compenser toutes les perturbations, séparées en 2 types (courant et tension), 2 groupes de solutions de dépollution, traditionnelle et moderne, vont être étudiées.

### **III.2.SOLUTION TRADITIONNELLE :**

L'existence des perturbations dans un réseau électrique conduit à prendre, impérativement, des dispositions afin d'atténuer ou d'éliminer leurs conséquences sur les équipements électriques et sur les réseaux électriques. Sur cette base, il semble donc nécessaire de décrire de manière sommaire les principaux dispositifs et solutions existants utilisés pour le traitement de perturbations.

#### **III.2.1.Surdimensionnement de l'installation électrique, [45] :**

Dans ce cas, les harmoniques ne subissent aucune action curative de la part de l'utilisateur. Les effets néfastes de la pollution harmonique sont à éviter pendant une durée limitée. Pour les installations nouvelles, on procède au surdimensionnement des équipements afin d'assurer leur tenue aux surcharges harmoniques. Dans le cas d'installations existantes, on décline les équipements de distribution électrique soumis aux harmoniques (câbles du neutre, transformateur). Cette méthode ne permet pas de tirer profit du potentiel réel de l'installation. Il en résulte un accroissement important du coût de l'installation.

#### **III.2.2.Augmentation de la puissance de court-circuit, [45] :**

En l'absence de tout phénomène de résonance, la puissance harmonique globale augmente lorsque la puissance de court-circuit diminue. On s'efforcera alors d'alimenter les équipements perturbateurs à partir du point du réseau où la puissance de court-circuit disponible est la plus élevée.

Les courants harmoniques des charges non linéaires étaient modélisés par des sources de courant indépendantes du réseau. Dans la réalité, ce modèle est très approximatif. Les

courants harmoniques sont influencés par l'impédance du réseau amont. Lorsque celle-ci croit, en général les courants harmoniques décroissent. Ce qui signifie que pour augmenter l'impédance, on augmente la puissance de court-circuit. Des essais ont été réalisés sur une alimentation à découpage, en modifiant l'impédance de la Source (Tableau.III.1). On peut constater que les harmoniques de valeurs les Plus élevées décroissent fortement lorsque l'impédance de la source croit.

### III.2.3.Transformateur à couplage spécial, [23] :

Le choix de couplages appropriés des transformateurs permet de limiter la circulation des courants harmoniques. L'utilisation d'un transformateur d'isolement, de rapport 1/1 à couplage triangle-étoile ou triangle-zigzag (Figure.III.1), 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. Il limite au contraire la puissance disponible de la source et augmente l'impédance de ligne. Il en résulte une augmentation de la distorsion en tension due aux autres rangs harmoniques.

Tableau : III.1.Courants harmoniques d'une alimentation à découpage en fonction de l'impédance de source.

Zs [%]	Facteur de puissance $F_P = \frac{P}{S}$	I3 [%]	I5 [%]	I7 [%]	I9 [%]	I11 [%]	I13 [%]	Taux de distorsion en tension
0.25	0.64	87	64	38	15	1	7	2.8
0.5	0.65	85	60	33	11	4	7	3.4
1	0.86	81	52	24	6	7	6	5.4
2	0.72	76	42	14	7	6	3	7.5
4	0.75	69	29	8	8	4	4	11.2
6	0.77	63	21	8	6	3	3	14.2
8	0.78	59	17	8	5	3	2	16.8

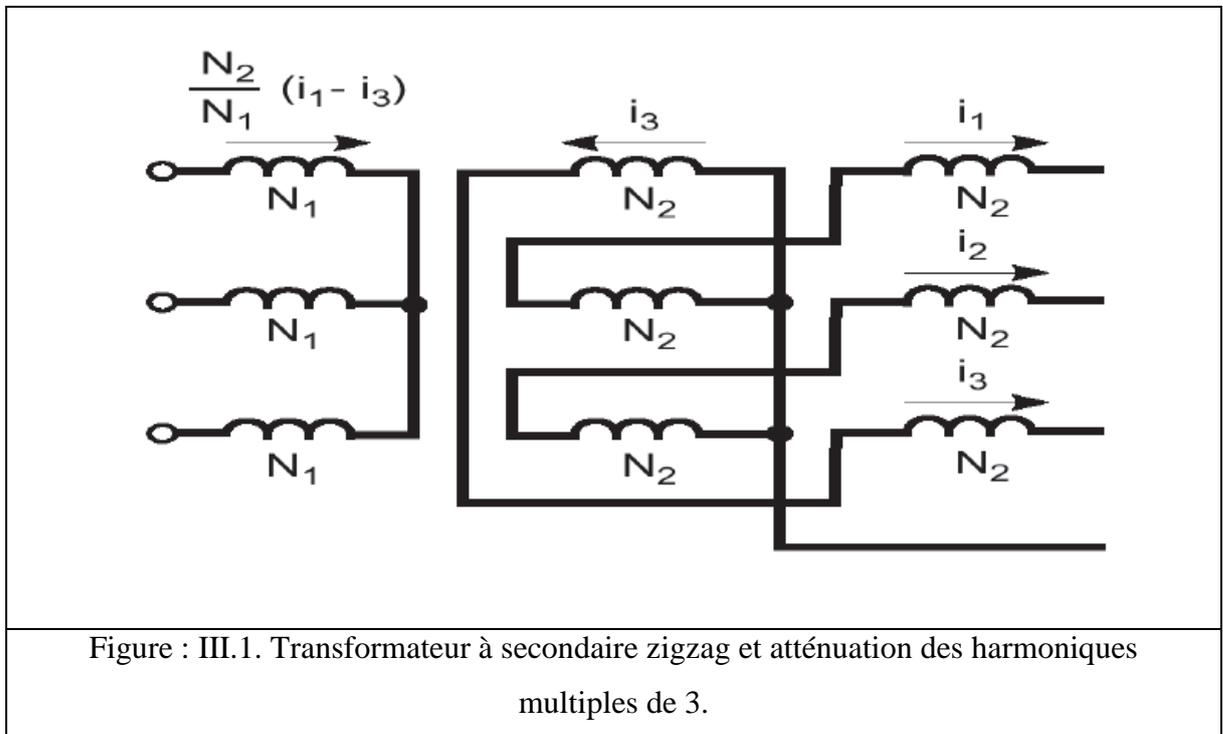


Figure : III.1. Transformateur à secondaire zigzag et atténuation des harmoniques multiples de 3.

L'utilisation des transformateurs primaires étoiles (sans neutre) et à secondaires zigzags est une solution intéressante. Ce couplage permet d'avoir le minimum de distorsion au secondaire. En effet, dans ce cas, les courants harmoniques de rang  $3 \cdot h$  ne circulent pas au primaire du transformateur et l'impédance  $Z_s$  ne dépend que des enroulements secondaires.

### III.2.4.Modification du convertisseur polluant :

Afin de limiter les risques de pollution d'un réseau électrique, il est parfois possible de remplacer la structure du convertisseur de puissance et/ou de sa commande pour intervenir, directement, sur la source des perturbations. Plusieurs solutions sont envisageables, parmi elles, on cite :

#### III.2.4.1.Redresseurs dodécophasés :

Il s'agit de connecter 2 ponts triphasés, judicieusement déphasés, en parallèle côté réseau et reliés côté redressé. Le déphasage est obtenu à l'aide d'un transformateur à 2 secondaires bobinés l'un en triangle et l'autre en étoile (Figure.III.2), [25].

#### III.2.4.2.Méthodes d'injection d'harmonique dans le neutre, [26] :

Ces techniques réduisent de manière significative les harmoniques créés au secondaire d'un transformateur triphasé alimentant un pont redresseur à diodes, en injectant un courant de fréquence multiple de 3 dans le neutre.

### III.2.4.3. Transformateurs de réjection de l'harmonique 3, [27] :

L'originalité est de réduire l'influence de l'harmonique 3 en insérant dans le circuit, un transformateur étoile-triangle ou zigzag-triangle, fonctionnant à vide, pour créer une circulation de flux de fréquence multiple de 3.

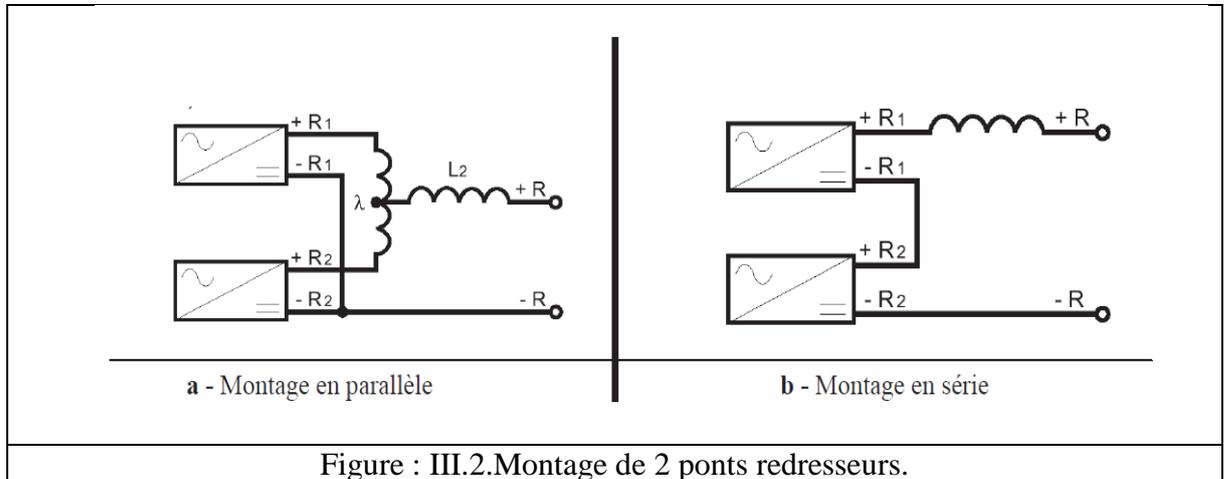


Figure : III.2. Montage de 2 ponts redresseurs.

### III.3. SOLUTIONS NOUVELLES :

#### III.3.1. Filtre actif ou conditionneur actif d'harmoniques, [28,29] :

Le développement récent des semi-conducteurs de puissance, entièrement, commandables, les thyristors, les GTO et les IGBT et en particulier, la maîtrise de leur mise en œuvre et l'existence de nouvelles méthodes de traitement numérique du signal ont permis de développer un moyen moderne et efficace d'élimination des perturbations harmoniques : le filtre actif ou compensateur actif d'harmoniques. Un filtre actif de puissance est un dispositif qui satisfait la fonction de dépollution harmonique (Figure.III.3). A la différence, un conditionneur actif de puissance est un dispositif qui satisfait la fonction de dépollution de plusieurs perturbations telles que les chutes de tension, les déséquilibres..., incluant le traitement harmonique.

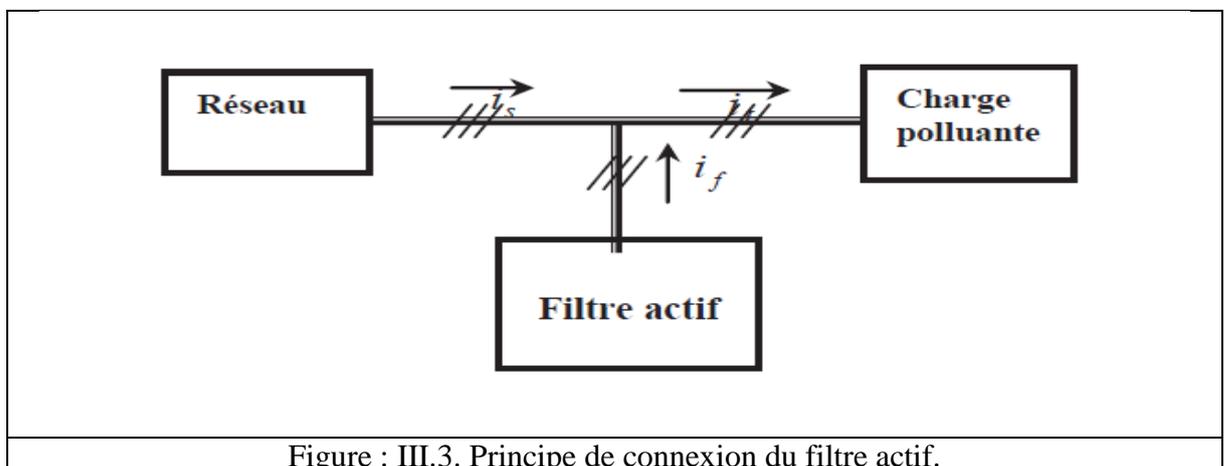
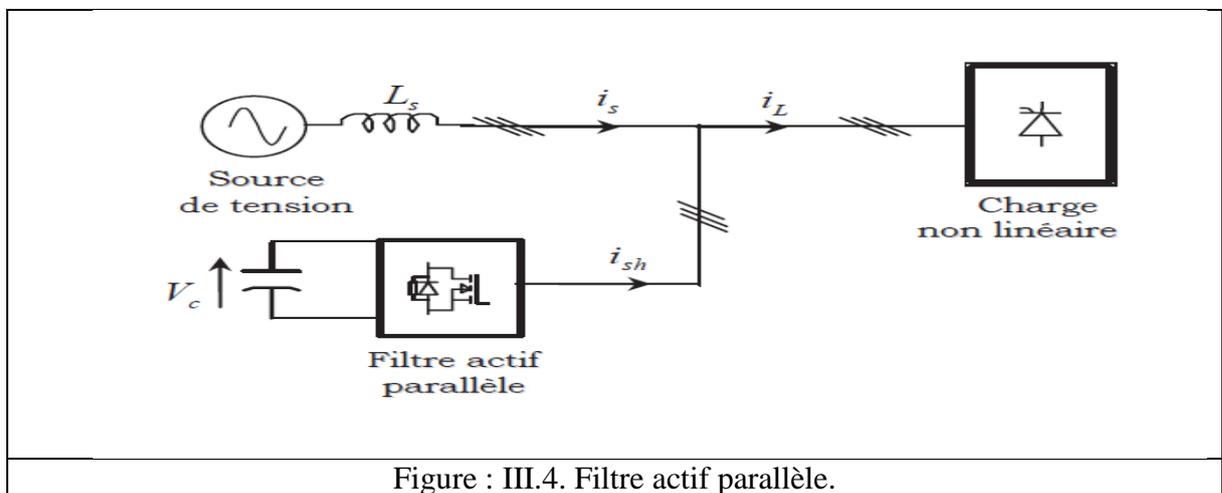


Figure : III.3. Principe de connexion du filtre actif.

### III.3.2. Filtre actif de puissance parallèle, [29] :

Le filtre actif parallèle (Figure.III.4) peut être considéré comme un générateur de courant ou de tension. Dans le cas de générateur de courant, ce filtre est commandé de façon à injecter au réseau des courants égaux à ceux générés par la charge, mais de phases opposées. Le courant de source après compensation est sinusoïdal. Par contre, la tension au point de connexion ne sera sinusoïdale que si la source de tension du réseau est exempte d'harmoniques. Le dimensionnement du filtre actif dépend du courant harmonique à fournir. En plus, le filtre peut aussi compenser le courant réactif mais avec un dimensionnement plus important.

Lorsque celui-ci se comporte comme un compensateur de courants harmoniques, il permet de supprimer au point de raccordement tous les harmoniques de courants de charges non linéaires. Par contre, lorsqu'il se comporte comme un compensateur de tension harmonique, il permet alors de maintenir sinusoïdale la tension au point de raccordement quel que soit le courant absorbé par la charge et quel que soit la qualité de la source de tension. En général, le filtre actif parallèle est utilisé pour la dépollution des réseaux BT et MT. Son indépendance totale vis-à-vis de la source et de la charge lui confère une bonne auto-adaptabilité avec des performances appréciables.



### III.3.3. Filtre actif de puissance série :

Ce type de compensateur connecté en série sur le réseau de distribution se comporte comme une source de tension harmonique qui s'oppose à une éventuelle tension harmonique venant de la source. Il s'oppose, également, à celle provoquée par la circulation du courant harmonique de la charge polluante à travers l'impédance du réseau rendant sinusoïdale la tension aux bornes de la charge polluante. Son rôle d'isolateur empêche les courants

harmoniques de remonter vers le réseau [30]. Dans ce cas, le filtre protège les installations sensibles des perturbations provenant du réseau tel que les harmoniques, les surtensions et les déséquilibres. Si la charge génère des courants harmoniques, le filtre série ne permet pas de corriger ces courants et en cas de court-circuit de la charge, le compensateur doit supporter toute la tension du réseau et tout le courant de court-circuit. D'où, un moyen de protection s'avère indispensable qui lui compense soit les courants harmoniques consommés par la charge

Ou par la distorsion de tension déjà présente sur le réseau [31]. Le montage est représenté à la figure III.5.

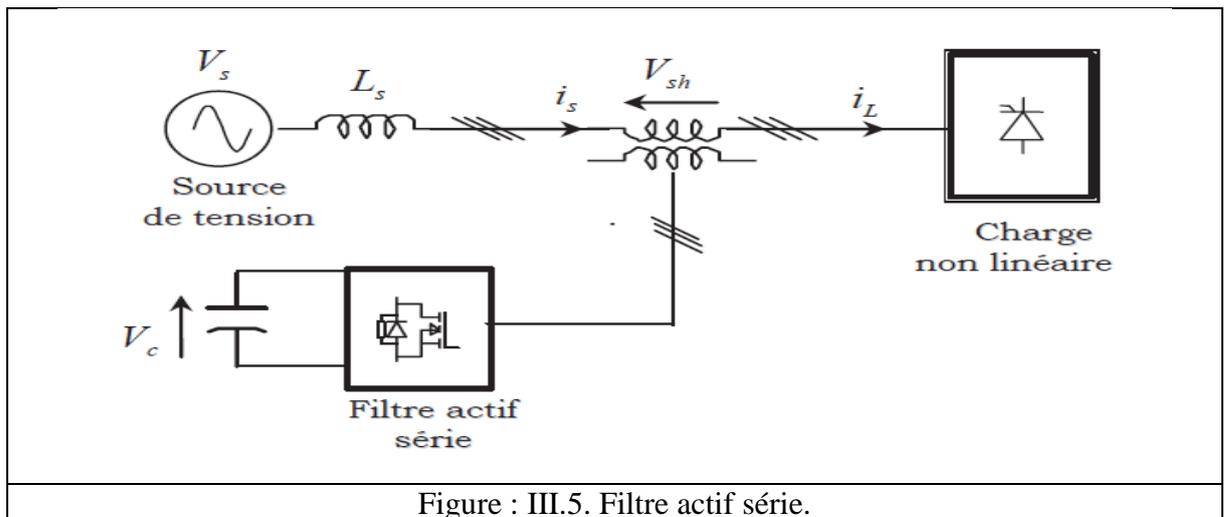


Figure : III.5. Filtre actif série.

Pour ce cas, le filtre actif série se comporte comme une impédance infinie aux fréquences harmoniques et comme une impédance nulle à la fréquence fondamentale. Son rôle d'isolateur empêche ainsi les courants harmoniques de remonter vers le réseau. Toutefois, la mise en œuvre de la topologie d'un filtre actif série présente quelques inconvénients : III.5

- Il est toujours parcouru par la totalité du courant absorbé par la charge, y compris le courant fondamental.
- En cas de court-circuit de la charge, le filtre actif de puissance série devient la seule charge du réseau et risque d'être détruit. Ceci nécessite des protections supplémentaires.

### III.3.4. Filtre actif de puissance hybride :

C'est l'association de filtres actifs séries de faibles puissances à des filtres passifs. Cette solution semble être prometteuse car elle réduit le dimensionnement du filtre actif de puissance, par conséquent, leurs prix. De plus, leurs potentialités d'application ne cessent de s'accroître et la fréquence de commutation est, considérablement, réduite [32]. Différentes configurations existent, parmi elles, on présente :

### III.3.4.1. Filtre actif de puissance série en parallèle avec des filtres passifs parallèles, [33] :

Le schéma de principe de ce système de filtrage est donné par la figure III.6. Il est constitué de filtres passifs accordés aux fréquences des harmoniques prépondérantes tels que le 5ème et le 7ème harmonique et d'un filtre actif série dont le rôle est de renforcer l'efficacité des filtres passifs en empêchant les courants harmoniques de remonter. Il réduit, ainsi, les risques d'antirésonance entre les éléments du filtre passif et l'impédance du réseau.

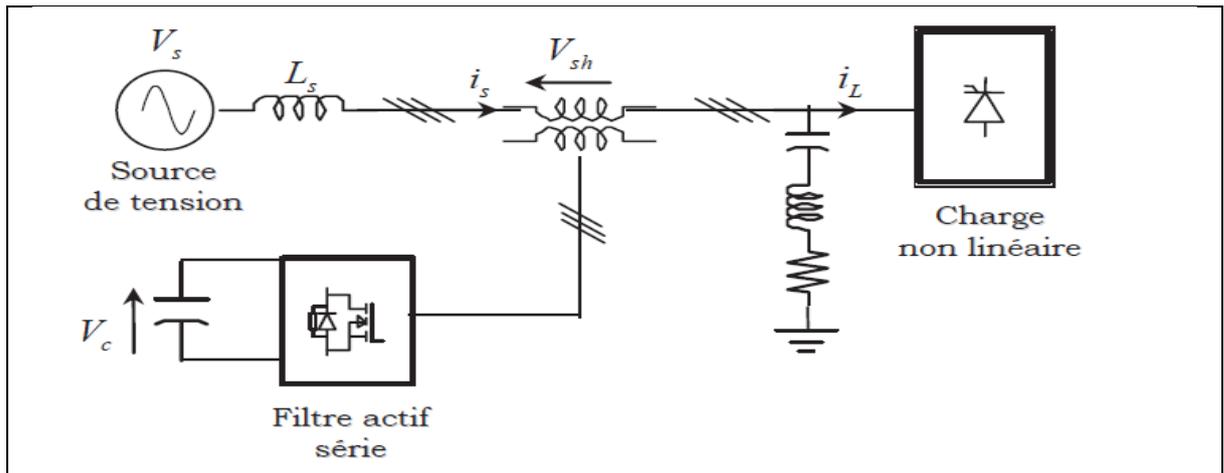


Figure : III.6. Combinaison d'un filtre actif série en parallèle avec un filtre passif parallèle.

### III.3.4.2. Filtre actif de puissance série en série avec des filtres passifs parallèles, [34] :

Dans cette configuration, le filtre actif est placé en série avec les filtres passifs parallèles telle que le montre la figure III.7. Cette structure à 2 avantages. D'une part, le courant qui le traverse est moins important. Par conséquent, la puissance du filtre actif série est plus faible que celle du filtre hybride. D'autre part, le filtre actif série n'étant plus connecté en série avec la charge, par conséquent, en cas de court-circuit dû à cette même charge, le filtre actif n'est plus affecté.

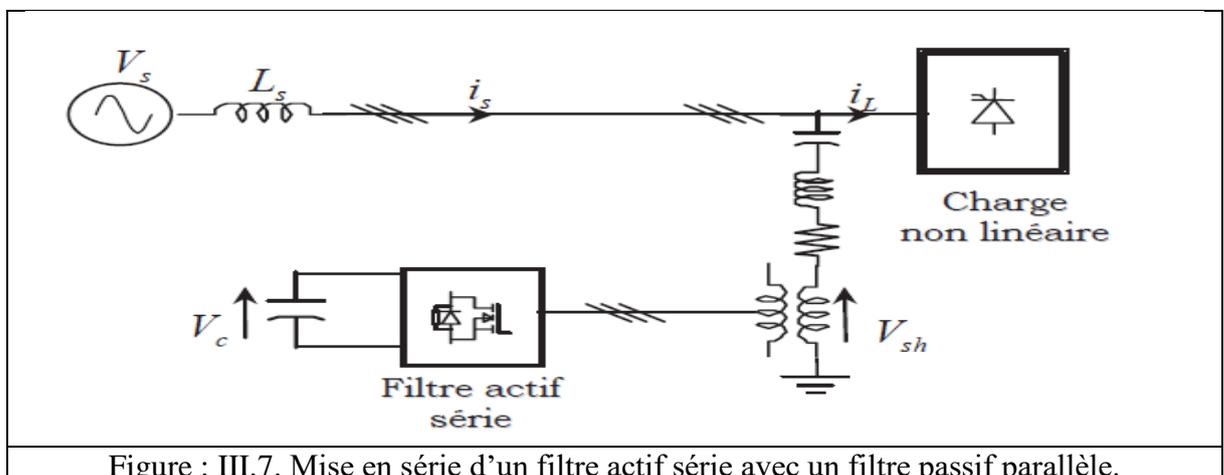
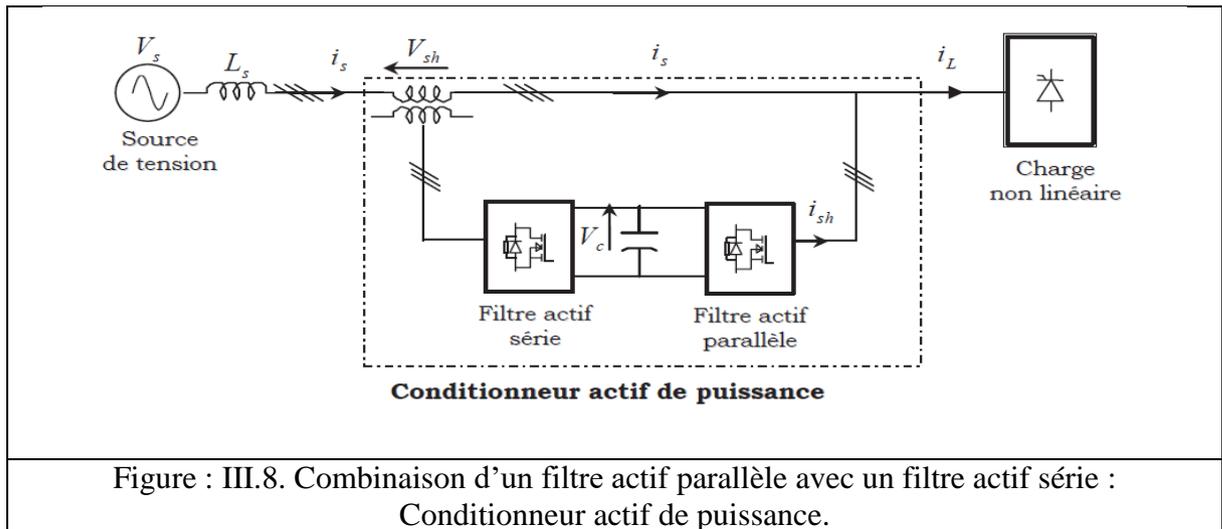


Figure : III.7. Mise en série d'un filtre actif série avec un filtre passif parallèle.

### III.3.4.3. Conditionneur actif de puissance, [35] :

Nous remarquons d'après ce qui précède, que ni le filtre actif de puissance parallèle, ni le filtre actif de puissance série n'est capable de réaliser un filtrage complet donnant une tension sinusoïdale du côté de la charge et un courant exempt d'harmoniques du côté du réseau.

Cet objectif n'est atteint, qu'en utilisant un filtre actif de puissance mixte composé de 2 filtres actifs de puissance, l'un connecté en série et l'autre en parallèle avec la charge, comme le montre la figure III.8.

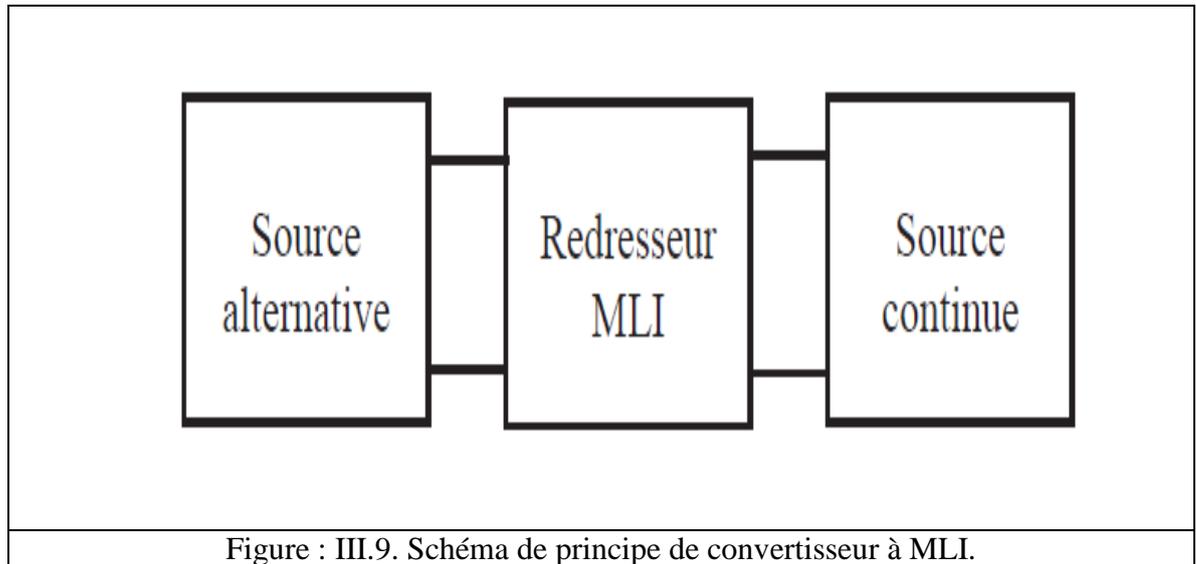


Cette structure mixte appelée conditionneur actif de puissance constituera la principale application des filtres actifs de puissance dans l'avenir en restant pour l'instant très onéreuse.

### III.3.4.4. Redresseur à principe de la MLI, [36] :

Le prélèvement sinusoïdal est une technique qui permet aux convertisseurs statiques d'absorber un courant sinusoïdal. Les convertisseurs propres, tels que les redresseurs MLI, sont formés par des semi-conducteurs à fermeture et ouverture commandées, auxquels sont associées des diodes (Figure.III.9). Ils utilisent, de façon générale, la technique de commutation dite MLI. Elle a pour rôle de repousser les harmoniques vers les fréquences élevées. Il existe 2 grandes applications utilisant ces convertisseurs :

- Fonctionnement en convertisseur d'énergie à faible taux de pollution harmonique et à consommation de puissance réactive nulle. Ce convertisseur permet une consommation ou un renvoi d'énergie active sur le réseau.
- Fonctionnement en compensateur d'énergie réactive à forte dynamique et à encombrement réduit. L'application principale est la compensation de la fluctuation rapide de la tension (flicker) et la stabilisation de réseau à haute tension.



### III.4.SOLUTION NON CONVENTIONNELLES :

En plus des solutions classiques et modernes déjà décrites, d'autres solutions plus récentes sont apparues pour le traitement des perturbations. Parmi elles, on cite :

#### III.4.1.Système improved power quality AC-DC converter IPQC, [37] :

Il a pour rôle d'alimenter, d'une part, une charge non linéaire et d'autre part de compenser de part sa commande toutes les charges non linéaires avoisinantes, sources de pollution harmonique, comme le montre la figure III.10.

Les avantages

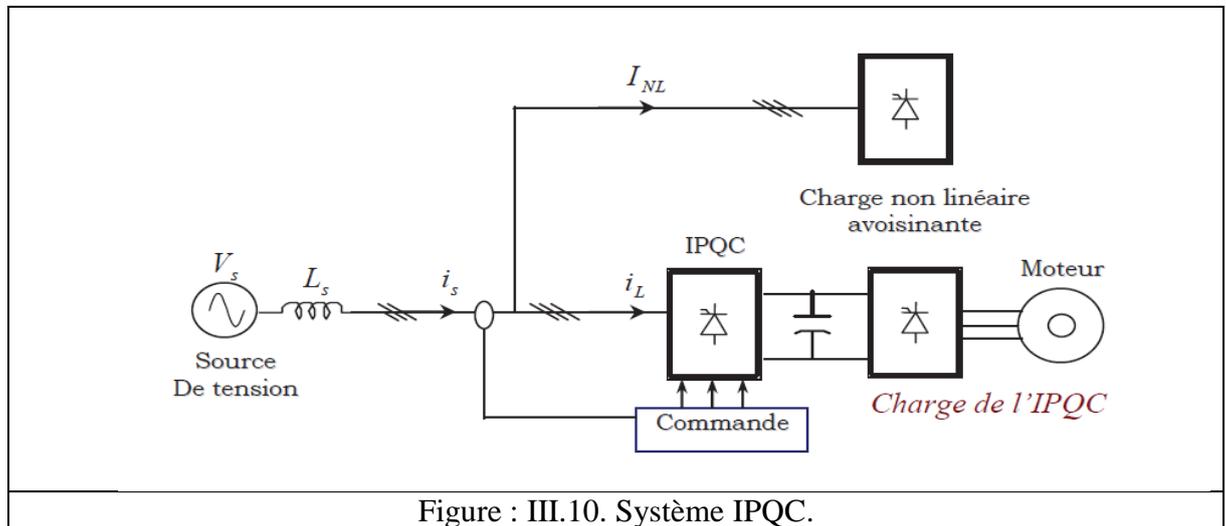
Rencontrés lors de l'utilisation de cette solution d'après leurs auteurs sont :

- Amélioration du facteur de puissance.
- Amélioration du contenu harmonique du courant de source.
- Fonctionnement du redresseur actif dans les 4 quadrants.
- Non utilisation d'un filtre actif de puissance parallèle.

Cependant des inconvénients existent. Parmi elles, on cite :

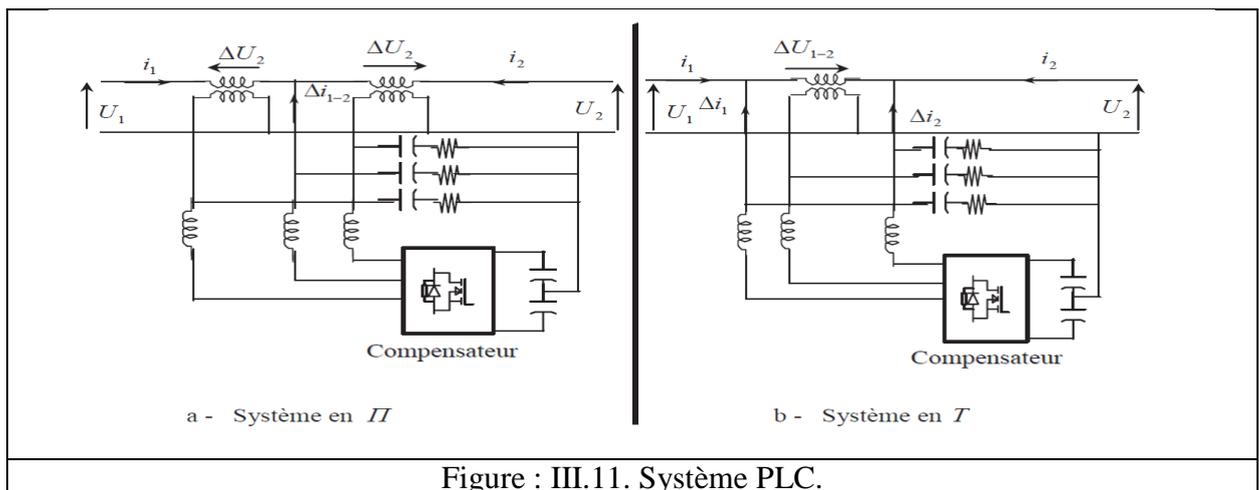
Implémentation de son circuit de protection très complexe.

- Charges non linéaires à traiter doit avoisiner le redresseur actif.



### III.4.2. Système Power Line Communication PLC, [38] :

Il est basé sur une nouvelle configuration d'onduleur jouant le rôle de filtre actif de puissance où chaque phase du compensateur est reliée, différemment, à la même phase monophasée de la source, comme le montre la figure III.11.



### III.4.3. Filtrage actif à l'aide d'une machine synchrone à double alimentation, [39] :

Cette solution est d'un intérêt certain car elle présente les avantages suivants :

- Compensation sélective d'harmonique.
- Réduction de l'encombrement lié à ce mode de filtrage. Cet avantage est, particulièrement, intéressant pour des dispositifs de filtrage dits embarqués.
- Adaptabilité aux variations de la fréquence du réseau.
- Pertes joules dues au régime fondamental, principalement, constituées des pertes dans la résistance du circuit bouchon, sont faibles pour ce type de montage.

Pour le régime harmonique, ces pertes sont dissipées au niveau des résistances statorique et rotorique de la machine.

Toutefois, ce mode de filtrage présente quelques inconvénients. Parmi elles, on note :

- Non possibilité de filtrer plusieurs harmoniques simultanément et efficacement.
- Risques de résonance entre le réseau, la machine et le circuit bouchon ne sont pas écartés, contrairement à l'emploi de filtres actifs constitués d'onduleurs.

### **III.5.CONCLUSION :**

Plusieurs solutions traditionnelles et modernes de dépollution ont été présentées. La solution classique à base de filtres passifs est souvent pénalisée en termes d'encombrement et de résonance. De plus, les filtres passifs ne peuvent pas s'adapter à l'évolution du réseau et aux charges polluantes.

Récemment, en plus du filtrage des harmoniques, les filtres actifs parallèles et séries et leur combinaison, sont étudiés pour la compensation de tous les types de perturbations susceptibles d'apparaître dans un réseau électrique BT. En effet, profitant des progrès réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance, ces solutions peu encombrantes n'occasionnent aucune résonance avec les éléments passifs du réseau et font preuve d'une grande flexibilité face à l'évolution du réseau électrique et de la charge polluante.

- Le filtre actif parallèle peut être installé pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques et les déséquilibres.
- Le filtre actif série peut être installé pour compenser toutes les perturbations de tension comme les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension.
- La combinaison parallèle-série active est la solution universelle pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension.

D'autres solutions de dépollution consistent à associer des filtres actifs et passifs pour trouver un compromis entre l'efficacité de compensation et le coût. Ces solutions peuvent être des solutions futures très prometteuses.

# Chapitre IV

## Les méthodes d'identification et de commande du FAP

## IV.1.INTRODUCTION :

Afin de commander le filtre actif parallèle, nous devons d'abord identifier les courants harmoniques de la charge polluante, qui servent en effet comme références du filtre actif parallèle [40]. La méthode de détection harmonique est la partie importante de FAP elle a la capacité de déterminer les attributs spécifiques des harmoniques (fréquence, amplitude, phase, le temps d'occurrence, de la durée et de l'énergie) à partir d'un signal d'entrée (qui peut être tension ou courant) en utilisant un algorithme mathématique particulier [41]. Il existe deux grandes approches qui ont émergé pour la détection harmonique, à savoir les méthodes dans le domaine temporel et les méthodes dans le domaine fréquentiel [42]. Trois possibilités d'identification des courants perturbateurs ont déjà été proposées :

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

La première méthode est la plus appropriée au filtre actif parallèle [14].c'est pourquoi cette méthode de détection sera employée dans notre travail.

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

La première famille utilise la transformée de Fourier rapide dans le domaine fréquentiel, pour extraire les harmoniques de courant. Cette méthode est bien adaptée aux charges où le contenu harmonique varie lentement. Elle donne aussi l'avantage de sélectionner les harmoniques individuellement. Il est à noter que cette méthode nécessite une grande capacité de calcul [43].

La deuxième famille est basée sur le calcul des puissances instantanées dans le domaine temporel. Certaines de ces méthodes se basent sur le calcul des puissances harmoniques de la charge non linéaire. D'autres peuvent être utilisées pour compenser à la fois les courants harmoniques et la puissance réactive, en se basant sur la soustraction de la partie fondamentale active du courant total, [44].

Dans ce chapitre on va présenter la commande du filtre actif, pour différentes méthodes d'identification des harmoniques à savoir : la méthode des puissances instantanées (pq), la théorie de référentiel synchrone (dq) et la théorie des puissances instantanées dans le référentiel (pqr), [45].

Le filtrage actif parallèle de puissance (FAP) est une solution moderne et adéquate permettant de remédier aux perturbations en courant [72]. Ce compensateur peut être utilisé pour compenser les courants harmoniques, les courants déséquilibrés et le fondamental réactif [73,74]. Il s'insère entre le réseau et la charge non linéaire. Les performances d'un filtre actif parallèle dépendent en grande partie du type de modulation mis en œuvre pour la commande des interrupteurs, du dimensionnement des éléments de couplage au réseau et du système de Stockage (généralement capacitif), de la dynamique des algorithmes d'extraction et de contrôle des courants [75,61].

Nous allons également examiner ce chapitre sont de comprendre la structure du filtre actif parallèle ainsi que son fonctionnement général. Nous examinerons le rôle des multiples éléments le composant et aussi, nous nous ferons présenter ces principaux types de commande.

## **IV.2.TECHNIQUES D'IDENTIFICATION DES HARMONIQUES :**

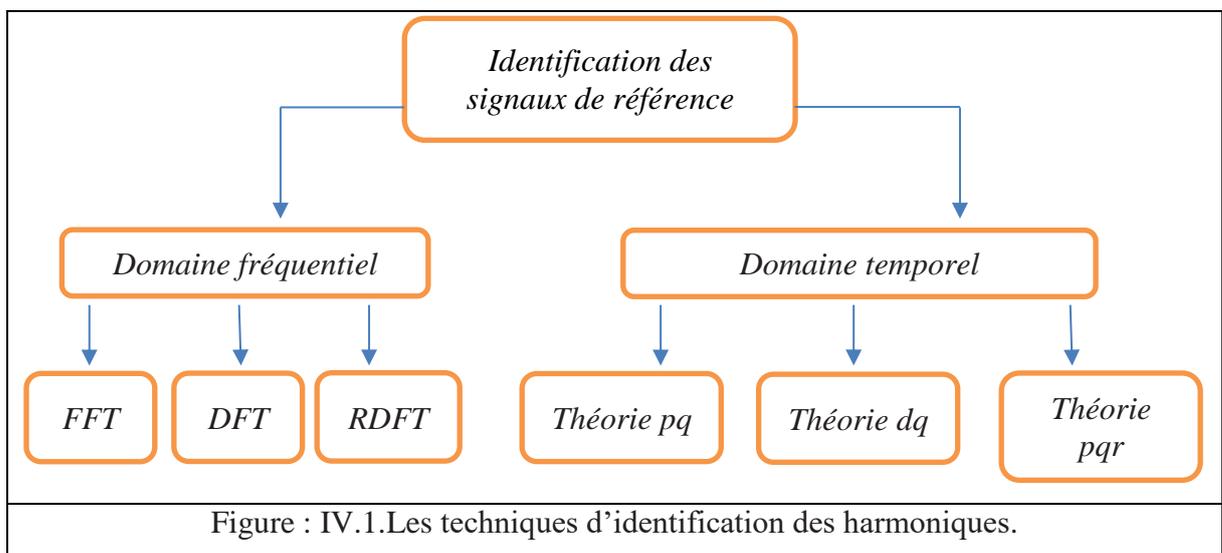
Nouvelles méthodes d'identification donnent le choix de compenser un, plusieurs ou voire même tous les types de courants perturbateurs. En effet, en se basant sur la régulation de la tension continue et sur celles du réseau électrique aux points de raccordement, nous pouvons compenser à la fois tous les courants perturbateurs, tout en offrant la possibilité de réguler la tension de la charge [46]. Cette méthode, qui ne peut être implantée que numériquement, ne garantit pas une compensation parfaite de la puissance réactive, de même que la régulation de tension n'assure pas toujours une bonne qualité à la tension de la charge.

Une autre méthode, appelée méthode de détection synchrone, reposant sur la transformée de Park a été proposée [47]. Cette méthode se base essentiellement sur le calcul de la pulsation fondamentale obtenue par une PLL. Cela exige une précision parfaite du calcul de cette pulsation afin de ne pas avoir des courants identifiés erronés.

Enfin, la méthode d'identification la plus utilisée est celle appelée méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées [48]. Cette méthode offre l'avantage de choisir la perturbation à compenser avec précision, rapidité et facilité d'implantation. Pour toutes ces raisons nous avons retenu cette méthode d'identification pour le reste de notre étude. En effet, afin de pouvoir compenser les courants harmoniques, les courants déséquilibrés et la puissance réactive conjointement ou individuellement, cette méthode nous a semblé la mieux appropriée [49].

Le courant de référence est l'élément clé qui assure le bon fonctionnement de l'FAP. L'estimation du signal de référence est initiée par la détection de signaux de tension / courant essentiels afin de recueillir les informations nécessaires pour les variables de système d'identification. Les variables de tension à détecter sont la tension de la source ( $v_s$ ), la tension du bus continu de l'onduleur ( $v_{dc}$ ) et la tension de référence ( $v_{dc\ ref}$ ). Pour le courant les variables typiques de courant ils sont le courant de charge ( $i_l$ ) et le courant injecté par l'onduleur ( $i_f$ ).

Sur la base de ces variables de système, les signaux sont estimés dans le domaine fréquentiel ou temporel. La Figure IV.1 illustre les techniques d'estimation de signal de référence pris en considération.



#### IV.2.1. Identification dans le Domaine Fréquentiel :

Les algorithmes appartenant à ce domaine sont basés sur l'analyse de Fourier appliquée aux grandeurs distordues (courants ou tensions) afin d'en extraire les signaux de compensation. En utilisant la transformée de Fourier, les composantes harmoniques de compensation sont d'abord séparées des signaux harmoniques polluants et sont ensuite combinées pour générer les consignes. La fréquence de commutation des semi-conducteurs du filtre actif est généralement maintenue plus grande que deux fois la plus élevée des fréquences harmoniques dans l'objectif d'avoir une compensation effective. L'application on-line de la transformée de Fourier (système d'équations non linéaires) est un calcul encombrant ; il en résulte un temps de réponse relativement lent, [50].

### IV.2.1.1. Transformée de Fourier rapide (FFT) :

Parmi les méthodes d'identification les plus anciennes, nous pouvons citer la méthode de la transformée de Fourier rapide (Fast Fourier Transform) (FFT) dans le domaine fréquentiel. Cette méthode est bien adaptée aux charges dont le contenu harmonique varie lentement. Elle donne aussi l'avantage de sélectionner les harmoniques individuellement et de ne compenser que les plus prépondérants. Pour cela, une grande puissance de calcul est nécessaire afin de réaliser, en temps réel, toutes les transformations nécessaires pour extraire les harmoniques [51].

Dans son principe, la transformée de Fourier est appliquée au signal capté de tension ou de courant. Les composantes harmoniques du signal sont d'abord séparées en éliminant la composante fondamentale après on applique la transformée de Fourier inverse pour estimer le signal de référence de compensation dans le domaine temporel. Le principal inconvénient de cette technique est le calcul difficile des coefficients de Fourier. Ceci fait qu'il est impossible pour une application en temps réel avec différentes charges dynamiques [42].

### IV.2.1.2. Transformée de Fourier discrète (DFT) :

La transformation de Fourier discrète (DFT) : s'applique aux signaux discrets périodiques. Est une transformation mathématique des signaux discrets qui donne à la fois l'amplitude et la phase de l'harmonique souhaité [52].

$$\overline{X}_h = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot h \cdot n}{N}\right) - j \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot h \cdot n}{N}\right) \quad (\text{IV.1})$$

$$\overline{X}_h = X_{hr} + j \cdot X_{hi} \quad (\text{IV.2})$$

$$|\overline{X}_h| = \sqrt{X_{hr}^2 + X_{hi}^2} \quad (\text{IV.3})$$

Avec

$$\varphi_h = \arctan\left(\frac{X_{hi}}{X_{hr}}\right) \quad (\text{IV.4})$$

Où :

- N est le nombre d'échantillons fondamentaux par période ; x(n) est le signal d'entrée (tension ou courant) au point N.
- $X_h$  est le vecteur de Fourier complexe de la h<sup>em</sup> harmonique du signal d'entrée.
- $X_{hr}$  est la partie réelle de  $X_h$ ;  $X_{hi}$  est la partie imaginaire de  $X_h$ .  $|\overline{X}_h|$  est l'amplitude du vecteur;  $\varphi_h$  est la phase du vecteur [66].

### IV.2.1.3. Transformée de Fourier discrète récursive (DFTR), [53] :

La transformée de Fourier discrète récursive (DFTR) utilise le même principe que la DFT, mais la (DFTR) est calculée sur une fenêtre glissante. La fenêtre décale chaque temps d'échantillonnage avec un nombre fixe d'échantillons. Ainsi, l'analyse DFT peut effectivement être effectuée sur les échantillons nouvellement obtenus. La seule différence entre le réel et les fenêtres précédentes sont les premiers et derniers échantillons. Tous les autres échantillons sont les mêmes par conséquent, il n'est pas nécessaire d'échantillonner à nouveau.

### IV.2.2. Identification dans le Domaine Temporel :

Le principe de la stratégie d'identification dans le domaine temporel est d'extraire par filtrage les harmonique de tension ou de courant en temps réel, en séparant le fondamental des harmoniques. Cette technique utilise des formules algébriques faciles à implanter et réduit considérablement l'effort de calcul ; s'ajoute à cela le fait qu'elle permet d'identifier tous les harmoniques ; d'autre part elles sont largement utilisées pour le calcul de courant de référence. Les algorithmes principalement utilisés dans le domaine temporel sont : la théorie de puissance instantanée active-réactive (pq) et la théorie du référence synchrone (dq), ainsi que la théorie des puissances instantanées dans le référentiel (pqr), [54].

#### IV.2.2.1. Théorie de la puissance instantanée (pq) :

En 1983, Akagi et al, ont proposé «La théorie généralisée de la puissance réactive instantanée en circuits triphasés » également connu comme la théorie (pq). Elle est basée sur les valeurs instantanées dans les systèmes d'alimentation triphasés avec ou sans neutre, en plus elle est valable pour les opérations en régime permanent ou transitoire [48].

La théorie (pq) met en œuvre une transformation d'un système de référence stationnaire en coordonnées abc, à un système de coordonnées ( $\alpha, \beta$ ). Elle correspond à une transformation algébrique, connu sous le nom de la transformation de Clark, qui produit également un système de référence fixe, où les coordonnées ( $\alpha, \beta$ ) sont orthogonales les unes aux autres [55].

La transformation se fait à partir de la relation suivant :

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (\text{IV.5})$$

Si on applique cette relation sur le courant de charge et la tension de la source on trouve :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.6})$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{la} \\ i_{lb} \\ i_{lc} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.7})$$

Pour la puissance active et réactive dans le plan  $\alpha$ - $\beta$  il sera :

$$\begin{cases} P = V_\alpha i_\alpha + V_\beta i_\beta \\ q = V_\alpha i_\beta - V_\beta i_\alpha \end{cases} \quad (\text{IV.8})$$

En remplaçant les tensions et les courants diphasés par leurs homologues triphasés on trouve :

$$\begin{cases} P = V_{sa} i_{la} + V_{sb} i_{sb} + V_{sc} i_{lc} \\ q = -\frac{1}{\sqrt{3}} [(V_{sa} - V_{sb}) i_{lc} + (V_{sb} - V_{sc}) i_{la} + (V_{sc} - V_{sa}) i_{lb}] \end{cases} \quad (\text{IV.9})$$

On pose :

$$\Delta = V_\alpha^2 + V_\beta^2 \quad (\text{IV.10})$$

Et à partir de l'expression (IV.8) on a :

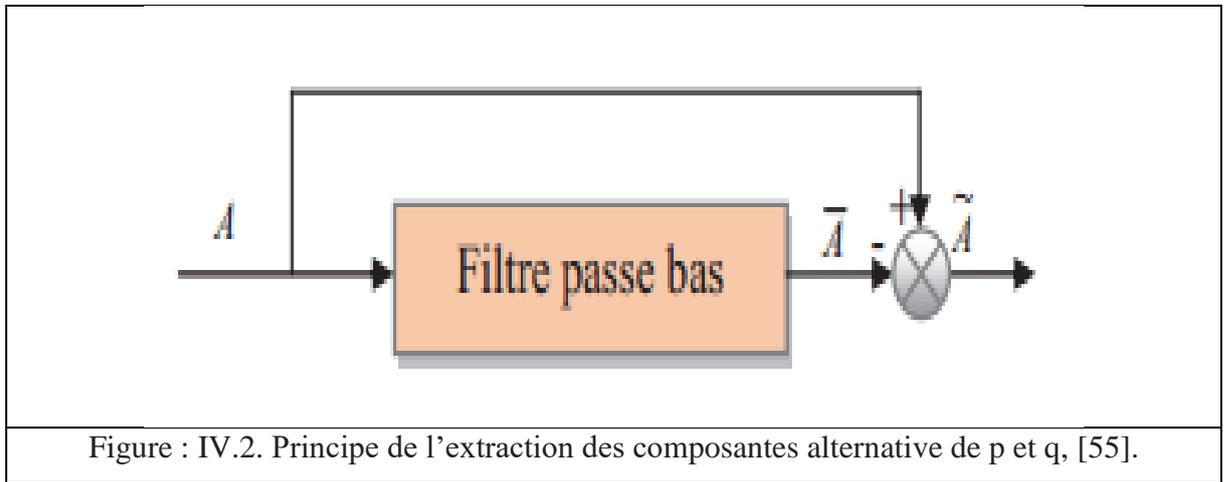
$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{IV.11})$$

Dans le cas où les tensions sont sinusoïdales et alimentent une charge non linéaire, les puissances instantanées  $p$  et  $q$  ont pour expression :

$$\begin{cases} P = \bar{P} + \check{P} \\ q = \bar{q} + \check{q} \end{cases} \quad (\text{IV.12})$$

Avec

- $\bar{p}, \bar{q}$ : Puissance continue liée à la composante fondamentale active et réactive du courant.
- $\check{p}, \check{q}$ : Puissance alternative liées à la somme des composantes harmoniques du courant.
- Pour l'extraction de puissance alternative on utilise la méthode de filtrage illustré sur la Figure IV.2.



On remplace (IV.12) dans (IV.11) on trouve :

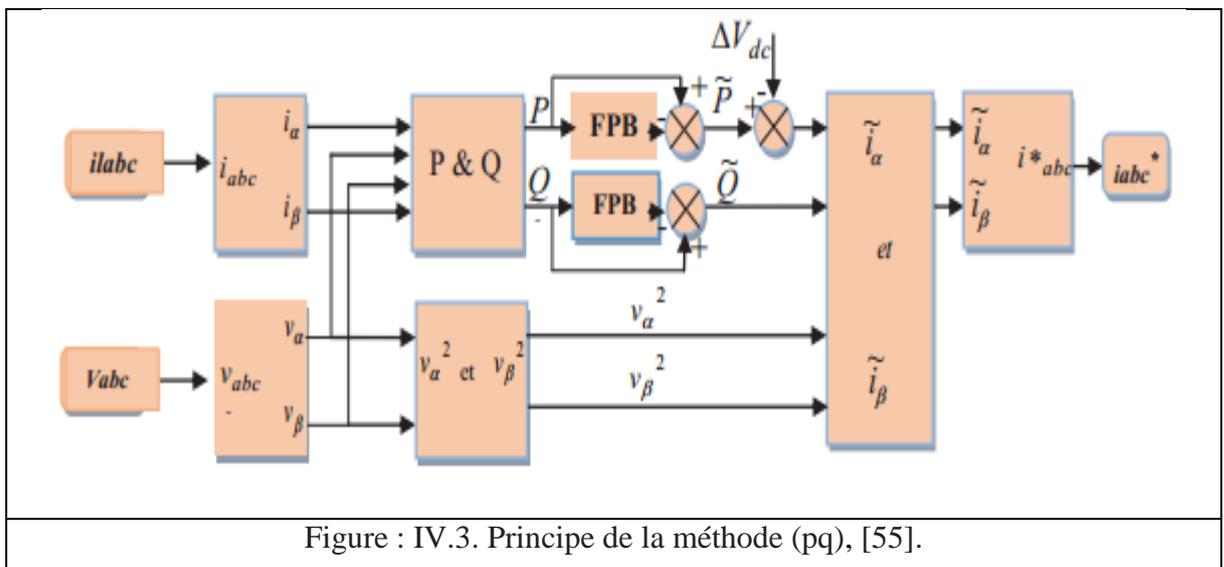
$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \tilde{q} \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.13})$$

Donc le courant harmonique sera déterminé par la relation :

$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_\alpha \\ \tilde{i}_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.14})$$

Si on applique la transformation inverse de Clark (Figure.IV.3) on trouve :

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_\alpha \\ \tilde{i}_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{IV.15})$$



### IV.2.2.2. Théorie du référentiel synchrone (dq) :

Le principe d'identification sélectif à base de référentiel synchrone de Park (dq) est basé sur la transposition des systèmes triphasés des courants de charge à un axe diphasé tournant (dq) tourne par une vitesse angulaire de la fréquence harmonique désirée a filtré [56]. Ainsi, dans l'axe d-q, l'harmonique choisi à identifier devient un signal continu, et les autres harmoniques changent leur fréquences, ils prennent la valeur  $h=\pm 6\omega$ . Cette opération permet de séparer cette composante des autres courants par un filtrage simple à réaliser (filtre passe bas de premier ordre) [57].

Le terme fondamental de la théorie (dq) est le résultat de la transformation vectorielle des signaux d'entrée (les courants de charge pour notre cas) qui sont initialement réalisés dans les coordonnées abc (repère de référence fixe) vers les coordonnées (dq) (repère tournant avec la fréquence fondamentale) par la transformation de Park (Figure.III.5) [58, 59]. Il y a cinq étapes pour calculer les courants de référence pour un filtre actif parallèle [29,18] :

- 1) Étape 1 : Transformer les courants de charge triphasés ( $i_{l\alpha}, i_{l\beta}, i_{lc}$ ) à ( $i_{l\alpha}, i_{l\beta}, i_{l0}$ ) en utilisant l'équation (IV.16) :

$$\begin{bmatrix} i_{l\alpha} \\ i_{l\beta} \\ i_{l0} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{la} \\ i_{lb} \\ i_{lc} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.16})$$

- 2) Étape 2 : Transformer les courants  $i_{l\alpha}$  et  $i_{l\beta}$  à  $i_{ld}$  et  $i_{lq}$  par :

$$\begin{bmatrix} i_{ld} \\ i_{lq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{l\alpha} \\ i_{l\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.17})$$

Où  $\omega$  est la pulsation électrique.

Le schéma vectoriel de passage du repère (abc) vers le repère (dq) est représenté dans la Figure IV.4.

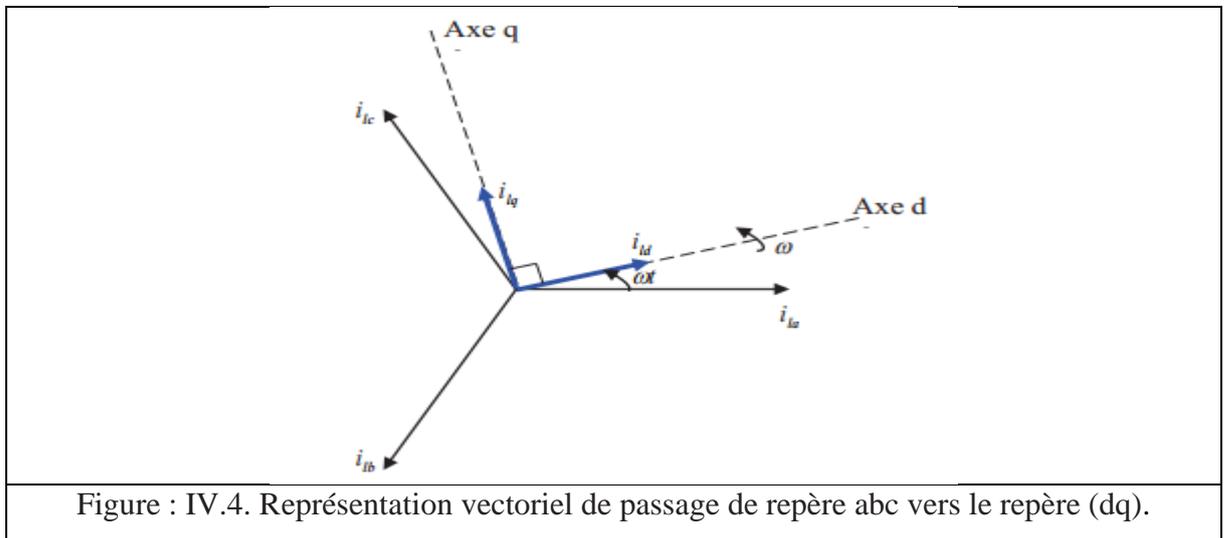


Figure : IV.4. Représentation vectoriel de passage de repère abc vers le repère (dq).

On peut décomposer les courants  $i_{ld}$  et  $i_{lq}$  en deux termes, les composantes fondamentales et harmoniques. Les harmoniques se comportent comme une composante alternative et les termes fondamentaux se comportent comme une composante continue, donc on peut écrire :

$$\begin{bmatrix} i_{ld} \\ i_{lq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{i}_{ld} + \check{i}_{ld} \\ \bar{i}_{lq} + \check{i}_{lq} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.18})$$

Avec :

- $\bar{i}_{ld}, \bar{i}_{lq}$ : Composante continue (fondamentale) de courant de charge dans le repère dq.
- $\check{i}_{ld}, \check{i}_{lq}$  : Composante alternative (harmonique) de courant de charge dans le repère dq.
- Étape 3 : De l'étape 2, il est montré que les courants de charge se composent de deux termes. Pour cette étape, le filtre passe-bas (FPB) est utilisé pour séparer les composantes harmoniques  $\check{i}_{ld}, \check{i}_{lq}$  comme le montre la Figure IV.5.
- Étape 4 : Le passage des composantes harmoniques ( $\check{i}_{ld}, \check{i}_{lq}$ ) de repère dq vers le repère  $\alpha\beta$  ( $\check{i}_{l\alpha}, \check{i}_{l\beta}$ ) en utilisant l'équation suivant :

$$\begin{bmatrix} \check{i}_{l\alpha} \\ \check{i}_{l\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \check{i}_{ld} \\ \check{i}_{lq} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.19})$$

- Étape 5 : Calcule des courants de référence triphasés ( $i_a^*, i_b^*, i_c^*$ ) à partir de l'équation (IV.20) :

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \check{i}_{l\alpha} \\ \check{i}_{l\beta} \\ \check{i}_{l0} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.20})$$

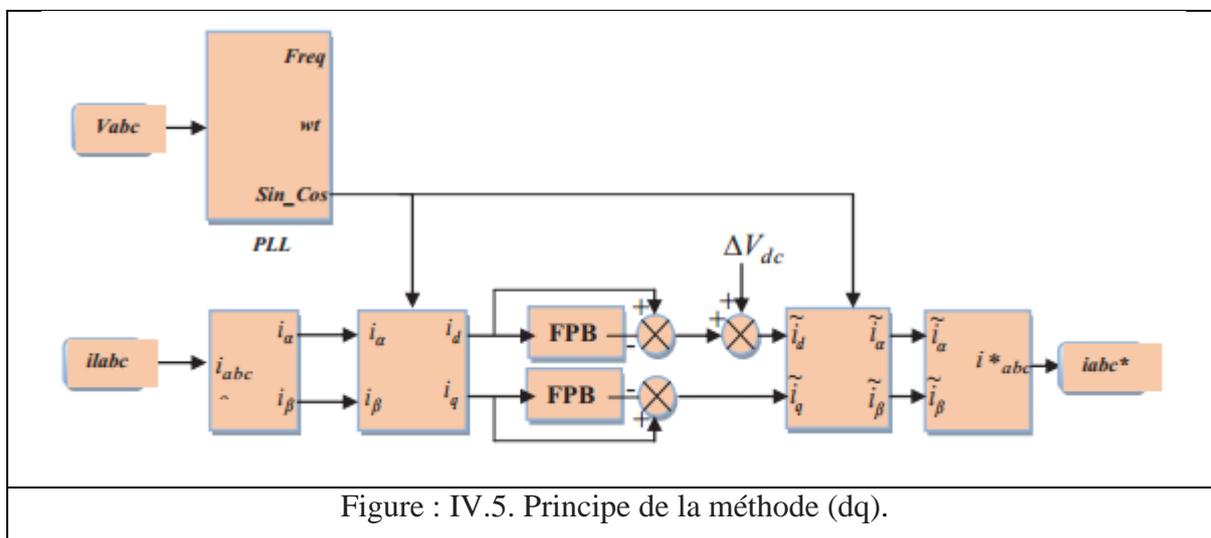


Figure : IV.5. Principe de la méthode (dq).

Afin d'échanger une puissance contrôlée, l'onduleur doit toujours être synchronisé avec le réseau. Le but du bloc de synchronisation est d'obtenir la phase de la tension instantanée du réseau. Plusieurs techniques sont utilisées, le choix le plus commun consiste à utiliser une boucle à verrouillage de phase (PLL : Phase locked loop) [60, 61].

#### IV.2.2.3. Théorie des puissances instantanées dans le référentiel (pqr) :

Cette théorie a été introduite par H .Kim et al, dont le principe n'est pas très différent de la théorie (pq) sa structure générale est représentée sur la Figure IV.6.

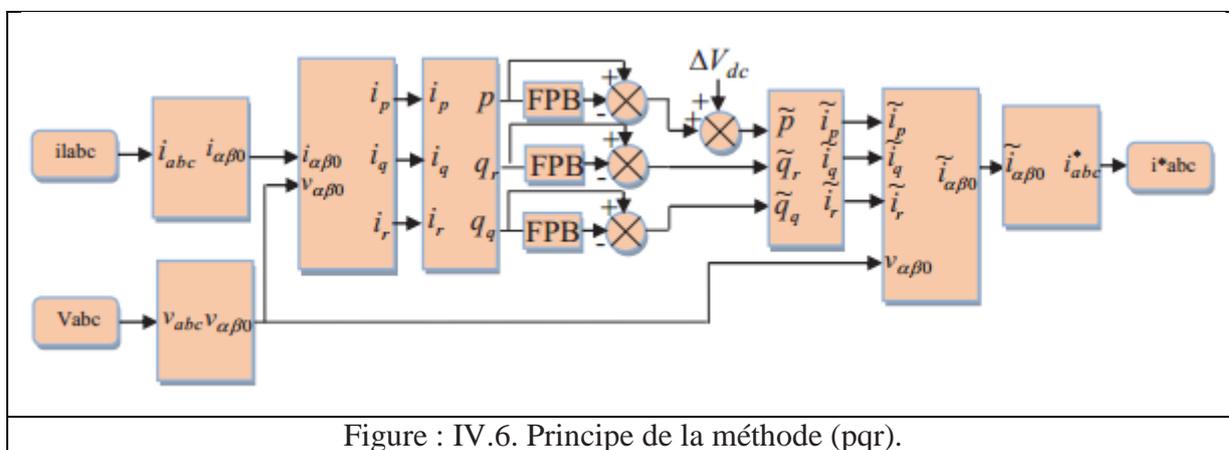


Figure : IV.6. Principe de la méthode (pqr).

La théorie propose un référentiel spatial (pqr) pour exposer les grandeurs électriques et identifier les harmoniques à compenser. L'axe p est placé sur le vecteur tension, q est un axe situé sur le plan ( $\alpha\beta 0$ ) et perpendiculaire à p et r est perpendiculaire aux deux axes p et q comme présenté dans la Figure IV.7 [62,63].

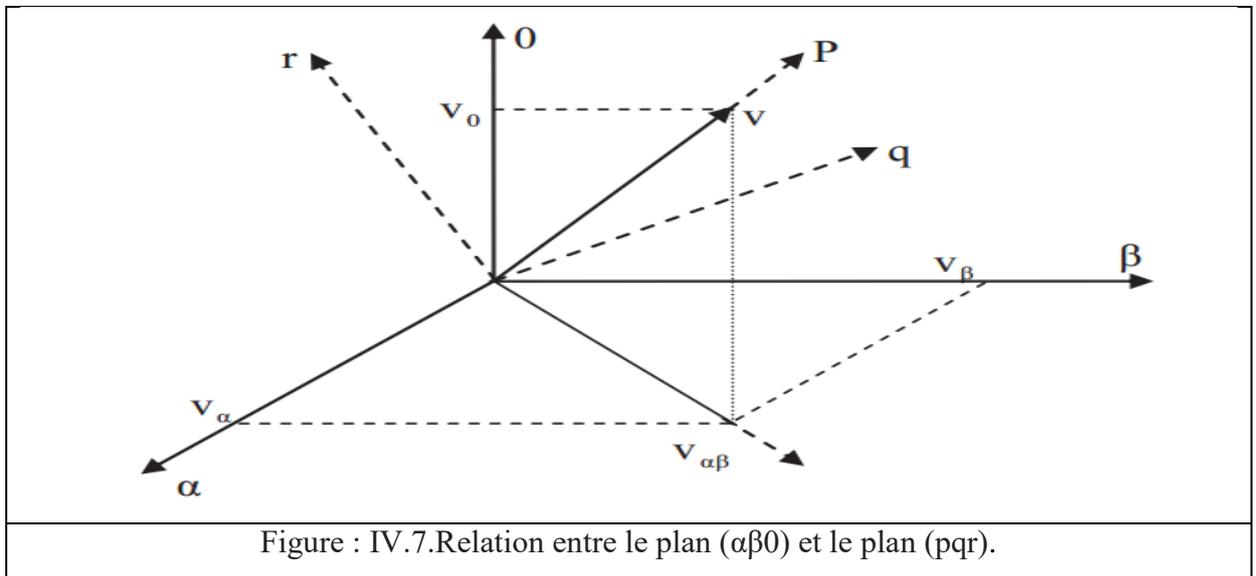


Figure : IV.7.Relation entre le plan (αβ0) et le plan (pqr).

Le passage du repère abc au repère (αβ0) est assuré par la relation :

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \\ X_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (\text{IV.21})$$

Donc :

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \\ X_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (\text{IV.22})$$

$$V_{\alpha\beta 0} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (\text{IV.23})$$

Ainsi, le vecteur unité sur l'axe p qui a la même direction que le vecteur de tension est donné par l'équation suivante :

$$V_{up} = \frac{1}{V_{\alpha\beta 0}} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (\text{IV.24})$$

Avec :

$$V_{\alpha\beta 0} = \sqrt{V_\alpha^2 + V_\beta^2 + V_0^2} \quad (\text{IV.25})$$

Et pour toute vecteur unité  $V_{uq}$  sur le plan  $(\alpha\beta)$  qui est orthogonal à  $V_{up}$ , est donné par :

$$V_{up} = \frac{1}{V_{\alpha\beta}} \begin{bmatrix} -V_{\beta} \\ V_{\alpha} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.26})$$

Avec :

$$V_{\alpha\beta} = \sqrt{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} \quad (\text{IV.27})$$

Donc, si  $V_{uq}$  est le vecteur unité sur l'axe q, alors le vecteur unité sur l'axe r est donné par :

$$V_{ur} = V_{up} \cdot V_{uq} \quad (\text{IV.28})$$

Alors :

$$V_{ur} = \frac{1}{V_{\alpha\beta 0}} \begin{bmatrix} \frac{-V_0 V_{\alpha}}{V_{\alpha\beta}} \\ \frac{-V_0 V_{\beta}}{V_{\alpha\beta}} \\ V_{\alpha\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.29})$$

Dans ce cas il est possible de faire la projection de tous les vecteurs sur les vecteurs unitaires  $V_{up}$ ,  $V_{uq}$  et  $V_{ur}$ . Le vecteur courant dans le système  $(\alpha\beta 0)$  est donné par :

$$i_{\alpha\beta 0} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.30})$$

Donc les projections  $i_p$ ,  $i_q$  et  $i_r$  sur les axes p, q et r, seront données par :

$$i_{pqr} = \begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (u_{up} \cdot i_{\alpha\beta 0}) u_{up} \\ (u_{uq} \cdot i_{\alpha\beta 0}) u_{uq} \\ (u_{ur} \cdot i_{\alpha\beta 0}) u_{ur} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.31})$$

On remplace les équations (IV.24) ; (IV.26) & (IV.29), dans l'équation (IV.31) on trouve :

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{\alpha\beta 0}} \begin{bmatrix} V_{\alpha} & V_{\beta} & V_0 \\ \frac{-V_{\alpha\beta 0} V_{\beta}}{V_{\alpha\beta}} & \frac{V_{\alpha\beta 0} V_{\alpha}}{V_{\alpha\beta}} & 0 \\ \frac{-V_0 V_{\alpha}}{V_{\alpha\beta}} & \frac{-V_0 V_{\beta}}{V_{\alpha\beta}} & V_{\alpha\beta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.32})$$

Pour le passage inverse de repère (pqr) vers ( $\alpha\beta 0$ ) il sera de la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{\alpha\beta 0}} \begin{bmatrix} V_\alpha & \frac{-V_{\alpha\beta 0}V_\beta}{V_{\alpha\beta}} & \frac{-V_0V_\beta}{V_{\alpha\beta}} \\ V_\beta & \frac{V_{\alpha\beta 0}V_\alpha}{V_{\alpha\beta}} & \frac{-V_0V_\alpha}{V_{\alpha\beta}} \\ V_0 & 0 & V_{\alpha\beta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} \quad (\text{IV.33})$$

Pour les projections du vecteur tension sur les vecteurs unitaires sont obtenues de la même façon :

$$V_{pqr} = \begin{bmatrix} V_p \\ V_q \\ V_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (u_{up} \cdot V_{\alpha\beta 0})u_{up} \\ (u_{uq} \cdot V_{\alpha\beta 0})u_{uq} \\ (u_{ur} \cdot V_{\alpha\beta 0})u_{ur} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.34})$$

Donc :

$$\begin{bmatrix} V_p \\ V_q \\ V_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{\alpha\beta 0} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.35})$$

Les puissances active et réactive dans le référentiel (pqr) sont définies respectivement par :

$$P = V_p \cdot i_p = V_p i_p \quad (\text{IV.36})$$

Et

$$q_{pqr} = V_{pqr} \times i_{pqr} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_p i_r \\ V_p i_q \end{bmatrix} \quad (\text{IV.37})$$

Donc :

$$\begin{bmatrix} p \\ q_r \\ q_q \end{bmatrix} = V_p \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} \quad (\text{IV.38})$$

Avec :  $q_q$  la puissance réactive sur l'axe q,  $q_r$  la puissance réactive sur l'axe r.

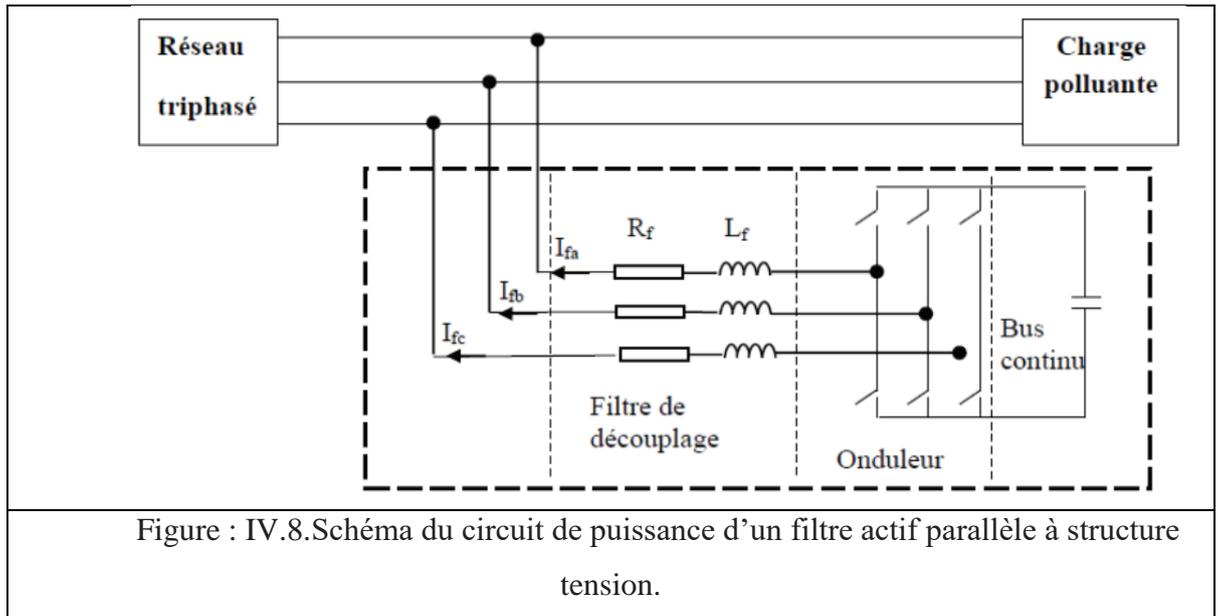
On peut aussi exprimer les courants en fonction des puissances comme suite :

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = \frac{1}{V_p} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q_r \\ q_q \end{bmatrix} \quad (\text{IV.39})$$

### IV.3.LA PARTIE PUISSANCE D'UN FILTRE ACTIF PARALLELE A STRUCTURE TENSION :

Le schéma du circuit de puissance d'un filtre actif parallèle à structure tension est donné sur la figure IV.8 On y distingue trois éléments :

- un onduleur de tension.
- un filtre de découplage.
- un élément de stockage capacitif.



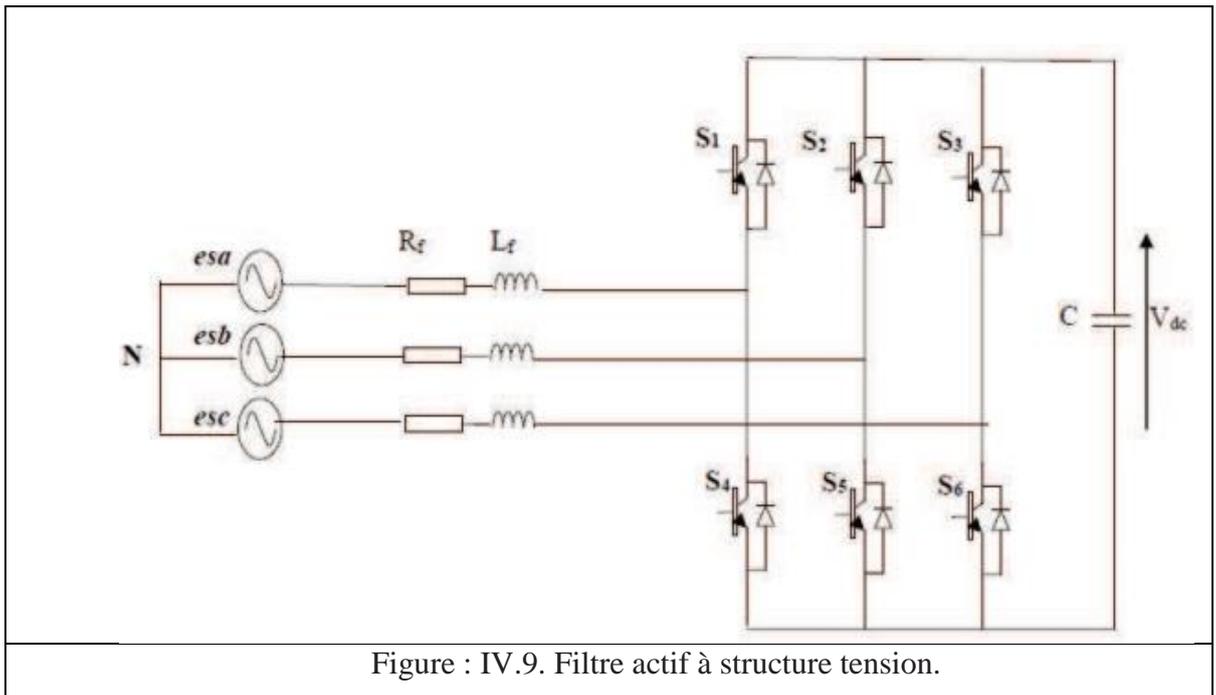
La figure IV.9 présente le filtre actif à structure tension où l'onduleur de tension est connecté en parallèle sur le réseau via un filtre de découplage ( $L_f$ ,  $R_f$ ). La capacité  $C$  se comporte comme une source de tension continue. La tension  $V_{dc}$  aux bornes du condensateur doit être positive et maintenue constante par la commande. Ses fluctuations doivent être faibles d'une part pour ne pas dépasser la limite en tension des semi-conducteurs constituant les interrupteurs et d'autre part pour ne pas dégrader les performances du filtre actif [45].

#### IV.3.1.L'onduleur de tension, [45] :

L'onduleur triphasé est constitué d'interrupteurs bidirectionnels en courant. Ils sont réalisés par des semi-conducteurs commandables à l'ouverture et à la fermeture (de type IGBT dans la majorité des cas) montés en antiparallèle avec une diode. Pour cette structure, on doit respecter les contraintes suivantes :

- A un instant donné, un seul interrupteur d'un même bras doit conduire afin d'éviter tout court-circuit de la source de tension,

- Le courant de ligne doit toujours trouver un chemin possible d'où la mise en antiparallèle de diodes au niveau des interrupteurs.



En théorie, nous commandons les deux semi-conducteurs d'un même bras de façon complémentaire : la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre. Avec cette hypothèse, l'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur de la figure IV.9 dépendent de l'état de trois signaux de commande ( $T1, T2, T3$ ), définis ci-dessous :

$$T_1 = \begin{cases} 1 & s_1 \text{ fermé et } s_4 \text{ ouvert} \\ 0 & s_4 \text{ fermé et } s_1 \text{ ouvert} \end{cases}$$

$$T_2 = \begin{cases} 1 & s_2 \text{ fermé et } s_5 \text{ ouvert} \\ 0 & s_5 \text{ fermé et } s_2 \text{ ouvert} \end{cases}$$

$$T_3 = \begin{cases} 1 & s_3 \text{ fermé et } s_6 \text{ ouvert} \\ 0 & s_6 \text{ fermé et } s_3 \text{ ouvert} \end{cases}$$

En pratique, les deux semi-conducteurs d'un même bras ne doivent jamais conduire en même temps afin d'éviter de court-circuiter la source de tension ; il faut donc générer un temps d'attente, également appelé temps mort, entre la commande au blocage d'un interrupteur et la commande à l'amorçage de l'autre interrupteur du même bras. Ainsi, à partir des états des interrupteurs présentés par les variables  $T1, T2$  et  $T3$ , on obtient huit cas possibles pour les 3 tensions de sortie du filtre actif  $V_{fi}$  (référencées par rapport au point de mi-tension continue), comme le montre le Tableau IV.1.

Tableau : IV.1.Tensions en sortie de l'onduleur.

$V_{fa}$	$V_{fb}$	$V_{fc}$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$N^{\circ}$	$Cas$
0	0	0	0	0	0		0
$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	1	0	0		1
$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	0	1	0		2
$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	1	1	0		3
$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$	0	0	1		4
$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	1	0	1		5
$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	0	1	1		6
0	0	0	1	1	1		7

### IV.3.2.Filtre de découplage, [45] :

Le but du filtre de découplage est de permettre la connexion de l'onduleur de tension au réseau électrique qui est très souvent considéré comme une source de courant qui génère des courants harmoniques à partir de la différence des tensions entre la sortie du pont onduleur et le réseau. Ce filtre est un filtre qui limite certes la dynamique du courant mais réduit en même temps la propagation sur le réseau électrique des composantes dues aux commutations.

Dans ce travail, nous avons utilisé un filtre entre l'onduleur et le réseau électrique qui se compose d'une inductance  $L_f$  de résistance interne  $R_f$ , comme le montre la figure IV.9. Notons toutefois que des filtres de découplage du troisième ordre, de type L-C-L, pourraient également être utilisés. Dans notre étude, nous emploierons ce filtre du premier ordre.

### IV.3.3.Système de stockage d'énergie, [64] :

Le stockage de l'énergie du côté continu se fait souvent par un système de stockage capacitif représenté par un condensateur  $C_{dc}$  qui joue le rôle d'une source de tension continue  $V_{dc}$ . Le choix des paramètres du système de stockage ( $V_{dc}$  et  $C_{dc}$ ) se répercute sur la dynamique et sur la qualité de compensation du filtre actif parallèle. En effet, une tension  $V_{dc}$  élevée améliore la dynamique du filtre actif. De plus, les ondulations de la tension continue  $V_{dc}$ , causées par les courants engendrés par le filtre actif et limitées par le choix de  $C_{dc}$ , peuvent dégrader la qualité de compensation du filtre actif parallèle. Ces fluctuations sont d'autant plus importantes que l'amplitude du courant du filtre est grande et que sa fréquence est faible. Le condensateur du coté continu a deux fonctionnalités principales :

Maintenir la tension avec un faible taux d'ondulation en régime permanent, être un réservoir qui sert à fournir la différence d'énergie de la charge et la source durant le régime transitoire.

En régime permanent, la puissance active fournie par la source doit être égale à la puissance active absorbée par la charge plus une faible puissance active qui sert à compenser les pertes dans le filtre. La tension de la cote continue peut être maintenue à une valeur de référence désirée.

Néanmoins, quand les conditions de charge changent, la puissance transitant entre la source et la charge est perturbée et la différence d'énergie est compensée par le condensateur du coté continu ce qui éloigne cette tension de sa référence. Pour satisfaire les fonctionnalités du filtre actif, la valeur maximale du courant de référence doit être ajusté proportionnellement à l'énergie fournie par la source. Si la tension aux bornes du condensateur a été régulée et a atteint sa tension de référence, l'énergie fournie par la source est supposée être égale à l'énergie consommée par la charge. La valeur maximale du courant de référence est obtenue par régulation de la tension cotée continue.

#### **IV.4.CONTROLE DES COURANTS DU FILTRE ACTIF (PARTIE COMMANDE) :**

Les performances du filtre actif et notamment la diminution du THD du courant de source sont certes liées aux performances de la génération des références de courants harmoniques, mais dépendent également de la stratégie de commande de l'onduleur de tension (poursuite des références de courant).

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

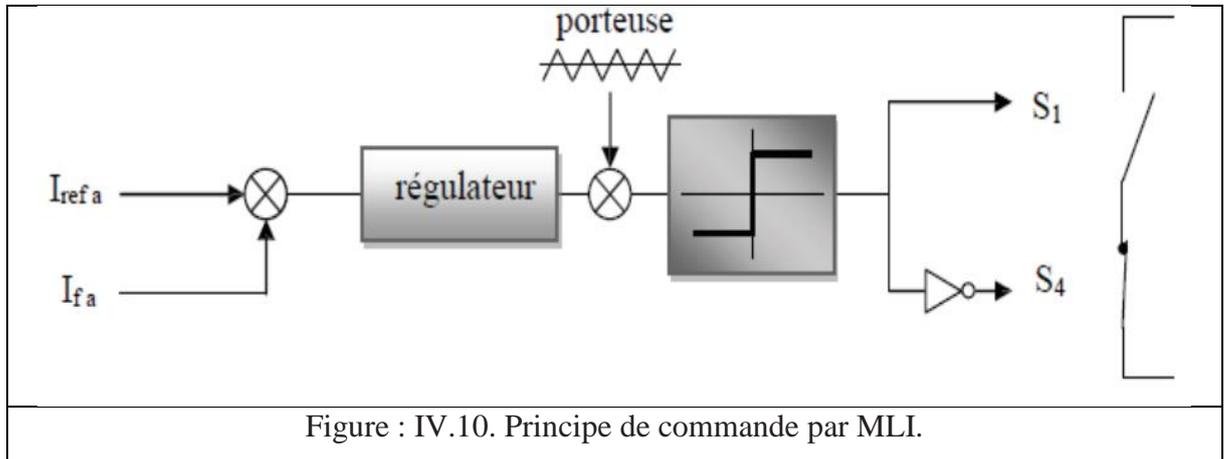
- La commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI).
- La commande par MLI vectorielle.
- La commande par hystérésis.

L'objectif de la commande, que ce soit à MLI ou par hystérésis, est de générer les ordres d'ouverture/fermeture des interrupteurs de manière à ce que le courant du filtre actif soit le plus proche de sa référence [45].

##### **IV.4.1.Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI), [65] :**

La technique de commande par MLI : la commande par modulation de largeur d'impulsion résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation en fonctionnant avec une fréquence fixe facile à filtrer en aval de l'onduleur.

La plus simple et la plus connue des modulations de largeur d'impulsion est sans doute la MLI à échantillonnage naturel, dite MLI intersective. Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur (modulatrice) à partir de l'écart entre le courant mesuré et sa référence. Cette dernière est ensuite comparée avec un signal triangulaire (porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs. Le Schéma de principe est donné par la figure IV.10.



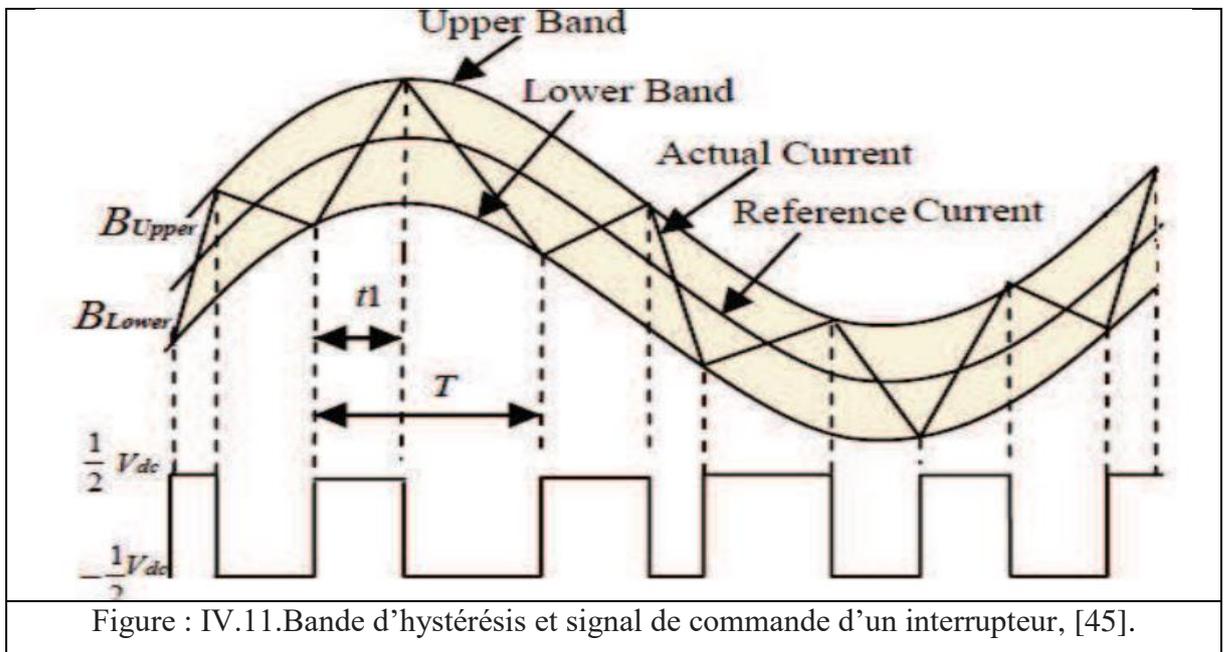
#### IV.4.2. Commande par hystérésis :

La commande par hystérésis appelée tout ou rien, utilise l'erreur existante entre le signal de référence et la mesure du signal de sortie. L'erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis, une règle pratique consiste à la prendre à 5% du courant nominal [68].

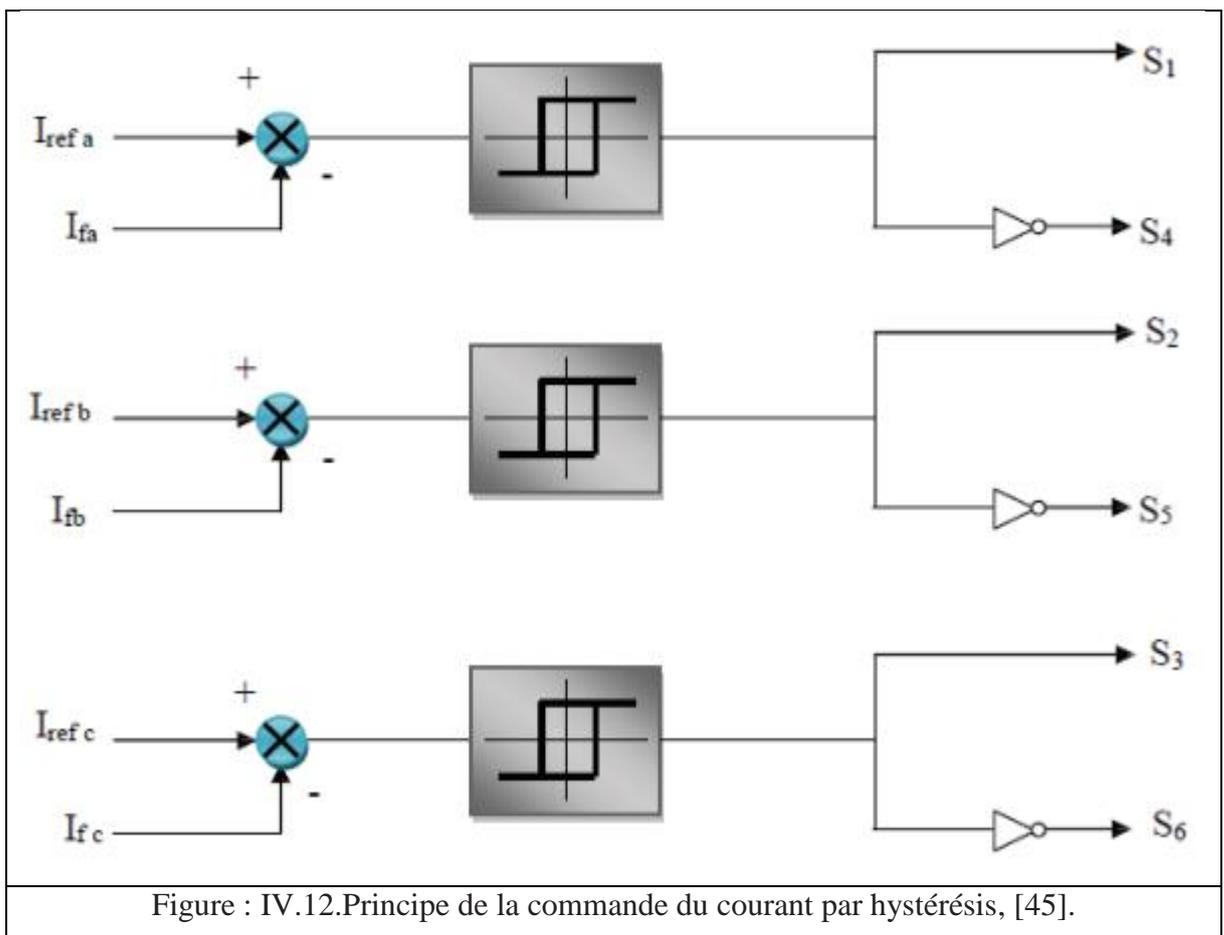
Chaque sortie de ce gabarit entraîne un changement de configuration des interrupteurs Figure IV.12. Ce système de contrôle est caractérisé par une fréquence de commutation variable. La mise en œuvre de cette stratégie de contrôle est relativement simple [69, 70].

Le choix de la bande d'hystérésis doit tenir compte d'un certain nombre de conditions liées au fonctionnement de l'onduleur, parmi lesquelles la fréquence de commutation admissible pour les composants semi-conducteurs [69, 70].

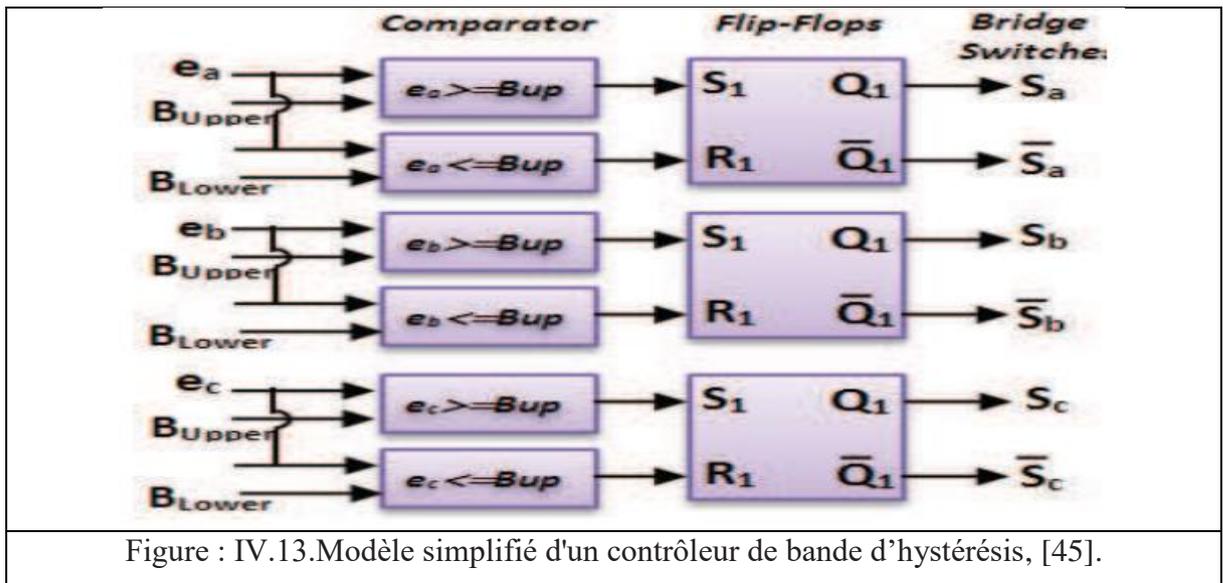
Dans notre travail on va utiliser ce type de commande car les performances de compensation par la commande hystérésis sont meilleures, en dynamique et en statique [71].



Le schéma synoptique de la commande des courants du filtre actif par des régulateurs à hystérésis est donné par la figure IV.5 :



La Figure IV.13 représente le modèle simplifié d'un contrôleur de bande d'hystérésis.



#### IV.5.CONCLUSION :

Dans ce chapitre, on s'est intéressé à la présentation des différentes stratégies de détection des harmoniques basées respectivement sur la méthode des puissances instantanées (pq), la théorie de référentiel synchrone (dq) et la théorie des puissances instantanées dans le référentiel (pqr).

Nous avons également discuté en détail des principaux types d'ordres ainsi que des composants de FAP et de son mécanisme d'action.

Dans le prochain chapitre, nous comptons sur le programme Matlab. Pour voir l'effet du filtre sur les réseaux électriques qui contiennent les harmoniques et comment rendre le courant à l'état normal.

# Chapitre V

SIMULATION

&

Résultats

## V.1.SIMULATION:

## V.2.DESCRPTION DU MODELE A ETUDIER :

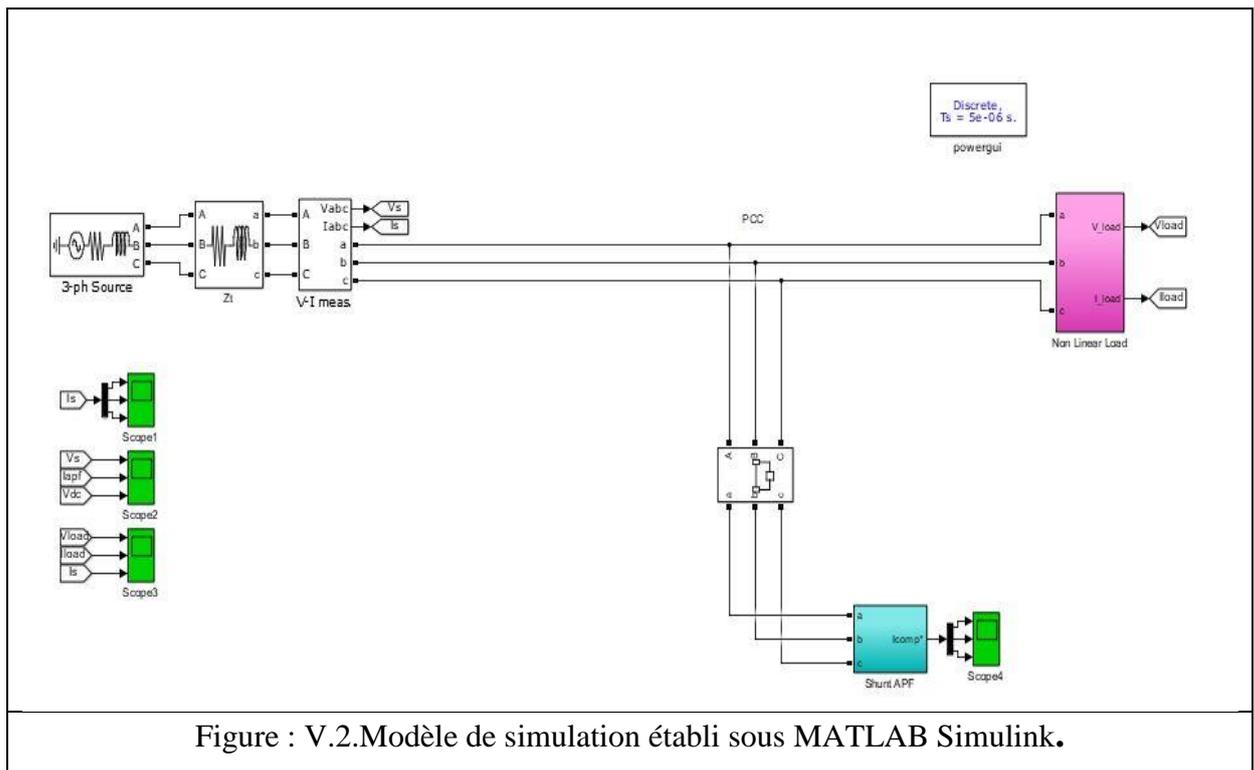
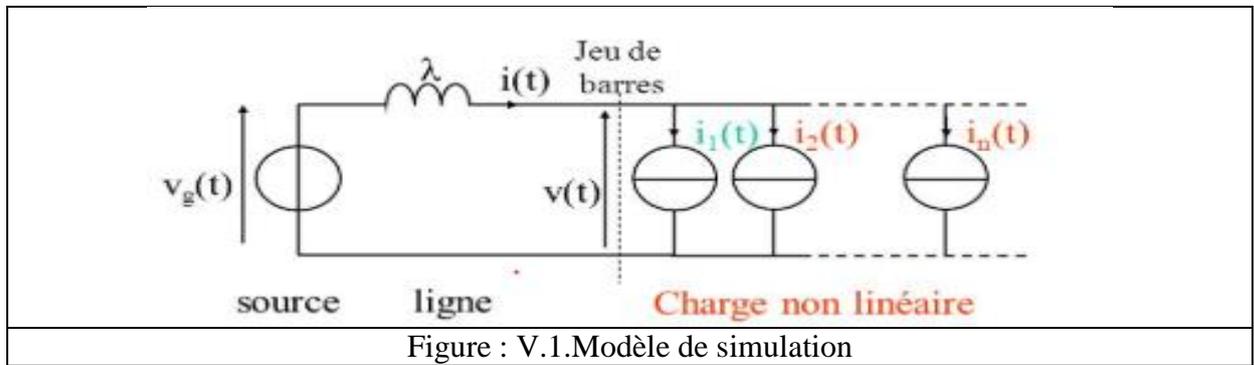
Les modèles et l'ensemble des simulations sont réalisés dans l'environnement Matlab/Simulink. L'objectif est de montrer l'efficacité de l'utilisation de la méthode des puissances instantanées (pq) pour l'identification et la commande dans le filtrage actif parallèle appliquée à une charge non linéaire.

La charge polluante est constituée par un pont redresseur triphasé à diodes et le réseau d'alimentation est un réseau triphasé. Le réseau d'alimentation est modélisé par phase par une f.é.m. sinusoïdale en série avec une inductance ( $L_s$ ) et une résistance ( $R_s$ ) caractérisant l'impédance de court-circuit du réseau, voir Figures V.1. Le redresseur débite dans une charge (RLC). L'inductance et la résistance à l'entrée du redresseur modélisent l'impédance de ligne et les éventuelles inductances additionnelles mises en oeuvre pour limiter les variations de courant. Un filtre actif parallèle triphasé à structure tension, Pour la commande de l'onduleur du filtre actif shunt à base du MOSFET, nous avons utilisé la commande par hystérésis.

Les paramètres de simulation sont rassemblés dans le Tableau V.1.

Tableau : V.1. Parameters du système.

<b>Réseau d'alimentation</b>				
Paramètre	Vs(V)	F(Hz)	Rs( $\Omega$ )	Ls (H)
Valeurs	380	50	0.001	1e-8
<b>Charge non-linéaire</b>				
Paramètre	R ( $\Omega$ )	L (H)	C(F)	
Valeurs	10	1e-6	0.1e-6	
<b>Charge déséquilibrée</b>				
	R ( $\Omega$ )	L (H)	C(F)	
Charge 1	6	1e-6	0.1e-6	
Charge 2	4	1e-6	0.1e-6	
Charge 3	2	1e-6	0.1e-6	
<b>Filtre actif shunt</b>				
Paramètre	Lf (H)	Rf ( $\Omega$ )	V <sub>dc</sub> (V)	
Valeurs	1.2e-3	10	850	



Pour tester l'efficacité du filtre en réduisant les harmoniques du réseau électrique. Nous avons surveillé le format du courant source et les courant charges avant de connecter le FAP, et nous avons fait les mêmes mesures après avoir connecté le FAP.

Nous avons également calculé le THD avant et après la connection du FAP au réseau électrique, La différence de résultats expliquera le rôle FAP dans la réduction du risque d'harmoniques sur le réseau.

Les résultats des simulations utilisant Matlab Simulink étaient les suivants :

### V.3.RESULTATS AVANT L'INSERTION DU FAP :

Les Figures (V.3 et V.4) montrent respectivement le courant de charge et le courant de source avant l'insertion du FAP

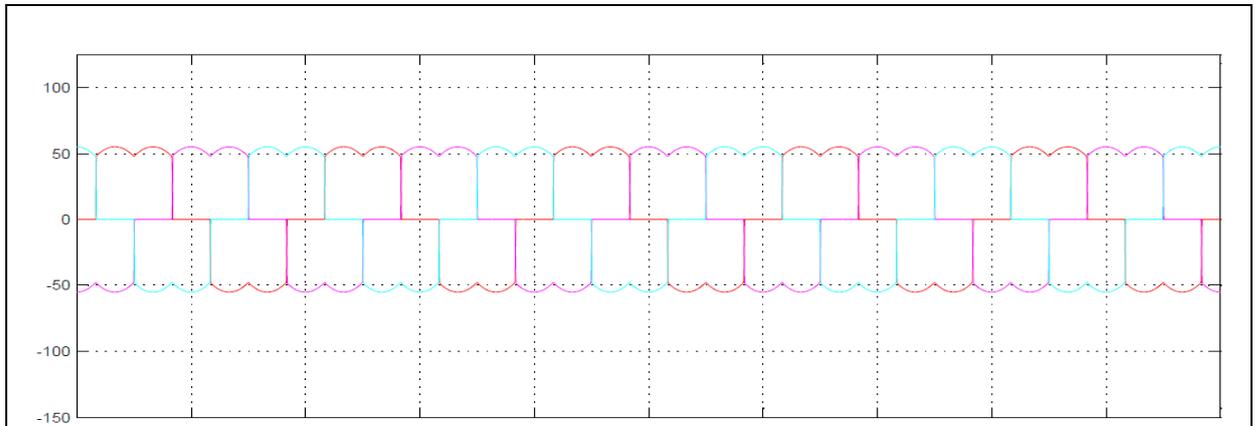


Figure : V.3.le courant de la charge avant l'insertion du filtre actif.

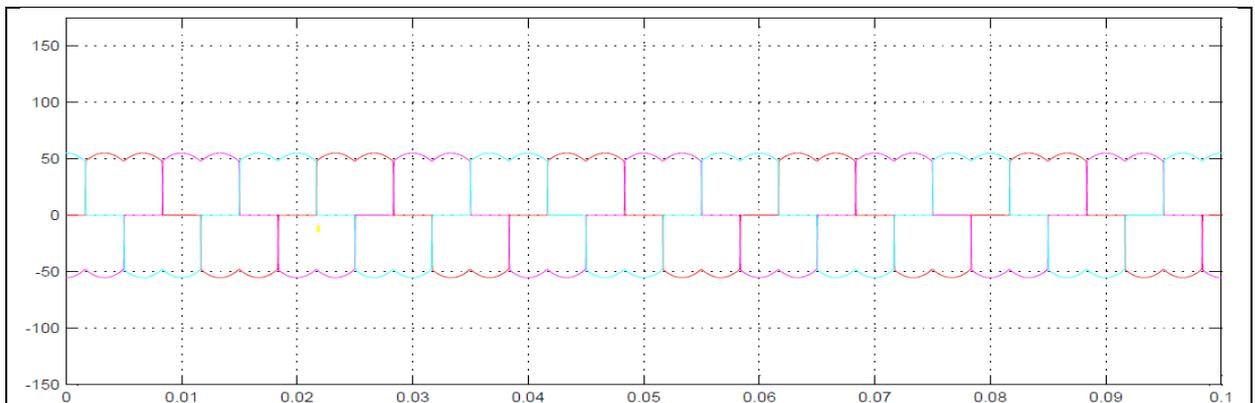


Figure : V.4.le courant de la source avant l'insertion du filtre actif.

Les Figures (V.5, V.6, V.7) montrent respectivement Les courants de la source avant l'insertion du filtre actif.

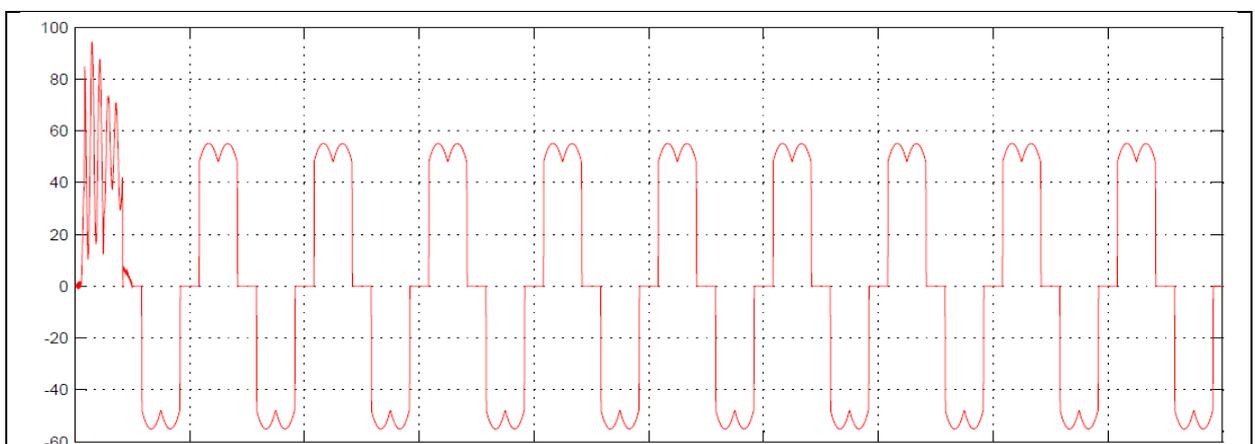


Figure : V.5. Le courant de la source avant l'insertion du filtre actif, phase a.

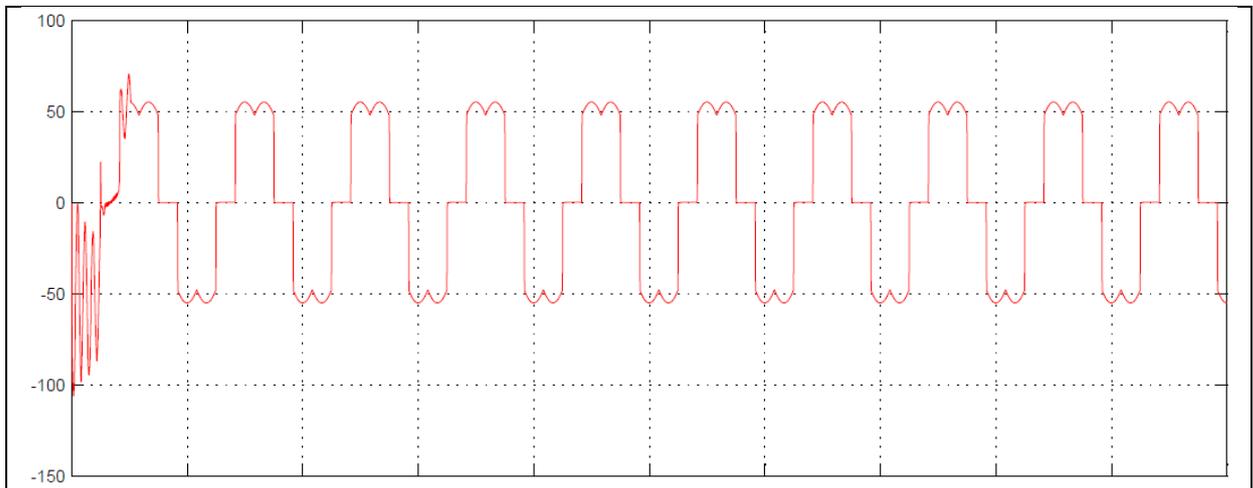


Figure : V.6. Le courant de la source avant l'insertion du filtre actif, phase b.

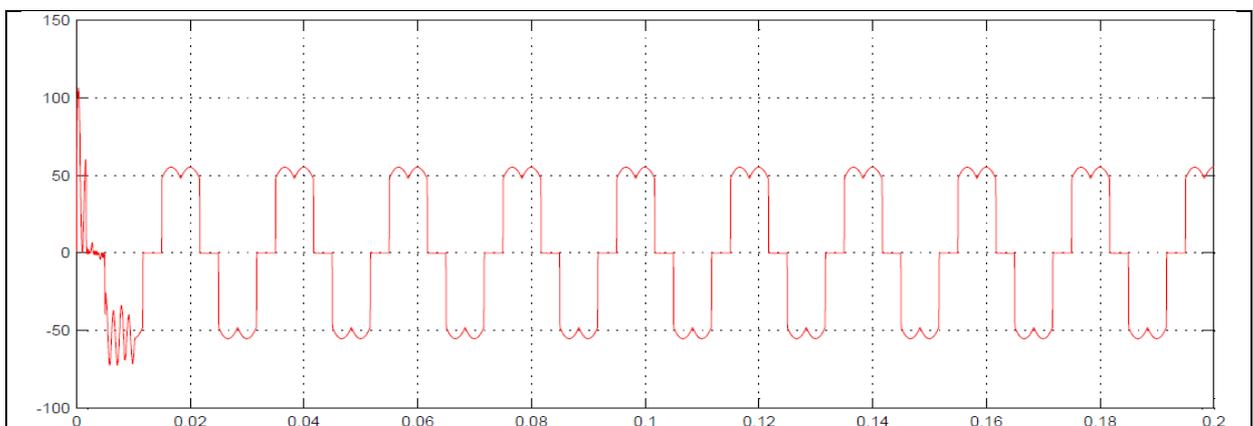
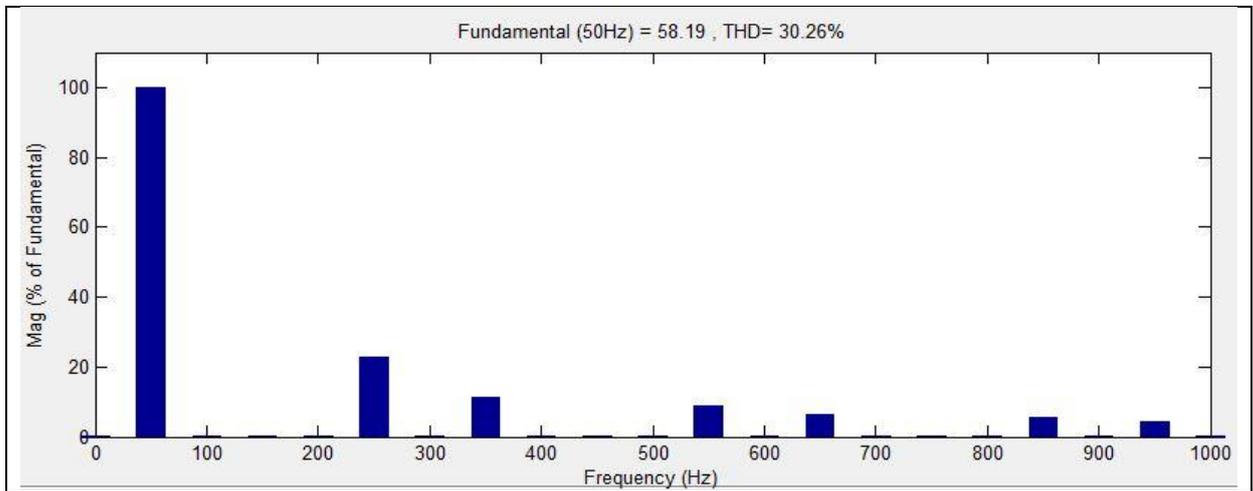
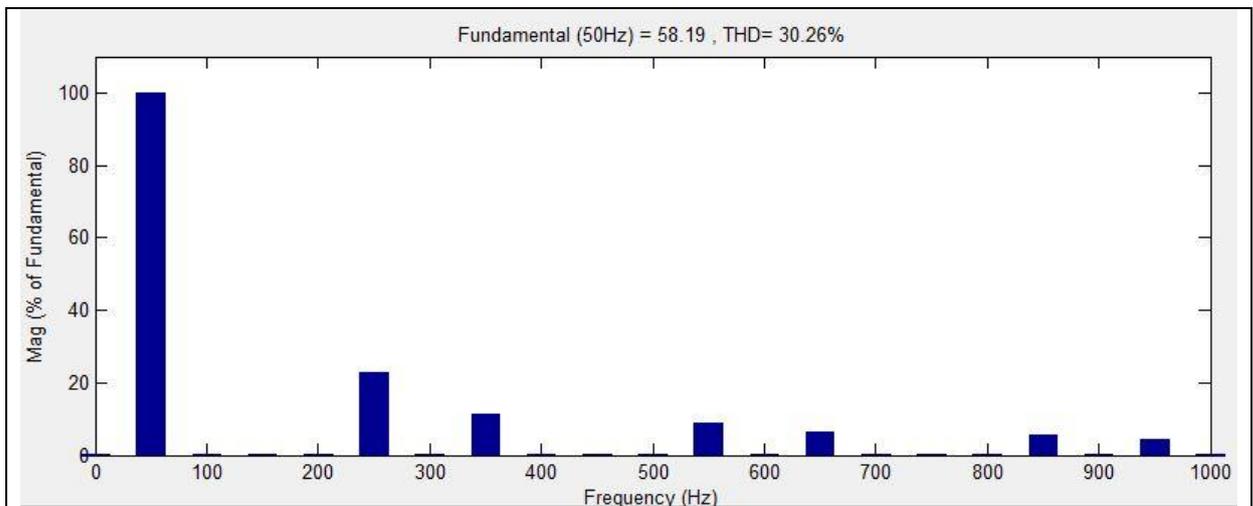
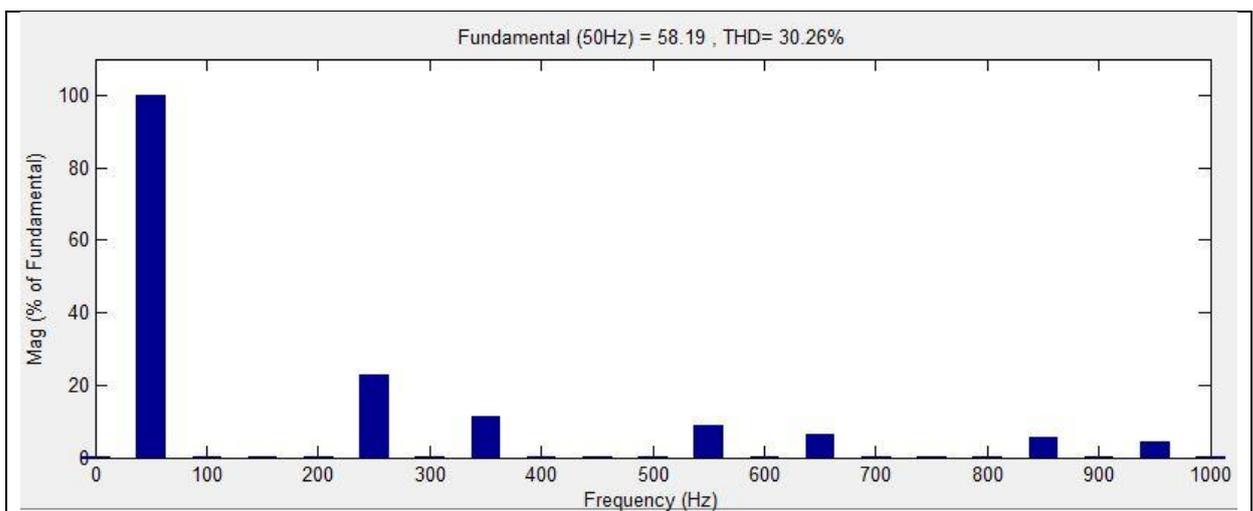


Figure : V.7. Le courant de la source avant l'insertion du filtre actif, phase c.

On remarque que la charge non linéaire génère des courants non sinusoïdaux qui provoque la pollution du réseau étudié ; En effet, on constate des déformations dans l'onde du courant de source qui perd sa forme sinusoïdale.

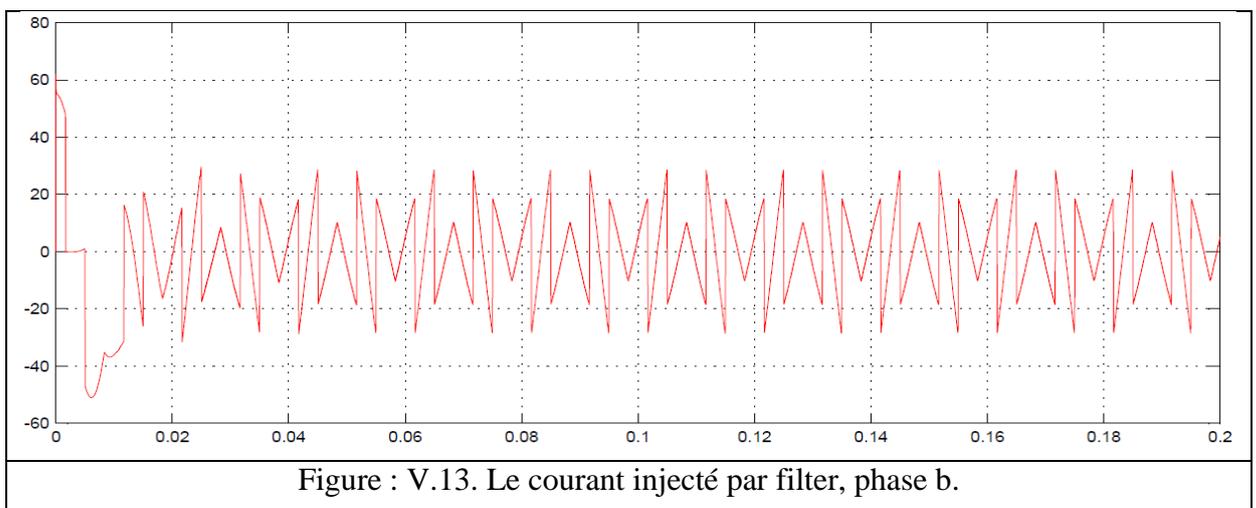
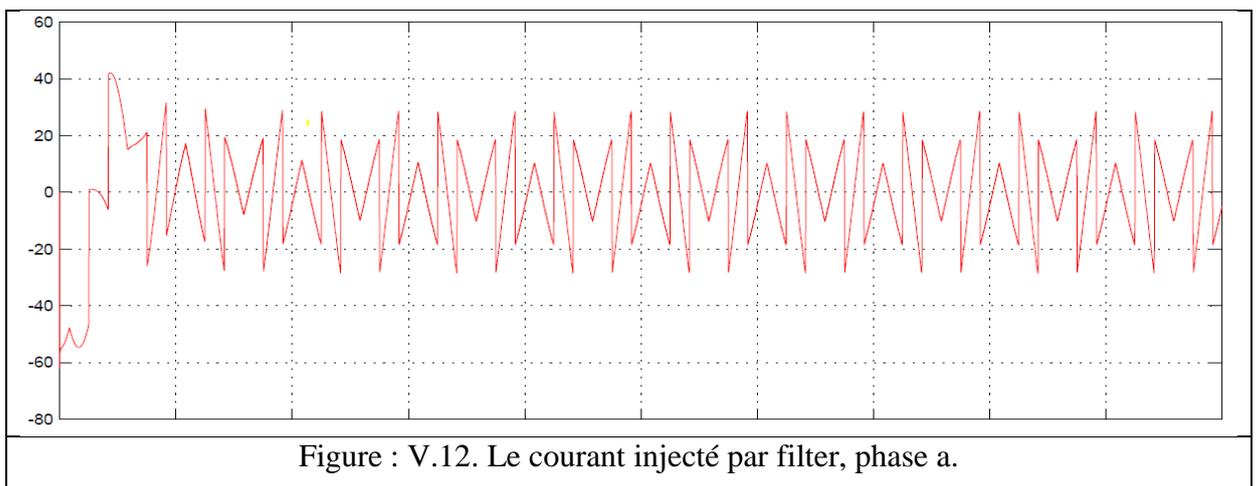
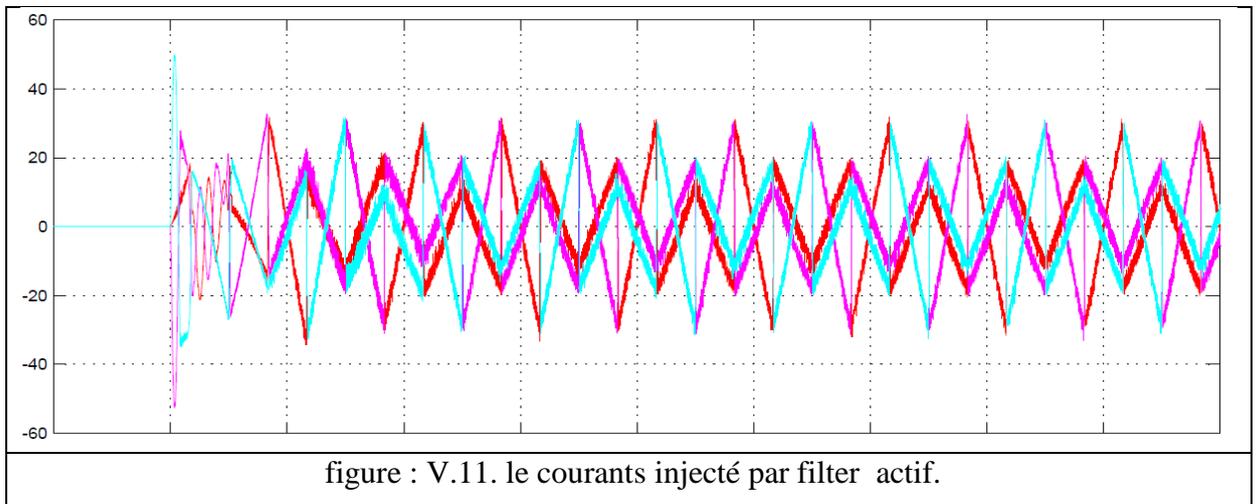
### V.3.1.TH D :

L'analyse spectrale du courant absorbé par la source est représentée dans les Figures (V.8, V.9 et V.10) ces dernières montrent la présence, en plus de la fondamentale (rang 1), des harmoniques de rang 5, 7, 11, 13, 17 et 19 ...etc. Le taux de distorsion (THD) dans les phases (*a*, *b* et *c*) est de **30.26%**, **30.26%**, **30.26%** respectivement, ces valeurs sont bien au-dessus de la norme IEEE519.

Figure : V.8.Spectre harmonique de courant de la source phase-*a*- avant filtrage.Figure : V.9.Spectre harmonique de courant de la source phase-*b*- avant filtrage.Figure : V.10. Spectre harmonique de courant de la source phase-*c*- avant filtrage.

#### V.4.RESULTAS APRES L'INSERTION DU FAP:

le Figure (V.11, V12, V13, V14) montrent respectivement Les courants injecté par filter actif.



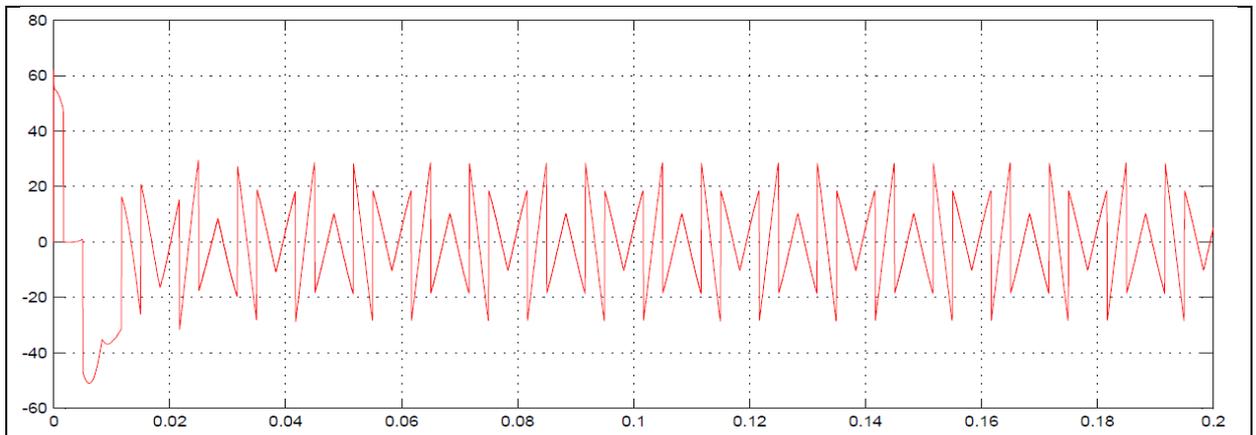


Figure : V.14. Le courant injecté par filter, phase c.

Les Figures (V.15, V.16, V.17, V.18) montrent respectivement Les courants de la source après l'insertion du filtre actif.

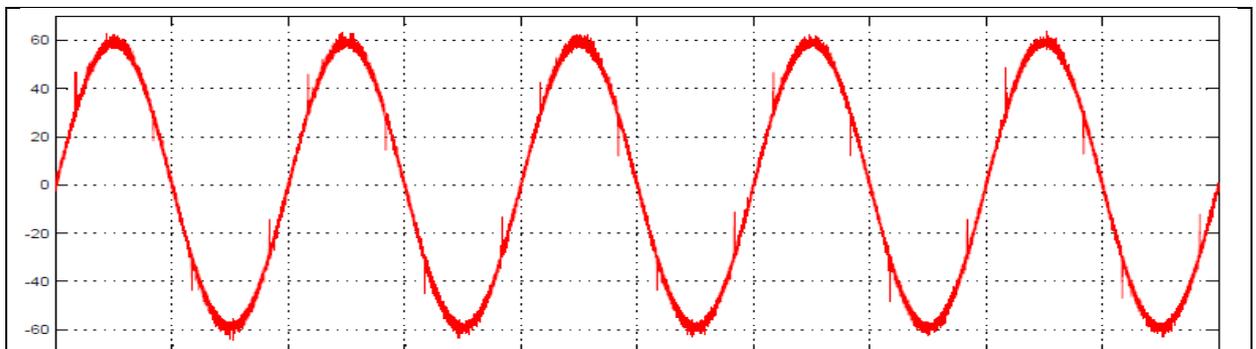


Figure : V.15. le courant de la source après l'insertion du filtre actif, phase a.

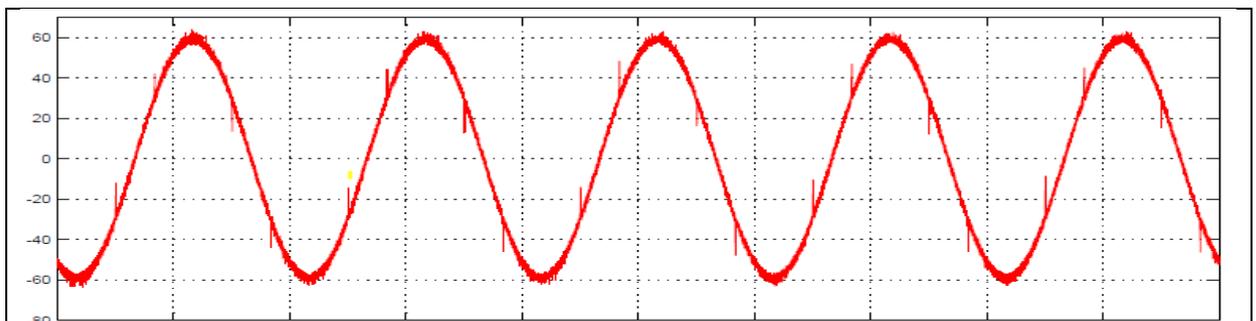


Figure : V.16. le courant de la source après l'insertion du filtre actif, phase b.

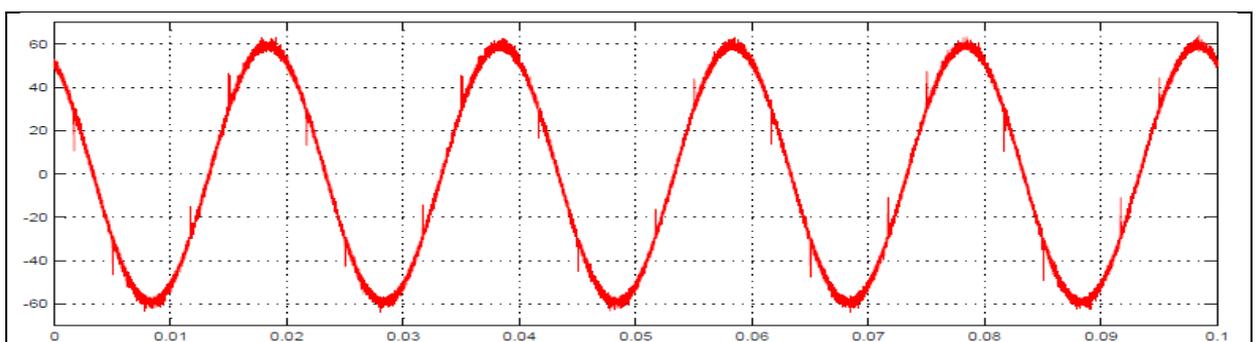
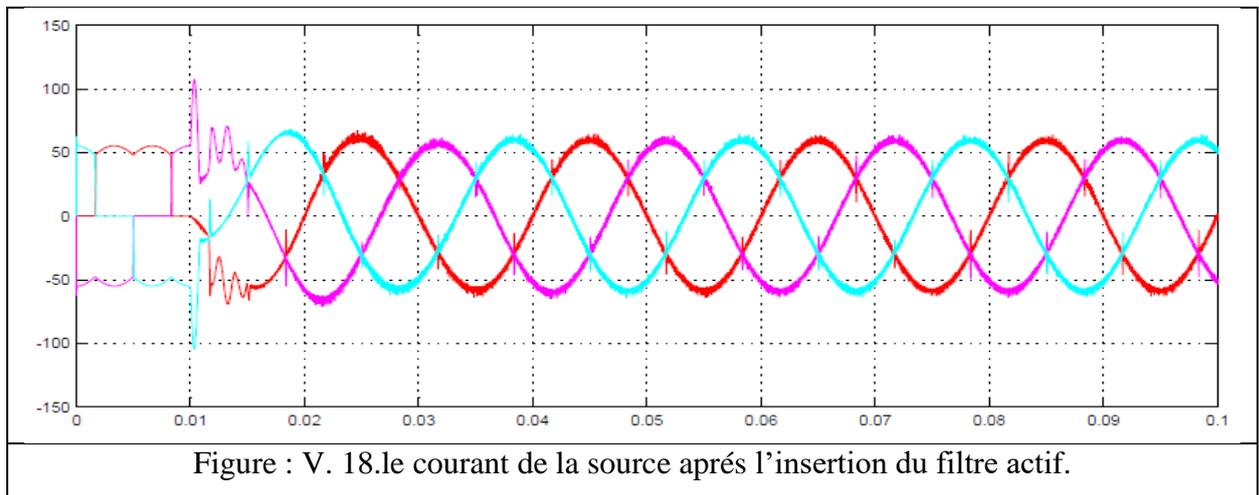
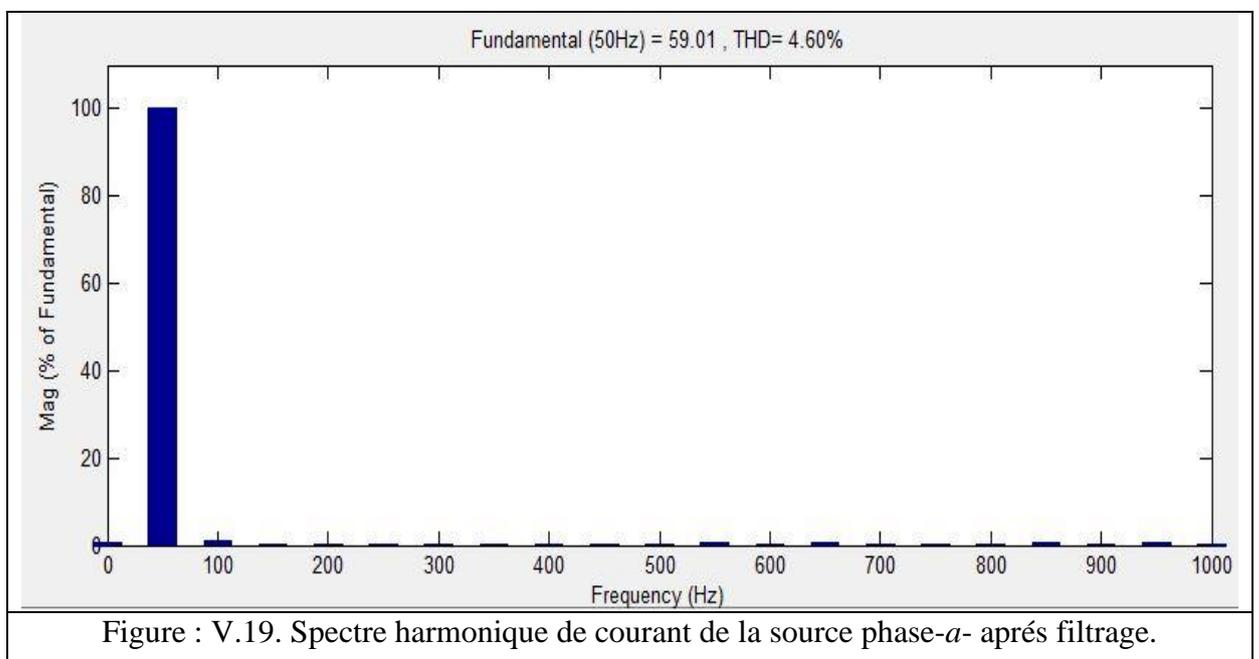


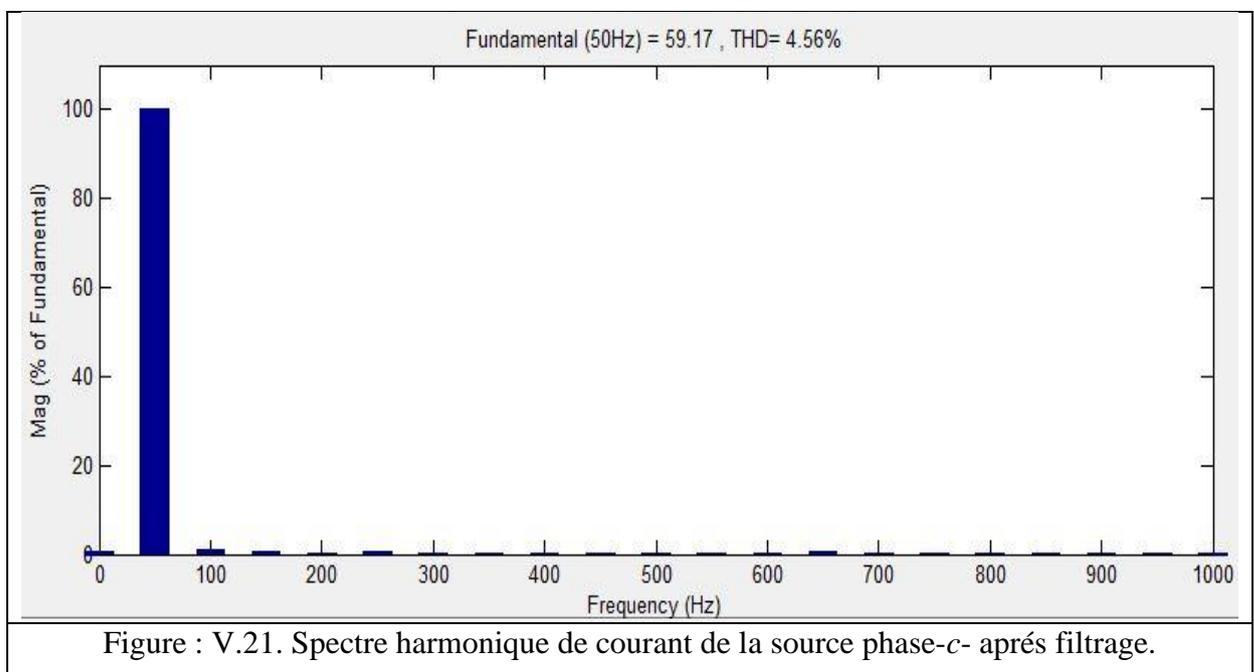
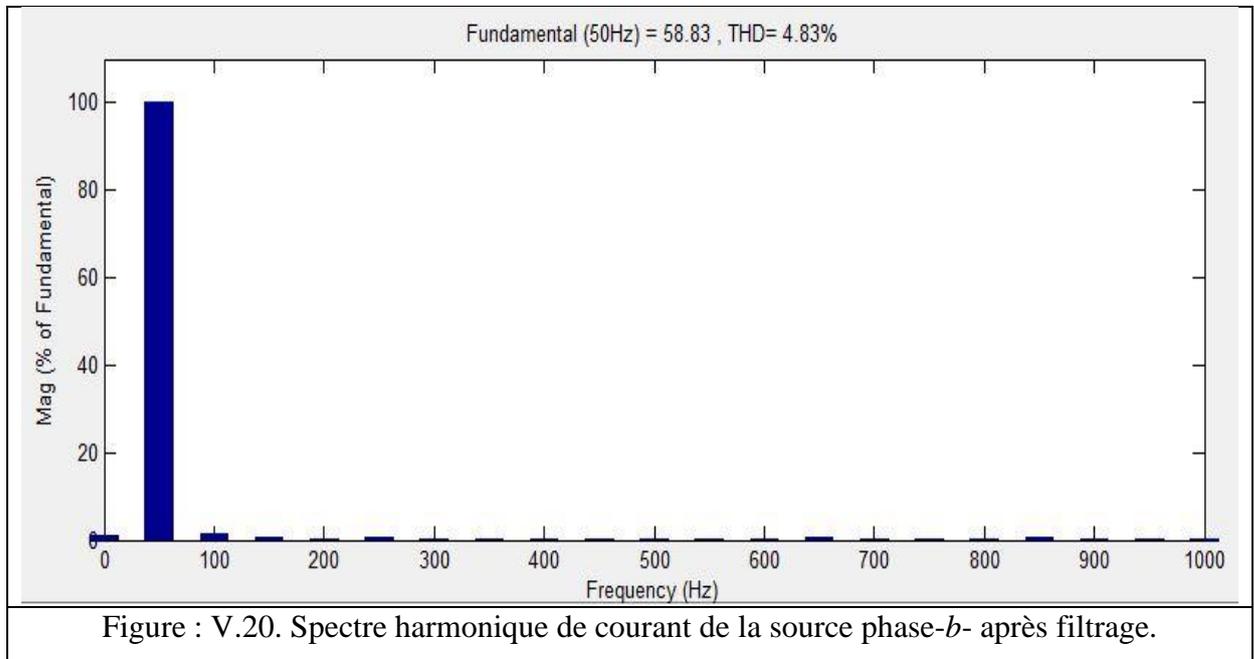
Figure : V.17. le courant de la source après l'insertion du filtre actif, phase c.



#### V.4.1.TH D :

Les Figures (V.19, V.20 et V.21) présentent l'analyse spectrale de courant de source effectuée sur les trois phases. Cette représentation spectrale confirme le non présence des harmoniques, ces dernières sont compensées. Le THD qui était à 30.26%, pour les phases (a, b et c) respectivement est réduit après filtrage à un taux très faible de 4.60%, 4.83% et 4.56%, pour les phases (a, b et c) respectivement, Ces valeurs illustrent l'efficacité des théories la puissance instantanée (pq).





## V.5.COMPARAISON DES RESULTATS :

Les résultats que nous avons obtenus (tableau V.2) montrent que le taux de distorsion harmonique est significativement réduit. C'est la preuve que la méthode de la puissance instantanée a contribué à l'élimination d'une grande partie des harmoniques dans le réseau.

Le tableau V.2 illustre les résultats de simulation du filtre actif pour la méthode de la puissance instantanée (pq).

Tableau : V.2.Les résultats comparatifs du THD.

THD		Sans FAP	FAP avec la méthode pq
	Phase a	30.26%	4.60%
	Phase b	30.26%	4.83%
	Phase c	30.26%	4.56%

## V.6.CONCLUSION :

Résultats de la simulation du FAP sur la base d'un réflecteur de tension triphasé, avec la méthode de puissance actuelle (pq) ils étaient très bons.

Après avoir injecté le courant de référence du FAP dans le réseau, on peut observer qu'une fois que le FAP est allumé, le courant de la grille est maintenant sinusoïdal et libre de toute perturbation, la distorsion harmonique est significativement réduite.

Nos simulations ont illustré l'efficacité du filtre actif parallèle dans la réduction du risque harmonique.

# Chapitre VI

## CONCLUSION & PERSPECTIVE

## VI.1.CONCLUSION :

Les évolutions techniques et réglementaires qui ont eu lieu ces dernières années sur le réseau électrique ont donné lieu à des exigences chaque fois plus élevées pour les systèmes à base d'électronique de puissance. Mais le besoin croissant induit automatiquement une multiplication de ces équipements, qui à leurs tours provoquent la pollution du réseau électrique. Ces pollutions sont principalement causées par des charges non linéaires, ces derniers à base de convertisseurs de puissances offrent de l'énergie sous plusieurs formes et sont de plus en plus utilisées dans l'industrie.

Une des solutions les plus efficaces pour corriger ces inconvénients est l'utilisation des filtres actifs parallèles ayant pour but, de dépolluer le réseau et de compenser l'énergie réactive Ce qui nous permet d'avoir un courant du réseau presque sinusoïdal avec un facteur de puissance unitaire.

Nous avons étudié la pollution harmonique dans les réseaux électriques son origine, risques pour les appareils et les réseaux et des solutions possibles nouveau et traditionnel.

Ensuite, nous avons élargi notre étude de l'une des solutions les plus efficaces et les plus récentes, C'est le filtre actif parallèle Nous avons vu ses composants et le rôle de chaque composant du filtre actif parallèle.

Comme nous l'avons vu diverses méthodes utilisées pour identifier les harmoniques :

- Théorie de la puissance instantanée (pq).
- Théorie du référentiel synchrone (dq).
- Théorie des puissances instantanées dans le référentiel (pqr).

Les différentes commandes utilisées par le filtre parallèle actif :

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

Afin de garantir l'efficacité de ces méthodes nous avons simulé le programme Matlab Simulink Un réseau électrique triphasé contient des charges non linéaires qui vont contaminer le réseau et déformer la forme sinusoïdale du courant.

Nous connectons un filtre actif parallèle qui dépend de la Théorie de la puissance instantanée (pq) pour identifier les harmoniques dans le réseau électrique et la méthode de La commande par hystérésis.

Nous avons observé à travers des simulations que la méthode a contribué de manière significative à la réduction des harmoniques Ceci est illustré par les graphiques obtenus et enfin, nous avons résumé les résultats dans un tableau montrant la différence de THD avant et après le traitement du réseau électrique par le filtre actif parallèle.

## **VI.2.PERSPECTIVES :**

À travers les chapitres, nous avons observé le risque d'harmoniques, dans nos simulations, nous avons observé comment le filtre actif parallèle a contribué à minimiser le problème.

Mais nous avons également remarqué qu'il ne l'a pas complètement éliminé, bien qu'il l'ait grandement réduit.

Cela nécessite une recherche continue sur des moyens plus efficaces que ceux actuellement disponibles jusqu'à ce que nous éliminions finalement les harmoniques.

# REFERENCES

## Références bibliographiques

- [1].DUFFEY, Christopher K. Et Stratford, Ray P. Update Of Harmonic Standard Ieee-519: Ieee Recommended Practices And Requirements For Harmonic Control In Electric Power Systems. Industry Applications, Ieee Transactions On, 1989, Vol. 25, No 6, P. 1025-1034.
- [2].BERMEO, Amaia Lopez De Heredia. Commandes avancées des systèmes dédiés à l'amélioration de la qualité de l'énergie : de la basse tension à la montée en tension. 2006. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG.
- [3].NDJAKOMO, Essiane Salomé, PERABI, Ngoffe Stève, MOUKENGUE, Imano Adolphe, Et Al. Présentation Et Application D'un Nouveau Schéma De Contrôle D'un Filtre Hybride Parallèle A Des Réseaux Electriques Triphasés 400V/50Hz Et 480V/60Hz. Afrique Science: Revue Internationale Des Sciences Et Technologie, 2014, Vol. 10, No 2.
- [4].SASAKI, H. et MACHIDA, T. A new method to eliminate ac harmonic currents by magnetic flux compensation-considerations on basic design. Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, 1971, no 5, p. 2009-2019.
- [5].ARORA, N. MOSFET Models for VLSI Circuit Simulation—Theory and Practice. Computational Microelectronics. Springer-Verlag, Wien NewYork, 1993.
- [6].LASKA, T., MÜNZER, M., PFIRSCH, F., Et Al. The Field Stop IGBT (FS IGBT)-A New Power Device Concept With A Great Improvement Potential. In : ISPO'2000: International Symposium On Power Semiconductor Devices And IC's. 2000. P. 355-358.
- [7].PAPENFUSS, Jeffrey R. Et WICKERT, M. A. Implementation Of A Real-Time, Frequency Selective, RF Channel Simulator Using A Hybrid DSP-FPGA Architecture. In : Radio And Wireless Conference, 2000. RAWCON 2000. 2000 IEEE. IEEE, 2000. P. 135-138.
- [8].BRUYANT, Nicolas. ETUDE ET COMMANDE GENERALISEES DE FILTRES ACTIFS PARALLELES. Compensation Globale Ou Sélective Des Harmoniques. Régime Equilibré Ou Déséquilibré. 1999. Thèse De Doctorat.
- [9] Techniques Neuromimétiques Pour La Commande Dans Les Systèmes Electriques: Application Au Filtrage Actif Parallèle Dans Les Réseaux Electriques Basse Tension. Thèse De Doctorat, Djaffar Ould Abdeslam.

- [10] Analyse Des Indices De La Qualité D'énergie Electrique Et Les Phénomènes Transitoires Dans Les Réseaux Electrique. Thèse De Doctorat, CHERIF FETHA.
- [11] Contribution A L'étude Des Compensateurs Actifs Des Réseaux Electriques Basse Tension. Thèse De Doctorat, Mohamad Alaa Eddin Alali.
- [12] Heydt, Electric Power Quality: A Tutorial Introduction, IEEE Computer Applications In Power, Vol.11, No.1, January 1998, Pp.15-19.
- [13] Méthodes D'analyse De La Qualité De L'énergie Electrique. Application Aux Creux De Tension Et A La Pollution Harmonique. Thèse De Doctorat, Vanya Ignatova.
- [14] Normes IEEE Std 519-1992; IEEE Recommended Practices And Requirements For Harmonic Control In Electrical Power Systems; 12 April1993, Page(S):15- 99.
- [15] Methodes D'analyse Des Perturbations Electriques Dans La Qualite De L'energie Electrique En Utilisant Des Nouvelles Techniques Pour L'application Aux Creux De Tension. Memoire Préparé Au Département D'electrotechnique Université De Batna Présenté Par Gattal Boulaares.
- [16]. M. Lebziz " Etude de la pollution harmonique dans les réseaux industriels " Séminaire GL1K, Zone Industrielle, Skikda, 2005.
- [17]. Th. Deflandre & P. Mauras, " La Maîtrise Des Harmoniques Sur Les Réseaux Industriels & Tertiaires.1ière Partie : Qualité De L'alimentation Electrique", Les Cahiers De L'ingénierie, Direction Des Etudes & Recherche, Service Etudes De Réseaux, Département Postes & Lignes, EDF Industrie, France, 1997.
- [18] Présentée En Vue De L'obtention Du Diplôme De DOCTORAT En Sciences Option Réseaux Electriques Par CHELLI Zoubir Amélioration De La Qualité De L'énergie Electrique Par Un Filter Actif D'harmonique.
- [19].ALALI, Mohamad Alaa Eddin. Contribution A l'Etude Des Compensateurs Actifs Des Réseaux Electriques Basse Tension:(Automatisation Des Systèmes De Puissance Electriques). 2002. Thèse De Doctorat. Strasbourg 1.
- [20]. COLLOMBET, C., LUPIN, J. M., et SCHONEK, J. Perturbations Harmoniques Dans Les Réseaux Pollués, Et Leur Traitement, Cahier Technique N 152. Schneider Electric.

- [21]. TH. DEFLANDRE & P. MAURAS, " La Maîtrise Des Harmoniques Sur Les Réseaux Industriels & Tertiaires. 2eme Partie : Solution, Mise En Oeuvre Et Etude De Cas ", Les Cahiers De L'ingénierie, Direction Des Etudes & Recherche, Service Etudes De Réseaux, Département Postes & Lignes, EDF Industrie, France, 1997.
- [22]. J. Arrillaga, N. R Watson, " Power System Quality Assessment ", Nanyang Technological University Singapore, University Of Canterbury, Christchurch, New Zeland, S Chen, 1985.
- [23]. FERRACCI, Philippe. La Qualité De L'énergie Electrique. Cahier Technique, 2001, No 199, P.13.
- [24]. ROUND, Simon D. Et DUKE, Richard M. Active Filter Optimisation For Efficient Variable Frequency Remote Generation. In : Industry Applications Society Annual Meeting, 1993., Conference Record Of The 1993 IEEE. IEEE, 1993. P. 894-898.
- [25]. STRATFORD, Ray P. Harmonic Pollution On Power Systems-A Change In Philosophy. Industry Applications, IEEE Transactions On, 1980, No 5, P. 617-623.
- [26]. GOMBERT, Christophe. Simulation Temps-Réel Des Dispositifs D'électronique De Puissance Dédiés Aux Réseaux D'énergie Electrique. 2005. Thèse De Doctorat. Institut National Polytechnique De Grenoble-INPG.
- [27]. PEJOVIC, Predrag Et JANDA, Zarko. An Improved Current Injection Network For Three-Phase High-Power-Factor Rectifiers That Apply The Third Harmonic Current Injection. Industrial Electronics, IEEE Transactions On, 2000, Vol. 47, No 2, P. 497-499.
- [28]. AREDES, Mauricio, HEUMANN, Klemens, Et WATANABE, Edson H. An Universal Active Power Line Conditioner. Power Delivery, IEEE Transactions On, 1998, Vol. 13, No 2, P. 545-551.
- [29]. FUJITA, Hideaki et AKAGI, Hirofumi. The Unified Power Quality Conditioner: The Integration Of Series And Shunt-Active Filters. Power Electronics, IEEE Transactions On, 1998, Vol. 13, No 2, P. 315-322.
- [30]. FUJITA, Hideaki et AKAGI, Hirofumi. A Practical Approach To Harmonic Compensation In Power Systems-Series Connection Of Passive And Active Filters. Industry Applications, IEEE Transactions On, 1991, Vol. 27, No 6, P. 1020-1025.

- [31]. EL-HABROUK, M., DARWISH, M. K., et MEHTA, P. Active Power Filters: A Review. *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, 2000, Vol. 147, No 5, P. 403-413.
- [32]. CHENG, Po-Tai, BHATTACHARYA, Subhashish, Et DIVAN, Deepak M. Control Of Squarewave Inverters In High-Power Hybrid Active Filter Systems. *Industry Applications*, *IEEE Transactions On*, 1998, Vol. 34, No 3, P. 458-472.
- [33]. DA SILVA, SA Oliveira, DONOSO-GARCIA, P., CORTIZO, Porfírio C., Et Al. A Lineinteractive UPS System Implementation With Series-Parallel Active Power-Line Conditioning For Three-Phase, Four-Wire Systems. *International Journal Of Electrical Power & Energy Systems*, 2004, Vol. 26, No 6, P. 399-411.
- [34]. DA SILVA, SA Oliveira, DONOSO-GARCIA, Pedro Francisco, CORTIZO, Porfírio Cabaleiro, Et Al. A Three-Phase Line-Interactive UPS System Implementation With Series-Parallel Active Power-Line Conditioning Capabilities. *Industry Applications*, *IEEE Transactions On*, 2002, Vol. 38, No 6, P. 1581-1590.
- [35]. SHAFIEE KHOOR, MOHSEN. Amélioration De La Qualité De L'énergie A L'aide De Compensateurs Actifs: Série, Parallèle Ou Conditionneurs Unifiés De Réseaux Electriques. 2006. Thèse De Doctorat. Nantes.
- [36]. ZHANG, YONGCHANG, XIE, WEI, LI, ZHENGXI, *Et Al.* Model Predictive Direct Power Control Of A PWM Rectifier With Duty Cycle Optimization. *IEEE Transactions On Power Electronics*, 2013, Vol. 28, No 11, P. 5343-5351.
- [37]. SATYANARAYANA, G., PRASAD, K. N. V., KUMAR, G. Ranjith, Et Al. Improvement Of Power Quality By Using Hybrid Fuzzy Controlled Based IPQC At Various Load Conditions. In : *Energy Efficient Technologies For Sustainability (ICEETS)*, 2013 International Conference On. *IEEE*, 2013. P. 1243-1250.
- [38]. WEN-XING, Wang et XUE-LING, Zhu. Harmonic-Suppression System Based On Fuzzy Neural Control In Power Line. In : *Information Engineering (ICIE), 2010 WASE International Conference On*. *IEEE*, 2010. P. 93-96.
- [39]. HADIOUCHE, Djafar, RAZIK, Hubert, et REZZOUG, Abderrezak. On The Modeling And Design Of Dual-Stator Windings To Minimize Circulating Harmonic Currents For VSI

Fed AC Machines. Industry Applications, IEEE Transactions On, 2004, Vol. 40, No 2, P. 506-515.

[40]. SENTHILNATHAN, N. et MANIGANDAN, T. A Novel Control Strategy For Line Harmonic Reduction Using Three Phase Shunt Active Filter With Balanced And Unbalanced Supply. European Journal Of Scientific Research, 2012, Vol. 67, No 3, P. 456-466.

[41]. ASIMINOAEI, Lucian, BLAABJERG, Frede, Et HANSEN, Steffan. Evaluation Of Harmonic Detection Methods For Active Power Filter Applications. In : Applied Power Electronics Conference And Exposition, 2005. APEC 2005. Twentieth Annual IEEE. IEEE, 2005. P. 635-641.

[42]. SALAM, ZAINAL, TAN, PERNG CHENG, ET JUSOH, Awang. Harmonics Mitigation Using Active Power Filter: A Technological Review. Elekrika, 2006, Vol. 8, No 2, P. 17-26.

[43]. NAKAJIMA, T. et MASADA, E. An Active Power Filter With Monitoring Of Harmonic Spectrum. In : EPE-89, 3rd European Conference On Power Electronics And Applications, Aachen, Germany. 1989.

[44]. BENCHAITA, LAHLALI. Etude, Par Simulation Numérique Et Expérimentation, D'un Filtre Actif Parallèle A Structure Courant Avec Une Nouvelle Méthode De Contrôle-Commande. 1998. Thèse De Doctorat.

[45]. CHELLI, Z., TOUFOUTI, R., OMEIRI, A., Et Al. Hysteresis Control For Shunt Active Power Filter Under Unbalanced Three-Phase Load Conditions. Journal Of Electrical And Computer Engineering, 2015, Vol. 2015.

[46]. CHANDRA, AMBRISH, SINGH, BHIM, SINGH, B. N., et Al. An Improved Control Algorithm Of Shunt Active Filter For Voltage Regulation, Harmonic Elimination, Power-Factor Correction, And Balancing Of Nonlinear Loads. Power Electronics, Ieee Transactions On, 2000, Vol. 15, No 3, P. 495-507.

[47]. GUFFON, Severine. Modélisation Et Commandes A Structure Variable De Filtres Actifs De Puissance. 2000. Thèse De Doctorat.

- [48]. AKAGI, HIROFUMI, KANAZAWA, YOSHIHIRA, ET NABAE, AKIRA. Generalized Theory Of The Instantaneous Reactive Power In Three-Phase Circuits. In : *IPEC*. 1983. P. 1375-1386.
- [49]. OMEIRI, AMAR. Simulation D'un Filtre Actif Parallèle De Puissance Pour La Compensation Des Harmoniques De Courant. 2007. Thèse De Doctorat.
- [50]. SINGH, BHIM, AL-HADDAD, KAMAL, ET CHANDRA, Ambrish. A Review Of Active Filters For Power Quality Improvement. *Industrial Electronics, IEEE Transactions On*, 1999, Vol. 46, No 5, P. 960-971.
- [51]. DASH, P. K., PANDA, S. K., LIEW, A. C., et al. A New Approach To Monitoring Electric Power Quality. *Electric Power Systems Research*, 1998, Vol. 46, No 1, P. 11-20.
- [52]. BURRUS, C. S. S. ET PARKS, THOMAS W. DFT/FFT And Convolution Algorithms: Theory And Implementation. John Wiley & Sons, Inc., 1991.
- [53]. HOSTETTER, GENE H. Recursive Discrete Fourier Transformation. *Acoustics, Speech And Signal Processing, IEEE Transactions On*, 1980, Vol. 28, No 2, P. 184-190.
- [54]. DJEGHLOUD, HIND. Filtrage Actif De Puissance. 2007. Thèse De Doctorat, Université Mentouri, Constantine.
- [55]. AKAGI, HIROFUMI. New Trends In Active Filters For Power Conditioning. *Industry Applications, IEEE Transactions On*, 1996, Vol. 32, No 6, P. 1312-1322.
- [57]. Mattavelli, P. Closed-Loop Selective Harmonic Compensation For Active Filters, *IEEE Trans. On Ind. App*, 2001, Vol. 37, No. 1, Pp. 81-89.
- [58]. LASCU, CRISTIAN, ASIMINOAEI, Lucian, BOLDEA, Ion, Et Al. High Performance Current Controller For Selective Harmonic Compensation In Active Power Filters. *Power Electronics, IEEE Transactions On*, 2007, Vol. 22, No 5, P. 1826-1835.
- [59]. TADJER, SID AHMED. Étude D'un Système De Compensation D'harmonique En Utilisant Un Générateur Photovoltaïque" GPV". 2008.

- [60]. AKAGI, HIROFUMI ET FUJITA, HIDEAKI. A New Power Line Conditioner For Harmonic Compensation In Power Systems. Power Delivery, IEEE Transactions On, 1995, Vol. 10, No 3, P. 1570-1575.
- [61]. BOLLEN, Math HJ et ZHANG, L. D. Different Methods For Classification Of Three-Phase Unbalanced Voltage Dips Due To Faults. Electric Power Systems Research, 2003, Vol. 66, No 1, P. 59- 69.
- [62]. HOOSHMAND, RAHMAT ALLAH ET ESFAHANI, MAHDI TORABIAN. A New Combined Method In Active Filter Design For Power Quality Improvement In Power Systems. ISA Transactions, 2011, Vol. 50, No 2, P. 150-158.
- [63]. UCAR, MEHMET ET OZDEMIR, Engin. Control Of A 3-Phase 4-Leg Active Power Filter Under Non-Ideal Mains Voltage Condition. Electric Power Systems Research, 2008, Vol. 78, No 1, P. 58- 73.
- [64]. NEKKAR, DJAMEL. Contribution A l'Etude Des Stratégies De Commande Des Filtres Actifs Triphasés. 2014. Mémoire De Magister.
- [65]. ABDESLAM, D. OULD, WIRA, PATRICE, MERCKLÉ, JEAN, Et Al. Stratégie Neuromimétique D'identification Et De Commande D'un Filtre Actif Parallèle. Revue Internationale Du Génie Electrique,(RS-RIGE) P, 2006, P. 35-64.
- [66]. OUNEJJAR, YOUSSEF, AL-HADDAD, KAMAL, ET GREGOIRE, L.-A. Novel Three Phase Seven Level Pwm Converter. In : Electrical Power & Energy Conference (Epec), 2009 Ieee. Ieee, 2009. P. 1-6.
- [67]. KARUPPANAN, P., RAM, SASWAT KUMAR, ET MAHAPATRA, KAMALAKANTA. THREE LEVEL HYSTERESIS CURRENT CONTROLLER BASED ACTIVE POWER FILTER FOR HARMONIC COMPENSATION. In : Emerging Trends In Electrical And Computer Technology (Icetect), 2011 International Conference On. Ieee, 2011. P. 407-412.
- [68]. INGRAM, DAVID ME ET ROUND, SIMON D. A Fully Digital Hysteresis Current Controller For An Active Power Filter. International Journal Of Electronics, 1999, Vol. 86, No 10, P. 1217-1232.

- [69]. BENMEDDOUR, M., BOUMAHRAZ, M., et GHANEM, M. C. Facteur De Puissance Unitaire Par Commande A Hystérésis Variable Dans La Cascade Dévolteur-Survolteur. *Courrier Du Savoir*, 2007, Vol. 8.
- [70]. KWON, BONG-HWAN, KIM, TAE-WOO, ET YOUM, JANG-HYOUN. A Novel SVM-Based Hysteresis Current Controller. *Power Electronics, Ieee Transactions On*, 1998, Vol. 13, No 2, P. 297-307.
- [71]. KALE, MURAT ET OZDEMIR, Engin. An Adaptive Hysteresis Band Current Controller For Shunt Active Power Filter. *Electric Power Systems Research*, 2005, Vol. 73, No 2, P. 113-119.
- [72]. JOSEPH, DEEPTHI, KALAIARASI, N., ET RAJAN, K. A Novel Reference Current Generation Algorithm For Three Phase Shunt Active Power Filter. In : *Power Electronics And Renewable Energy Systems*. Springer India, 2015. P. 1467-1475.
- [73]. ADAM, GEORGE, STAN, ALINA G., ET LIVINT, GHEORGHE. A Matlab-Simulink Approach To Shunt Active Power Filters. In : *ECMS*. 2011. P. 205-210.
- [74]. ÖZDEMİR, ENGIN, KALE, MURAT, ET ÖZDEMİR, Şule. Active Power Filter For Power Compensation Under Non-Ideal Mains Voltages. In : *Proc. 11th Mediterranean Conference On Control And Automation*, Rhodes, Grécia. 2003.
- [75]. J. L. AFONSO, C. COUTO, J. S. MARTINS, Active Filters With Control Based On The P-Q Theory, *IEEE Industrial Electronics Society Newsletter*, Vol. 47, N° 3, Set. 2000, P. 5-10.
- [76]. MONTERO, MARIA ISABEL MILANES, CADAVAL, Enrique Romero, Et GONZÁLEZ, Fermín Barrero. Comparison Of Control Strategies For Shunt Active Power Filters In Three-Phase Four-Wire Systems. *Power Electronics, IEEE Transactions On*, 2007, Vol. 22, No 1, P. 229-236.