

Département de génie électrique et de l'informatique

Option : commande et électronique industrielle

Projet de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de master

FILTRAGE PASSIF ET ACTIF PARALLEL DES COURANTS GENERES PAR LES LAMPES L.B.C

Réalisé par :

M. Laidani Hicham

M. Bouchenafa Abderrahmane

Proposé et Dirigé par:

Dr. Moulahoum Samir

Dr. Houassine Hamza

Laboratoire de soutien

« Laboratoire de recherche en électrotechnique et en automatique LREA »

Remerciements :

Tous notre remerciements vont tout premièrement à Dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nos données pour terminer ce mémoire.

Nous remercions nos encadreurs Mr. H.Houassine et Mr. S. Moulahoum Maître de conférences à l'université de Médéa, pour l'aide et la disponibilité.

Notre remerciements vont également à notre, parents, collègue et tous les étudiants de la faculté des sciences et de technologies, et tous ceux qui ont participé à ce travail de près ou de loin.

ABDERRAHMANE. BOUCENAFA. ET HICHEM .LAIDANI.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à

Mes très chaires parents

Mon frère

Mes sœurs, leurs maris et leurs enfants

Toute ma famille

Tous mes amis

L'université de Médéa

Spécialement :

Mr. H. Houassine , Mr. S. Moulahoum

Abderrahmane Bouchenafa

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à

Mes très chaires parents

Mes frères

Mes sœurs, leurs maris et leurs enfants

Toute ma famille

Tous mes amis

L'université de Médéa

Spécialement :

Mr. H. Houassine , Mr. S. Moulahoum

Laidani Hichem

SOMMAIRE

SOMMAIRE I

Résumé V

Liste des Tableaux VI

Liste des figures VII

Liste des abréviations XI

Introduction générale 1

Chapitre I

Perturbation des réseaux BT et réglementations

I.1 Introduction 3

I.2 Qualité de l'énergie 3

I.3 Perturbations des réseaux 3

I.3.1 Caractérisation des perturbations 4

I.3.1.1 Facteur de puissance 5

I.3.1.2 Taux de distorsion harmonique 6

I.3.1.3 Facteur de distorsion 6

I.3.1.4 Facteur de crête 7

I.4 Origine des harmoniques 7

I.5 Notion de la charge non_linéaire 7

I.6 types des charges non linéaires 8

I .7 les effets néfastes des harmoniques 9

I.8 Normes et réglementations 11

Conclusion 16

Chapitre II

Etude et simulation des charges non linéaires

II.1 Introduction 17

II.2 Redressement non commandé (à diode).....17

II.2.1 Redresseurs monophasés.....17

II.2.1.a. Redresseurs monophasés simples alternances..... 17

II.2.1.b Redresseurs monophasés bi alternance..... 19

II.2.2 Redresseurs triphasé 22

II.2.2.a Redresseurs triphasé simples alternances..... 22

II.2.2.b Redresseur triphasé double alternance..... 24

II.3 Partie de simulation..... 26

II.3.1 redresseur monophasé double alternances avec 26
charge inductive

II.3.2 Présentation de la charge étudiée 29

II.3.3 simulation de la lampe L.B.C..... 29

II.3.4 lampe L.B.C alimenté par une tension monophasée..... 30

II.3.5 lampe L.B.C alimenté par une tension triphasée 32

Conclusion 34

Chapitre III

Etude et simulation des charges non linéaires

III.1 Introduction.....35

III.2 Etude du filtre..... 35

III.2.1 Fréquence de coupure.....36

III.3 Filtrage Passif.....36
III.3.1 Principe de fonctionnement.....37
III.3.2 classification des filtres passifs.....37
III.4 Différents types de filtres parallèles.....38
III.5 Filtre résonant.....41
III.6 Filtre amorti.....43
III.7 Circuits accordé.....44
III.8 Calcul des filtres passifs.....45
III.9 Application du filtre sur une charge non linéaire 47
III. 10. PARTIE DE SIMULATION 47
III.10.1 Résultats de simulation en monophasé……47
III.10.2 Résultats de simulation en triphasé……52
III.11 Partie expérimentale 56
Conclusion..... 58

Chapitre IV

Filtrage actif parallèle

IV.1 Etat de l'art des filtres actifs parallèles ….....59
IV.2 Introduction 60
IV.3 Filtrage actif 60
IV.4 Topologie générale 61
IV.5 Classement des filtres actifs parallèles 62
IV.5.1 Le filtre actif série 64
IV.5.2 Filtre Actif Parallèle (FAP)….....65
IV.5.3 Structures hybrides 66

IV.5.3.1 Combinaison de filtres actifs parallèles et séries 66

IV.5.3.2 Combinaison de filtres actifs séries et de filtres passifs.....67
parallèles

IV.5.3.3 Combinaison de filtres parallèles actifs et passifs 67

IV.5.3.4 Combinaison d'un filtre actif en série avec des filtres 68
passifs parallèles

IV.6 Identification des courants harmoniques et 69
commande du Filtre Actif

IV7. Classification des méthodes d'identification 70

IV.8 Comparaison entre les méthodes d'identification des ……..... 70
courants harmoniques

IV.9 Commande du filtre actif.....76

IV.9.1 Contrôle des courants du filtre actif.....79

IV.10 Partie de simulation 82

IV.10.1 Les paramètre du filtre 82

IV.10.2 IDENTIFICATION DES COURANTS PERTURBES 82

IV.10 .3 Résultats de simulation.....83

IV.10.4 Interprétation des résultats 88

Conclusion..... 89

Conclusion général …… 90

Références bibliographie …….. 91

ملخص:

في هذه المذكرة نهدف إلى تقليل التوافقيات في الشبكات LV والحصول على نتائج مرضية (الامتثال للمعايير الدولية)، لهذا لغرض، سوف نعرف أصل هذه التوافقيات وإظهار آثارها السلبية عن طريق المحاكاة.

والحلول المقترحة هي التصفية بالترشيح الخامل والترشيح الفعال)

في ما يخص المرشحات الخاملة سندرس الرنانة و المرشحات المطفأة

و بالنسبة للترشيح الفعال سندرس (الموازية ,على التسلسل والتركيب الهجين).

لمحاكاة المرشح الفعال سنقوم باستخدام مموج (DC/AC inverter) لتوليد التيارات التوافقية على تعاكس في الصفحة مع تيارات الحمولة و التي تم تحديدها من قبل الخوارزمية PQ ومن ثم يتم تنظيم هذا التيار بواسطة (hysteresis controller).

الكلمات الرئيسية:مرشحات خاملة على التوازي FPP ، مرشحات نشطة على التوازي FAP التشويه التوافقي THD، الخوارزمية PQ.

Résumé :

Dans ce mémoire on a pour objectif de réduire les harmonique dans les réseaux BT et obtenir des résultats satisfaisants (respect les normes internationaux) , pour ce but on va connaître l'origine de ces harmoniques et faire apparaitre leurs effets néfastes par simulation

On propose les solutions de filtrage (filtrage passif, filtrages actif),

Au filtrage passif on étudiera les filtres résonants et les filtres amortie

Au filtrage actif on va faire l'étude des filtres actives (parallèles ,séries et à structure hybride).

Pour la simulation du filtrage actif parallèle en utilisant un onduleur de tension pour Générer des courants harmoniques en opposition de phase par rapport du courant de la charge qui été identifiés par l'algorithme pq et on fait la régulation de ce courant par le régulateur à hystérésis.

Mot clés : filtre passif parallèle FPP ,filtre actif parallèle FAP ,taux de distorsion harmonique TDH, algorithme pq.

ABSTRACT:

In this theses we aim to reduce the harmonic LV networks and obtain satisfactory results (compliance with international standards), for this purpose we will know the origin of these harmonics and bring up their negative effects by simulation

Proposed filtering solutions (passive filtering, filtering active)

Passive filtering to be studied resonant filters and filters amortized

Active filtering we will make the study of active filters (parallel and series hybrid structure).

For the simulation of the active filter parallel we use DC/AC inverter to generate harmonic currents in phase opposition with the current of the load which was identified by the algorithm pq than this current will be controlled by the hysteresis controller.

Keyword: passive parallel filter PPF, parallel active filter PAF total harmonic distortion THD, pq algorithm.

Liste des Tableaux

N° de Tableau		page
Tableau I.1	quelques sources des perturbations harmoniques	9
Tableau I.2	Valeurs des niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques Dans les réseaux base tension CEI-1000-2-4	13
Tableau I.3	Limites pour les émissions de courant harmonique CEI-1000-3-2	13
Tableau I.4	Niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux publics basse tension (norme CEI 61000-2-2).	14
Tableau I.5	Principales normes relatives aux harmoniques	15
Tableau IV.1	Comparaison entre les méthodes d'identification des harmoniques.	66

Liste des figures

N° de la figure		page
Figure I.1	Représentation spectrale d'un signal périodique	4
Figure I.2	Diagramme de Fresnel des puissances	5
Figure I.3	Courant absorbé par une charge non linéaire	8
Figure I.4	Addition des courants harmoniques de rang trois dans le neutre	10
Figure II.1	redresseur monophasé simple alternance	18
Figure II.2	signal d'un redresseur simple alternance.	18
Figure II.3	Redresseur à pont de Graetz.	20
Figure II.4	signal d'un redresseur à pont de Graetz.	20
Figure II.5	Redresseur à point milieu.	21
Figure II.6	redresseur triphasé simple alternance.	22
Figure II.7	signal d'un redresseur triphasé simple alternance.	23
Figure II.8	Redresseur triphasé double alternance en pont**.**	24
Figure II.9	Signal d'un redresseur triphasé double alternance en pont.	25
Figure II.10	Redresseur avec charge RL	26
Figure II.11	La courbe de la tension au borne du redresseur	27
Figure II.12	Tension de source Vs et spectre d'harmonique.	27
Figure II.13	L'allure du courant de source du redresseur(is)	28
Figure II.14	spectre d'harmonique du Courant de source Is	28
Figure II.15	Model de la lampe L B C	29
Figure II.16	tension de source Vs.	30
Figure II.17	spectre d'harmonique de la tension de source Vs.	30
Figure II.18	L'allure de courant absorbé par la lampe.	31

Figure II.19	le spectre d'harmonique du courant absorbé par la lampe	31
Figure II.20	L'allure Courant de la première phase	32
Figure II.21	Spectre d'harmonique du courant dans la phase	32
Figure II.22	Courant dans le neutre	33
Figure II.23	Spectre d'harmonique du courant dans le neutre	33
Figure II.24	La courbe de la tension simple	34
Figure II.25	Le spectre de la tension simple	34
Figure III.1	Schéma d'un filtre.	36
Figure III.2	L'emplacement du filtrage passif.	37
Figure III.3	Filtre série et Filtre parallèle.	38
Figure III.4	Raccordement d'une inductance anti-harmonique	39
Figure III.5	Installations de filtres résonants.	40
Figure III.6	Filtre amorti passe haut ,du premier ordre , du deuxième ordre et du troisième ordre.	40
Figure III.7	Installation des filtre amortie.	41
Figure III.8	L'impédance du filtre en fonction de la fréquence .	42
Figure III.9	Filtre amorti.	44
Figure III.10	Schéma monophasé d'un réseau avec deux filtres résonants et un filtre amorti.	44
Figure III.12	L'allure du courant absorbé par la lampe.	48
Figure III.13	Le spectre d'harmonique du courant de la lampe.	48
Figure III.14	La courbe de la tension au borne de la charge.	49
Figure III.15	Le spectre d'harmonique de la tension au borne de la charge.	49
Figure III.16	Circuit présente l'emplacement du filtre .	50
Figure III.17	Le courant de la source après filtrage.	50
Figure III.18	Le spectre d'harmonique de. I_{source} après filtrage.	51

Figure III.19 La courbe de la tension au borne de la charge. 51
Figure III.20 Spectre de la tension. 51
Figure III.21 Courant dans la première phase après filtrage. 52
Figure III.22 Spectre du Courant de la première phase après filtrage. 52
Figure III.23 La tension simple après filtrage. 53
Figure III.24 Spectre de La tension simple après filtrage. 53
Figure III.25 Le courant dans le neutre. 54
Figure III.26 Spectre du courant dans le neutre. 54
Figure III.27 La forme du courant dans le neutre. 55
Figure III.28 Représentation du montage réalisé au laboratoire. 56
Figure III.29 La courbe de courant de la lampe avant filtrage. 56
Figure III.30 La courbe de courant de la lampe après filtrage. 57
Figure IV.1 filtre active parallèle 61
Figure IV.2 Structure générale du filtre actif 62
Figure IV.4 Le principe des filtres actifs séries 64
Figure IV.5 Le principe des filtres actifs parallèles 65
Figure IV.6 Visualisation des courants mis en jeu 65
Figure IV.7 Combinaison de filtres actifs parallèle et série 66
Figure IV.8 Combinaison d'un filtre actif série et d'un filtre passif serie 67
Figure IV.9 Combinaison de filtre actif parallèle et de filtre passif parallèle 67
Figure IV.10 Combinaison d'un filtre actif en série avec un filtre passif parallèle . 68
Figure IV.11 Schéma de principe des filtres utilisés pour l'extraction des composantes alternatives de P et q. 75
Figure IV.12 L'algorithme de l'identification sous forme d'un schéma bloque. 76
Figure IV.13 schéma synoptique d'un filtre actif parallèle. 77

Figure IV.14	Schéma de puissance d'un réseau avec filtre actif à structure Tension.	78
Figure IV.15	Onduleur triphasé à structure tension	79
Figure IV.16	Schéma synoptique de la commande des courants du filtre actif par des régulateurs à hystérésis.	80
Figure IV.17	Principe de commande des courants par MLI	81
Figure IV.18	Répartition des commutations sur un bras d'un onduleur.	81
Figure IV.19	Schéma global sous matlab-simulink du f.a.p	82
Figure IV.20	Méthode **pq** sous Matlab-simulink	83
Figure IV.21	Les tensions du réseau d'alimentation.	83
Figure IV.22	Courant absorbé par la charge polluante (en triphasé).	84
Figure IV.23	Spectre harmonique de .is.	84
Figure IV.24	Figure Les courants de référence triphasés	85
Figure IV.25	Le courant de filtre	85
Figure IV.26	Le spectre harmonique du courant de filtre.	86
Figure IV.27	Le courant de charge	86
Figure IV.28	Le spectre harmonique du courant de charge	87
Figure IV.29	Le courant de source is	87
Figure IV.30	spectre harmonique de is	88

LISTE DES ABREVIATIONS

CA/CC

D : la puissance déformante

f_c *: la fréquence de coupure*

f_r *: la fréquence de résonance*

F_c *: le facteur de crête*

F_d *: le facteur de distorsion*

F_p *: le facteur de puissance*

$F(j\omega)$ *: la fonction de transfert*

(FBD) : Algorithme Fryze-Bucholz Depenbanck.

FAP *: filtre actif parallèle*

FPP : filtre passif parallèle

GTO : Gate turn off.

I(t) : La valeur du courant instantané

I_0 *: valeur de la composante continue, dans ce cas elle est nulle,*

I_n *: Valeur efficace de l'harmonique de rang n,*

$i_{c1,h}$ $i_{c2,h}$ $i_{c3,h}$ *: Les courants harmoniques de la charge en triphasée*

$i_{c\alpha,h}$ $i_{c\beta,h}$ *: Les courants harmoniques de la charge en biphasée(repère de concordai)*

(I_{eff}) : La valeur efficace du courant

IGBT Insolated gate bipolar transistor

(L.B.C) Lampe basse consommation

Lf *: L'inductance du filtre*

(MLI) : Modulation de largeur d'impulsion

n : rang de l'harmonique,
P : la puissance active
$\bar{P}$ *: la composante continue de la puissance active*

$\bar{q}$: *la composante continue de la puissance réactive*

$\tilde{P}$: *la composante alternative de la puissance active*

$\tilde{q}$: *la composante alternative de la puissance réactive*

$P - Q$ *La théorie de la puissance instantanée*

Q : la puissance réactive

Rf : La résistance du filtre

S : la puissance instantanée

(SRF) : Algorithme du Repère de Référence Synchronisé

(SDA) : Algorithme de la détection synchronisée

(SGF) : La méthode sinusoïdale Généralisée de Fryze

T : *La période d'un signal .*

TDH : Le taux de distorsion harmonique

TDH_I *: Le taux de distorsion harmonique en courant*

TDH_V : *Le taux de distorsion harmonique en tension*

Ue *: la tension d'entrée*

$Umax$ *: la valeur maximale de la tension*

VDc : la tension aux bornes de la capacité du filtre .

Veff : valeur efficace de la tension

$V_{s3}V_{s2}V_{s1}$ *:Les trois tensions triphasées de la source.*

$V_{s\beta}V_{s\alpha}$ *: les tensions de source dans le repère de concordai.*

(Zs) : L'impédance de source.

γ *: le déphasage entre la puissance apparente et la puissance fondamentale apparente*
φ_n *: Phase de l'harmonique de rang n.*
ω *: Pulsation de la fréquence fondamentale,*

introduction générale :

L'utilisation croissante dans l'industrie de systèmes commandés à base d'électronique de puissance entraîne de plus en plus de problèmes de perturbation au niveau des réseaux électriques.
Ainsi, on assiste à une augmentation régulière, de la part des utilisateurs, des taux d'harmonique et de déséquilibre des courants, ainsi qu'à une importante consommation de la puissance réactive.
La circulation de ces mêmes courants perturbés va également provoquer des harmoniques et des déséquilibres de tension, lesquels vont se superposer à la tension nominale du réseau électrique.
Donc, la qualité de l'onde dans les installations électriques se dégrade incontestablement.

En effet, les charges non linéaires perturbent le réseau qui les alimente en y injectant des courants harmoniques.
De plus ces harmoniques détériorent la qualité des formes d'ondes de la tension, et peuvent endommager les équipements par échauffements excessifs, causer un disfonctionnement des cartes de contrôle des convertisseurs, et aussi des interférences avec d'autres utilisateurs.
De plus, des incidents du type coups de foudre_ ou un brusque démarrage d'une machine tournante à forte puissance peuvent causer une chute soudaine et importante de tension.
On nommera ce type d'incident : creux de tension.
Ces perturbations ont bien entendu des conséquences néfastes sur les équipements électriques, lesquelles peuvent aller d'un fort échauffement ou d'un arrêt soudain des machines tournantes jusqu'à la destruction totale de ces équipements.

Cependant, grâce aux récents progrès en matière de technologie des semi-conducteurs, l'électronique de puissance permet de compenser et de corriger tous ces indésirables qui affectent la qualité de l'onde.

Ce projet propose une approche pour contourner l'effet néfaste des harmoniques via l'utilisation du filtre actif de puissance. L'approche propose une réduction de la distorsion harmonique du courant de source.
L'algorithme proposé utilise une commande pour générer les courants de références du filtre actif Un régulateur de type proportionnelle intégral est utilisé pour forcer le courant du filtre à suivre le courant de référence généré par ces commandes. Les résultats de simulation présentés démontrent bien les performances statiques et dynamiques du système des commandes étudiées. [1],[2].

Ce rapport de mémoire est composé de 4 chapitres distincts.

Dans le premier chapitre, on présente les généralités sur la théorie, les effets des harmoniques et leurs conséquences sur le réseau

Dans le deuxième chapitre, on a fait une simulation des charges non linéaires (redresseur monophasé, lampe basse consommation) est faire en évidence les harmoniques et leur effets.

Dans le troisième chapitre, on a fait l'étude des filtres passifs et la simulation d'un filtre résonant en monophasé et en triphasé.

Dans le quatrième chapitre, on expose la solution de réduction des harmoniques basés sur le filtrage actif triphasé.
Des résultats de simulations seront présentés aussi dans ce chapitre.

Enfin, nous terminons notre projet par une conclusion générale relative aux résultats de simulation et d'expérimentation.

I.1 Introduction :

L'utilisation de plus en plus fréquente des charges polluantes produit des effets négatifs considérables sur le réseau. Ces charges polluantes absorbent des courants non sinusoïdaux tout en étant alimentés par des sources sinusoïdales, elles se comportent par conséquent comme des générateurs d'harmoniques et échangent en plus de l'énergie réactive. Ceci a pour effet, la déformation de la tension réseau et une réduction de la puissance active disponible par les générateurs, les transformateurs ou les lignes de distribution d'électricité. Cette préoccupation, qui s'accompagne d'une législation de plus en plus sévère en matière de pollution harmonique, justifie le développement de nouvelles solutions à base de composants actifs afin réduire toutes pollutions du réseau électrique.[2]

I.2 Qualité de l'énergie :

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,
- le déséquilibre.

La mesure de ces paramètres permet de juger la qualité de la tension.
Une détérioration de l'un d'entre eux ou de plusieurs à la fois laisse supposer la présence d'une anomalie dans le réseau électrique.

Afin de décrire certaines perturbations et de donner le niveau de conformité de l'énergie fournie, des normes que on va les établies dans la section I.8.

I .3 Perturbations des réseaux :

Un récepteur d'énergie est considéré par le distributeur de l'électricité comme une charge perturbatrice s'il absorbe des courants non sinusoïdaux ou déséquilibrés et/ou il échange de l'énergie réactive.

Les courants non sinusoïdaux ou déséquilibrés peuvent déformer ou déséquilibrer les tensions du réseau lorsque son impédance n'est plus négligeable. L'échange de l'énergie réactive réduit la puissance active que les générateurs, les transformateurs ou les lignes peuvent produire ou transmettre.

Les développements incessants dans le secteur industriel ont imposé une utilisation de plus en plus fréquente des convertisseurs qui sont devenus, par conséquent, la cause principale de la pollution des réseaux électriques.

Les convertisseurs CA/CC se classent parmi les premiers pollueurs en milieux industriels, suivis des gradateurs et puis les fours à arcs, les réactances à noyau de fer, le chauffage par induction, etc. [2].

I .3.1 Caractérisation des perturbations :

Plusieurs grandeurs peuvent caractériser la distorsion en régime déformé : le taux de distorsion harmonique (THD), le facteur de distorsion F_d et le facteur de crête Fc. Nous limiterons l'analyse dans le cas où la source de tension est sinusoïdale (valeur efficace Veff) et où le courant absorbé par la charge est pourvu de composantes harmoniques.
Le courant instantanés I(t) de la charge est périodique, donc il peut être décomposé sous la forme d'une série de Fourrier définie par :

$$I(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sqrt{2} \sin(n\omega t + \varphi_n) \qquad \text{(I.1)}$$

Avec I_0 : valeur de la composante continue, dans ce cas elle est nulle,
ω : Pulsation de la fréquence fondamentale,
n : rang de l'harmonique,
I_n : Valeur efficace de l'harmonique de rang n,
φ_n : Phase de l'harmonique de rang n.

La valeur efficace (I_{eff}) du courant I (t) s'écrit :

$$I_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} * \int_0^T i^2} \qquad \text{(I.2)}$$

on représente le signal décomposé (y) sous la forme d'un spectre figure (I.1) c'est à dire à l'aide d'un schéma ou l'on porte en abscisse le rang et en ordonnée le module (en valeur efficace ou en pour cent).

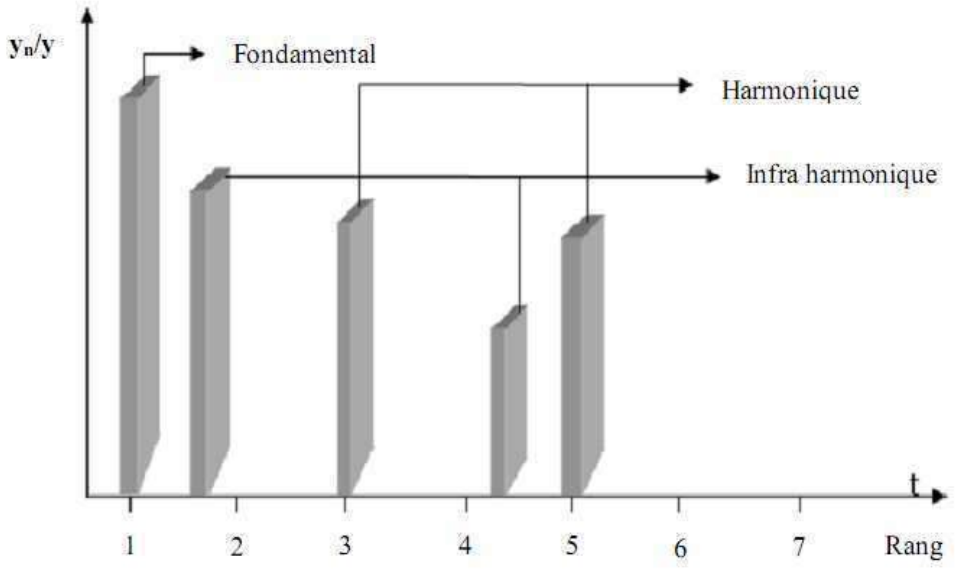


Figure I.1 Représentation spectrale d'un signal périodique.

I .3.1.1 Facteur de puissance :

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

les générateurs, les transformateurs, les ligne de transport et les appareils de contrôle et de mesure sont dimensionnés pour la tension et le courant nominaux. une faible valeur du facteur de puissance se traduit par une mauvaise utilisation de ces équipements. Dans le cas où il y a des harmoniques, une puissance supplémentaire appelée la puissance déformante (D), donnée par la relation (1.5), apparaît comme le montre le diagramme de Fresnel de la figure (I.2).

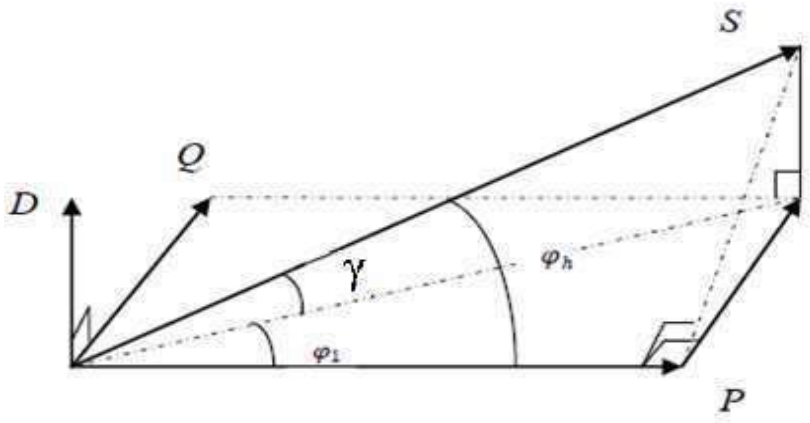


Figure I.2 Diagramme de Fresnel des puissances

Avec : tel que :

P : la puissance active $P = I_1 * V_1 * \cos\varphi_1$ (1.3)

Q : la puissance réactive $Q = I_1 * V_1 * \sin\varphi_1$ (1.4)

D : la puissance déformante $D = V * \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n{}^2}$ (1.5)

S : la puissance instantanée $S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}$ (1.6)

$$F_p = \frac{P}{\sqrt{P^2+Q^2+D^2}} = \cos\varphi_1 * \cos\gamma \quad (1.7)$$

$$\cos\varphi_1 = \frac{P}{\sqrt{P^2+Q^2}} \quad (1.8)$$

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

I .3.1.2 Taux de distorsion harmonique :

Pour quantifier le niveau des perturbations harmoniques du courant et de tension, on utilise respectivement les notions de taux de distorsion harmonique du courant (TDH_I) et le taux de distorsion harmonique de la tension (TDH_V).

Le premier s'exprime sous la forme :

$$TDH_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n{}^2}}{I_1} \quad (1.10)$$

I_n : valeur efficace du courant harmonique

I_1 : valeur efficace du courant fondamental

n : le rang de l'harmonique

de même pour le (TDH_V) :

$$TDH_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n{}^2}}{V_1} \quad (1.11)$$

I .3.1.3 Facteur de distorsion :

Le facteur de distorsion F_d est définit par :

$$F_d = \frac{I_1}{I_{eff}} \qquad (1.12)$$

Il vaut 1 lorsque le courant est parfaitement sinusoïdal et il décroit lorsque la
déformation de l'onde s'accentue.

I .3.1.4 Facteur de crête :

Le facteur de crête F_c est donné par l'équation (1.13) :

$$F_c = \frac{valeur\ de\ crête}{valeur\ efficace} \qquad (1.13)$$

Pour une onde sinusoïdale Fc est égal à $\sqrt{2}$.=1.414 .
Le facteur de crête peut atteindre des valeurs supérieures à 5 pour des ondes très déformées.[2]

I .4 Origine des harmoniques :

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

Les différents secteurs industriels concernés sont aussi bien du type secondaire (utilisation des gradateurs, des redresseurs, des variateurs de vitesse….), que du type tertiaire (informatique ou éclairage dans les bureaux, commerces,…) ou domestique (téléviseurs, appareils électroménagers en grand nombre).

I.5 Notion de la charge non_linéaire :

Une charge est dite "non linéaire" si le courant absorbé n'est pas sinusoïdal lorsqu'elle est alimentée par une tension sinusoïdale.

Ce type de récepteur est un générateur des courants harmoniques.

Les charges non linéaires déforment les signaux électriques du courant et de la tension.

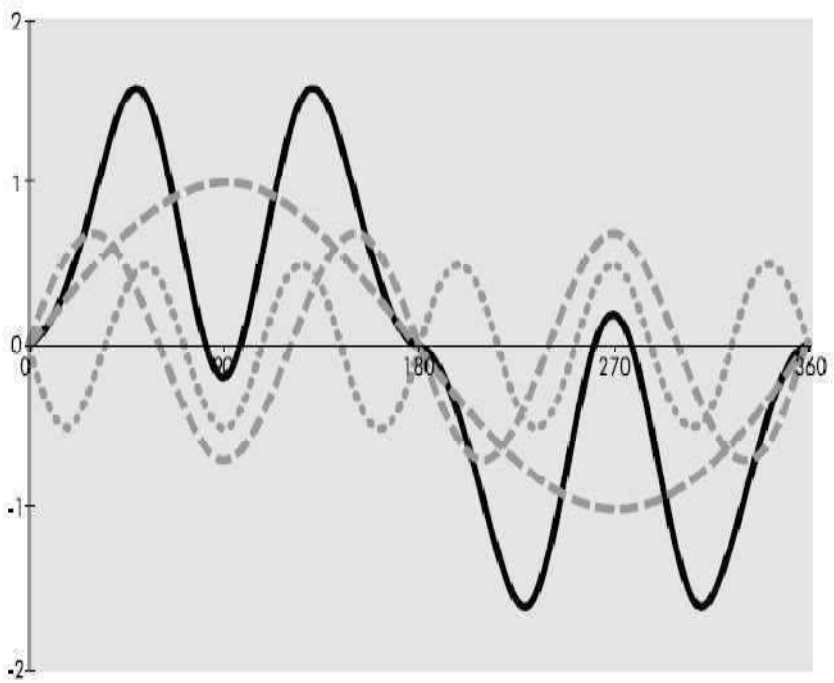


Figure I.3 Courant absorbé par une charge non linéaire

Pratiquement, tous les équipements électriques et électroniques modernes possèdent des SMPS ou un système de contrôle de puissance.

Il en résulte une charge non linéaire. Les charges linéaires sont relativement rares.

I.6 types des charges non linéaires

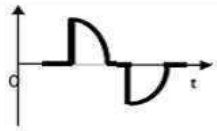
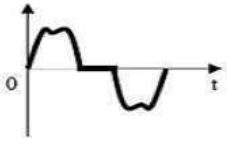
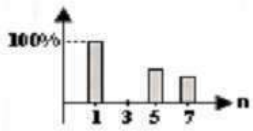
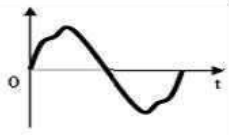
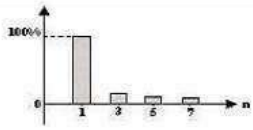
a) Le premier groupe (Charges monophasées) comprend :

- Lampe basse consommation dite à économie d'énergie.
- Tubes fluorescent
- Lampes à décharge gazeuse à basse et haute pression.
- Ballasts électroniques pour éclairage.
- Equipements médicaux
- Téléviseurs
- Ordinateurs
- Imprimantes et photocopieurs
- Onduleurs

b) Le deuxième groupe (Charges triphasées) comprend :

- Variateurs de vitesse pour moteurs
- Redresseur (convertisseur alternatif – continu)
- Hacheur (Convertisseur continu - continu est un dispositif de l'électronique de puissance)
- Soudeuses
- Four à arc utilisé dans la métallurgie
- Chargeurs de batteries

Tableau I.1
Quelques sources des perturbations harmoniques.

Type de charge	Appareils concernés	Courant absorbé	Spectre harmonique correspondant
Gradateur Monophasé (commande par angle de phase)	Régulation de puissance de four à résistance Modulation de puissance des lampes halogènes		
Redresseur triphasé à thyristor	Variateur de vitesse des moteurs à courant continu et des moteurs synchrones		
Moteur asynchrone	Machines-outils Appareils électroménagers Ascenseurs.		

I .7 les effets néfastes des harmoniques :

De nombreux effets des harmoniques sur les installations et les équipements électriques peuvent être cités. Les effets les plus importants sont l'échauffement, l'interférence avec les réseaux de télécommunication, les défauts de fonctionnement de certains équipements électriques et le risque d'excitation de résonance :

L'échauffement des conducteurs, des câbles, des condensateurs et des machines dû aux pertes cuivre et fer supplémentaires.

Le vieillissement des isolants est souvent dû à une contrainte en tension consécutive à la présence de la tension harmonique, et donc à une augmentation locale du courant de fuite, ou encore à l'échauffement exagéré dans les conducteurs.

Effets instantanés

- Dégradation du facteur de puissance
- Réduction de la puissance des moteurs (couple négatif)
- Surcharge des câbles, transformateurs et moteurs
- Augmentation du bruit dans les moteurs
- Erreur d'enregistrement dans les compteurs
- Surdimensionnement des câbles
- Réduction de la capacité du réseau
- Mauvais fonctionnement des contacteurs
- Perturbation des systèmes électroniques

Effets à moyen et long terme

- Réduction de la durée de vie des moteurs
- Détérioration des batteries de condensateurs
- Réduction de la durée de vie des transformateurs
- Vieillissement accéléré des isolants et des diélectriques
- Pertes Fer (iron losses), pertes crées par le champ magnétique+pertes dues aux courants de Foucault, entrainant un déclassement des transformateurs et des moteurs

- Surchauffe du neutre :

Dans le cas ou il y a les harmoniques le courant résultant dans le neutre n'est pas nul malgré la tension du system triphasé est déphasé de $2\pi/3$ et les charges sont identiques.

La troisième harmonique de chacune des phases est identique avec une fréquence triple et donc un cycle trois fois plus court.

Cet effet est illustré à la figure (I.4)

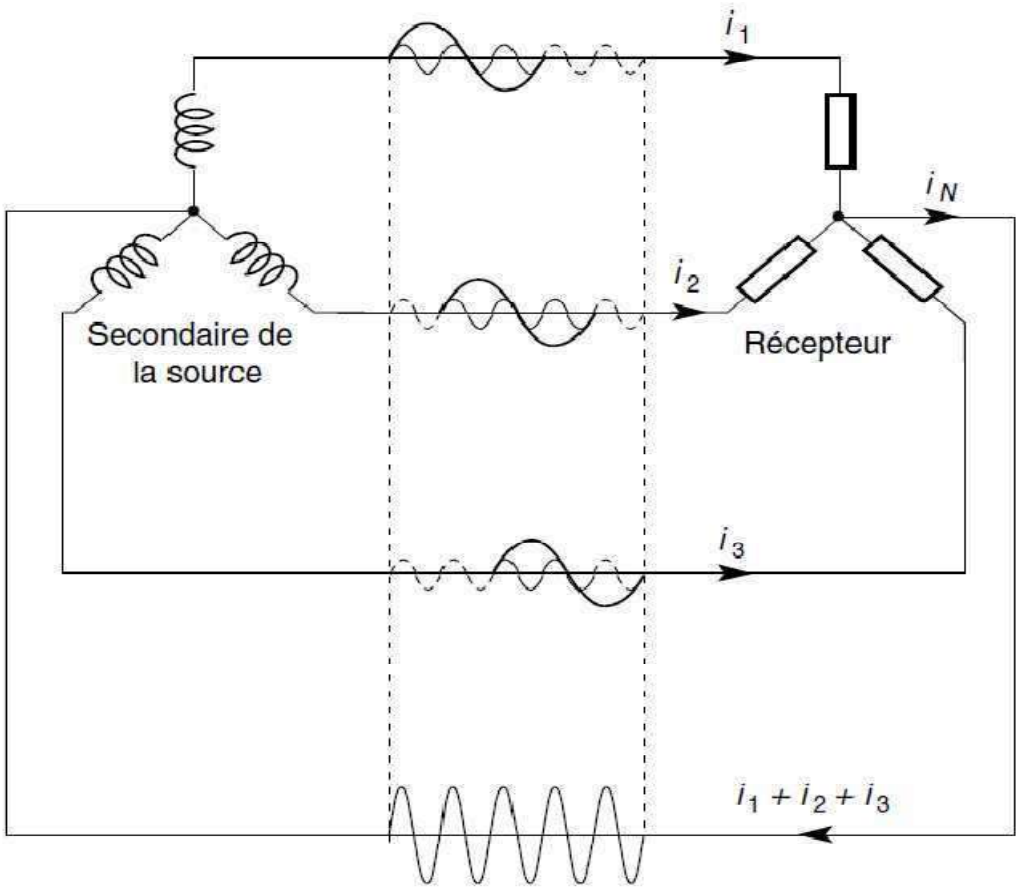


Figure I.4 Addition des courants harmoniques de rang trois dans le neutre

La solution simple consiste à doubler la section du neutre soit avec un conducteur soit avec deux conducteurs neutres de section égale à 50 % de celle des conducteurs de phase.

- *L'interférence avec les réseaux de télécommunication :*

Le couplage électromagnétique entre les réseaux électriques et de télécommunication peut induire dans ces derniers des bruits importants.
Dans le cas de résonances, une partie des réseaux de télécommunication peut être rendue inutilisable [3].

- *Les défauts de fonctionnements de certains équipements électriques :*

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

- *Le risque d'excitation de résonance :*

Les fréquences de résonance des circuits formés par des inductances du transformateur et des câbles sont normalement élevées. Ce n'est pas le cas lorsque des batteries de capacité sont raccordées au réseau pour relever le facteur de puissance les fréquences de résonance peuvent devenir assez faibles, et coïncider ainsi avec celles des harmoniques engendrés par les convertisseurs statiques. Dans ce cas, il y aura des phénomènes d'amplification d'harmoniques.
Différentes grandeurs sont définies pour chiffrer ces perturbations. Parmi celles-ci les plus utilisées sont :

I .8 Normes et réglementations :

Afin de limiter les perturbations et les disfonctionnements causés par la présence des harmoniques dans le réseau électrique, et de définir le produit que le client fabrique et aussi pour réaliser les tests des produits élaborés. la Commission Electrotechnique Internationale (CEI), a défini les niveaux des tensions et des courants harmoniques a ne pas dépasser par une série de norme de compatibilité électromagnétique (CEI 61000).

On peut réaliser un classement selon trois types de normes concernant la Compatibilité électromagnétique (CEM) :

- **Les publications ou normes fondamentales**
  Il s'agit de définir, d'une façon générale, les prescriptions relatives à la CEM (phénomènes, essais…). Celles-ci sont applicables à tous les produits et servent de boîte à outils aux comités d'élaboration des normes spécifiques. Les normes fondamentales ne sont pas harmonisées au niveau européen.
- **Les normes génériques ou européennes**
  Elles définissent les exigences essentielles en termes de niveau d'émission, niveau à tenir par type d'essai. Elles utilisent les normes fondamentales ainsi que les limites définies par les normes d'émission et/ou d'immunité.
- **Les normes de produits ou de familles de produits**
  Pour les produits ou les familles de produits concernés, les normes précisent les dispositions constructives, les caractéristiques à présenter, les méthodes d'élaboration de test, les critères de performance. [3]

Nous pouvons citer à titre d'exemple :

La norme CEI 61000-2-2 :

Elle définit les niveaux de compatibilité de tensions harmoniques sur les Réseaux publics basse tension. Elle est représentée sur le tableau I.4.

Cette norme vise a protéger les équipements raccordés sur un réseau basse tension déformé.

La norme CEI 61000-3-2 :

cette norme représentée sur le tableau I.3 fixe la limitation des courants injectés dans le réseau public pour des équipements dont le courant par phase est inférieur à 16 A. Il s'agit là des appareils du domaine domestique.

Les normes précitées sont obligatoires mais reste incomplètes et ne permettent pas de garantir totalement la compatibilité électromagnétique sur les réseaux publics.

C'est la raison pour laquelle EDF par exemple émet quelques recommandations concernant le raccordement des utilisateurs sur le réseau. Les limitations en tension harmonique que doivent respecter les clients d'EDF sont :

- pour chaque rang pair, la tension harmonique est limitée à 0 6%,
- pour chaque rang impair, la tension harmonique est limitée à 1%,
- limitation du THD à 1,6%.

EDF propose le contrat EMERAUDE à ces clients. Ce contrat stipule que les deux parties (fournisseur et récepteur) s'engagent à respecter les normes limitant les perturbations harmoniques. EDF s'engage aussi à atteindre des résultats négociés au préalable.

Pour ce qui est de la puissance réactive, EDF autorise ses clients à consommer, sans être facturé, jusqu'à 40% de la puissance active absorbée.
Ce contrat à pour vocation, non pas de pénaliser les clients, mais de les inciter à faire des progrès.

Pour éviter tous les désagréments générés par la présence de courants et de tensions harmoniques sur le réseau et pour préserver la pollution du réseau,
les utilisateurs sont de plus en plus tenus de respecter un certain nombre de nomes qui sont résumées dans les tableaux I.2 et I.3.

Tableau I.2

Valeurs des niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques Dans les réseaux base tension CEI-1000-2-4

Valeurs des niveaux de compatibilité (1) pour les tensions harmoniques dans les réseaux d'énergie à base tension					
Harmoniques impairs non multiples de 3		**Harmoniques impairs multiples de 3**		**Harmoniques pairs**	
Rang harmonique n	**Tension (2) harmonique %**	**Rang harmonique n**	**Tension harmonique %**	**Rang harmonique n**	**Tension harmonique %**
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	>21	0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			>12	0.2
25	1.5				
>25	0.2+12.5/n				
(1) Ces taux de compatibilité correspondent à une probabilité de non-dépassement de 95%.					
(2) Ces valeurs sont exprimées en pour-cent de la tension nominale à la fréquence fondamentale.					
- Norme CEI 10002-4 : 1994					

Tableau I.3

Limites pour les émissions de courant harmonique CEI-1000-3-2

Limites pour les émissions de courant harmonique (courant appelé par les appareils ≤ 16A par phase de classe A)			
Harmoniques impairs		**Harmoniques pairs**	
Rang harmonique n	**Courant harmonique maximal autorisé (A)**	**Rang harmonique n**	**Courant harmonique maximal autorisé (A)**
3	2.30	2	1.08
5	1.14	4	0.43
7	0.77	6	0.30
9	0.40	8≤ n ≤40	
11	0.33		
13	0.21		
15≤ n ≤39	0.15.(15/n)		
Norme CEI 1000-3-2 : 1995			

Tableau I.4

Niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux publics basse tension (norme CEI 61000-2-2).

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

Les organismes normalisateurs

On distingue les différents organismes qui élaborent les normes applicables par les installateurs et les fabricants de matériels électriques :

– **La CEI** (Commission électrotechnique internationale, siège à Genève) – Les normes s'y rattachant sont repérables par la désignation CEI.
– **Le CISPR** (Comité international spécial des perturbations radioélectriques).
– **Le Cenelec** (Comité européen de normalisation électrotechnique, siège à Bruxelles) – Ces normes sont repérables par la désignation EN.
– **La NFC** (Norme française du domaine électricité, siège à Paris) – Ces normes sont repérables par la désignation NFC.
– **L'UTE** (Union technique de l'électricité en France).
La liste non exhaustive des thèmes abordés par les normes relatives aux perturbations harmoniques est conséquente. De ce fait, nous citons seulement les principales normes dans le tableau (I.5). [3]

Il ya d'autre normes CEI sont présenté dans le tableau suivant :

Tableau I.5

Principales normes relatives aux harmoniques.

partie	Référances et thèmes abordés
Généralités	**CEI 61000-1-1** : définitions des termes fondamentaux
Environnement : traite de la compatibilité et de la définition du produit électricité. Nous ne donnerons ici seulement les thèmes relatifs aux harmoniques, objet de notre ouvrage.	**CEI 61000-2-1** : environnement électromagnétique concernant les perturbations conduites basse fréquence et la transmission de signaux sur les réseaux publics d'alimentation. **CEI 61000-2-2** : niveaux de compatibilité concernant les perturbations conduites basse fréquence et la transmission de signaux sur les réseaux publics d'alimentation. **CEI 61000-2-4** : niveaux de compatibilité sur les réseaux industriels pour les perturbations conduites à basse fréquence. **CEI 61000-2-5** : classification des environnements électromagnétiques. **EN 50160** : caractéristiques de la tension fournie par les réseaux publics de distribution.
Limites pour les émissions	**CEI 61000-3-2** : limites pour les émissions de courants harmoniques dans les réseaux publics à basse tension pour les appareils de moins e 16 A par phase. **CEI 61000-3-4 :** limites pour les émissions de courants harmoniques dans les réseaux publics à basse tension pour les appareils de plus de 16 A par phase. **CEI 61000-3-6 :** évaluation des limites d'émission pour les charges déformantes raccordées aux réseaux moyenne tension et haute tension.

La suite de Tableau I.5

partie	Référances et thèmes abordés
Immunité et technique d'éssai.	**CEI 61000-4-1 :** vue d'ensemble sur les éssais d'émmunité. Publication fondamentale en CEM. **CEI 61000-4-7 :** guide général pour la mesure des harmoniques ainsi qu'à l'apareillage de mesure,applicable aux réseaux s d'alimentation et aux appareils qu'y sont raccordés.guide de mesure associé à l'EN 50160. **CEI 61000-4-13** : essais d'immunité aux harmoniques. **CEI 61000-4-15** : phénomènes de Flicker. **EN 50082-1** : norme générique immunité-résidentiel, commercial, industrie légère.
Normes génériques*.	**CEI 61000-6-1** : normes génériques sur l'immunité pour les environnements résidentiels, commerciaux et de l'industrie légère. **CEI 61000-6-2** : normes génériques, immunité pour les environnements industriels. **CEI 61000-6-3** : normes génériques sur l'émission. Partie 1 :Résidentiel commercial et industrie légère. **CEI 61000-6-4** : normes génériques sur l'émission. Partie 2 : Environnement industriel. **EN 50081-1** : norme générique émission-résidentiel, commercial, industrie légère. **EN 50081-2** : norme générique émission-environnement industriel. **EN 50082-2** : immunité, environnement industriel.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons tout d'abord déterminé, les harmoniques, l'origine,et les effets néfastes sur les équipements électriques. Ces effets peuvent provoques des échauffements et de la dégradation du fonctionnement jusqu'à la destruction totale de ces équipements, et pour prouver ça, on va présenter une simulation des charges non linéaires pour que les effets des harmoniques soit évidents.

Dans le chapitre suivant , nous passons à l'étude d'une charge non linéaire qui consiste d'un pont redresseur monophasé à diodes et d'une lampe basse consommation (L.B.C).

Chapitre II :étude et simulation des charges non linéaires

II.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous passons à l'étude d'une charge non linéaire, composée d'un redresseur à diodes. Les redresseurs sont des convertisseurs de l'électronique de puissance, destiné à produire des tensions ou des courants continus (unidirectionnels), à partir d'une source alternative de tension ou de courant, ils permettent d'alimenter en courant continu le récepteur branché à leur sortie.

Les redresseurs ont un très vaste domaine d'application, mais malheureusement leur inconvénient majeur qu'ils envoient des courants non sinusoïdaux riches en harmoniques dans le réseau électrique. [6]

Nous étudierons un rappel sur les redresseurs monophasés (simples alternances, doubles alternances), ainsi que les redresseurs triphasés en pont non commandé (simples alternances, doubles alternances) comme une charge polluante qui perturbe le réseau électrique.

II.2 Redressement non commandé (à diode) :

La diode est une composante électronique qui modélisée par un interrupteur qui est fermé quand le potentiel de l'anode (zone P) est supérieur au potentiel de la cathode (zone N) et qui est ouvert dans le cas contraire, donc la diode ne laisse passer le courant que dans un seul sens. Cette caractéristique est largement exploitée dans les circuits de redressement, pour but d'obtenir un courant continu à partir d'une tension alternative, et ainsi ces dispositifs ne permettent pas de régler la valeur de la tension de sortie (redresseur non commandé)

Les circuits de redressement (monophasé ou triphasé) qu'on peut classer en deux grandes catégories:

- **Les redresseurs simples alternances :**

Dans le sens direct, ils admettent les tensions positives, et annulent les tensions négatives.

- **Les redresseurs doubles alternances :**

Dans le sens direct, ils admettent les tensions positives, et transformer les tensions négatives en tensions positives.

II.2.1 Redresseurs monophasés :

II.2.1.a. Redresseurs monophasés simples alternances :

Si une diode est placée en série dans un circuit soumis à une tension alternative, figure (II.1), le courant ne passera que pendant l'une des deux alternances donc il sera redressé.

Soit :

$$Ue = Umax \sin(\omega t) \qquad \text{(II.1)}$$

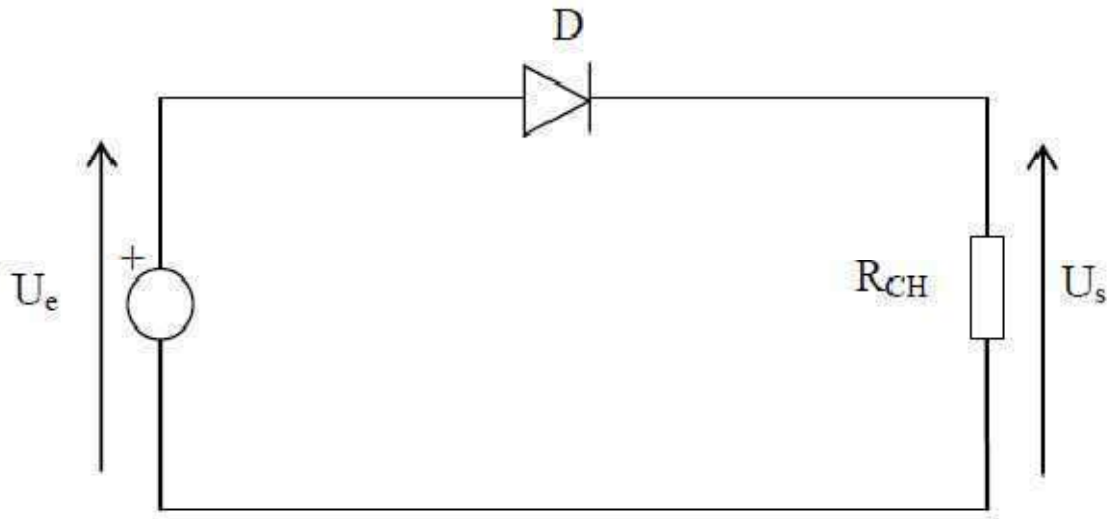


Figure II.1 redresseur monophasé simple alternance.

Courbes obtenues :

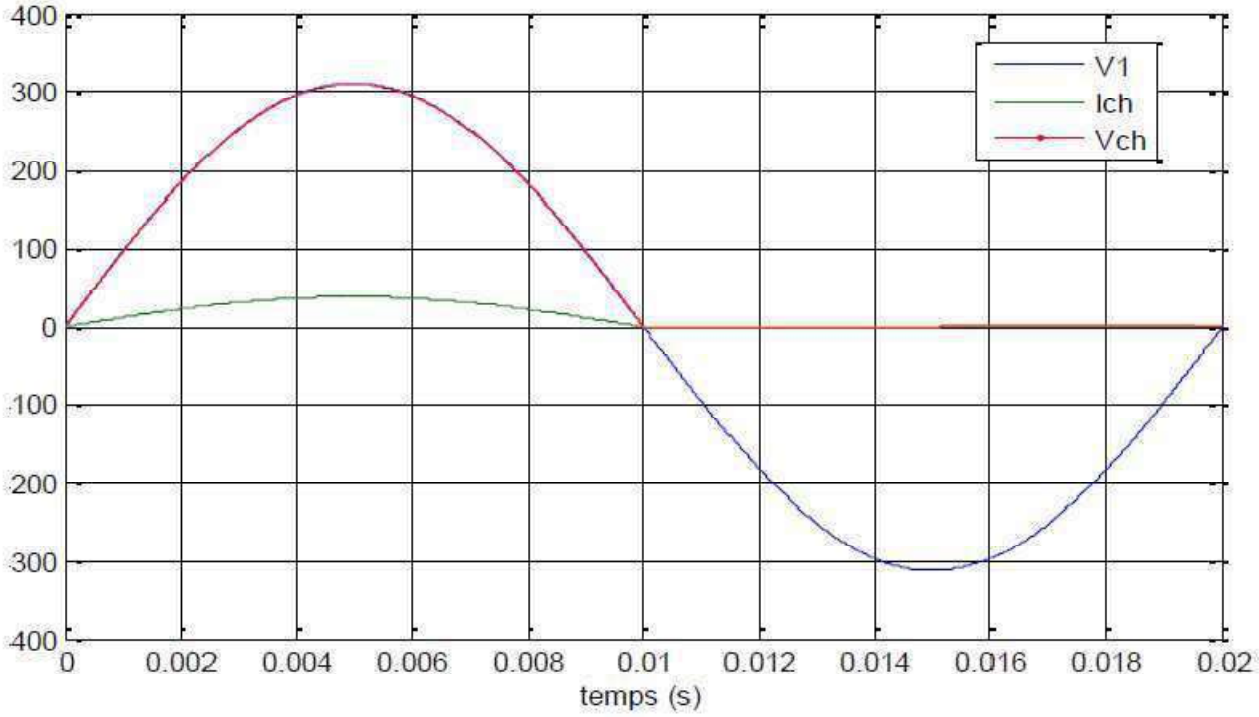


Figure II.2 signal d'un redresseur simple alternance.

Grandeurs caractéristiques :

$$U_s max = U_e max \qquad \text{(II.2)}$$

$$U_s moy = \frac{1}{2\pi}\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} U_s max \cos\theta \, d\theta = \frac{U_s max}{2\pi}[\sin\theta]_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \qquad \text{(II.3)}$$

D'où : $$U_s moy = \frac{U_s max}{\pi} \qquad \text{(II.4)}$$

$$U_{s\,eff}{}^2 = \frac{1}{2\pi}\int_0^{\frac{\pi}{2}} U_s max^2 \cos^2\theta \, d\theta = \frac{U_s max^2}{4\pi}\int_0^{\frac{\pi}{2}}(1+\cos 2\theta)\, d\theta \qquad \text{(II.5)}$$

$$\Longrightarrow : U_{s\,eff}{}^2 = \frac{U_s max^2}{4\pi}\left[\theta + \frac{1}{2}\sin 2\,\theta\right]_0^{\frac{\pi}{2}} \qquad \text{(II.6)}$$

D'où : $$U_{s\,eff} = \frac{U_s max}{2\sqrt{2}} \qquad \text{(II.7)}$$

II.2.1.b Redresseurs monophasés bi alternance :

Il existe deux montages de bases :
La structure à pont de Graetz et la structure à point milieu, dont les courbes caractéristiques apparaissent ci-dessous.

- **Redresseur à pont de Graetz :**

La tension redressée mono-alternance est moins efficace que la tension alternative, puisque le courant ne circule que la moitié du temps, et pour cela en utilisant Le montage le moins coûteux et le plus efficace est le pont de Graetz.
En utilisant quatre diodes habilement connectées, on peut redresser les deux alternances et augmenter ainsi l'efficacité

Soit :

$$Ue = Umax\ sin(\omega t) \qquad \text{(II.1)}$$

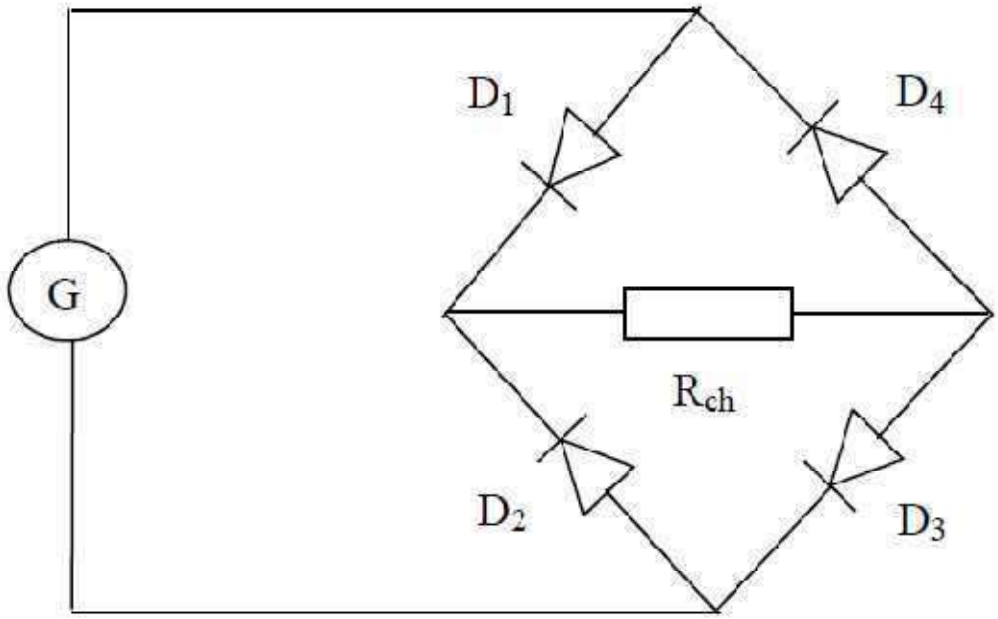


Figure II.3 Redresseur à pont de Graetz.

Courbes obtenues :

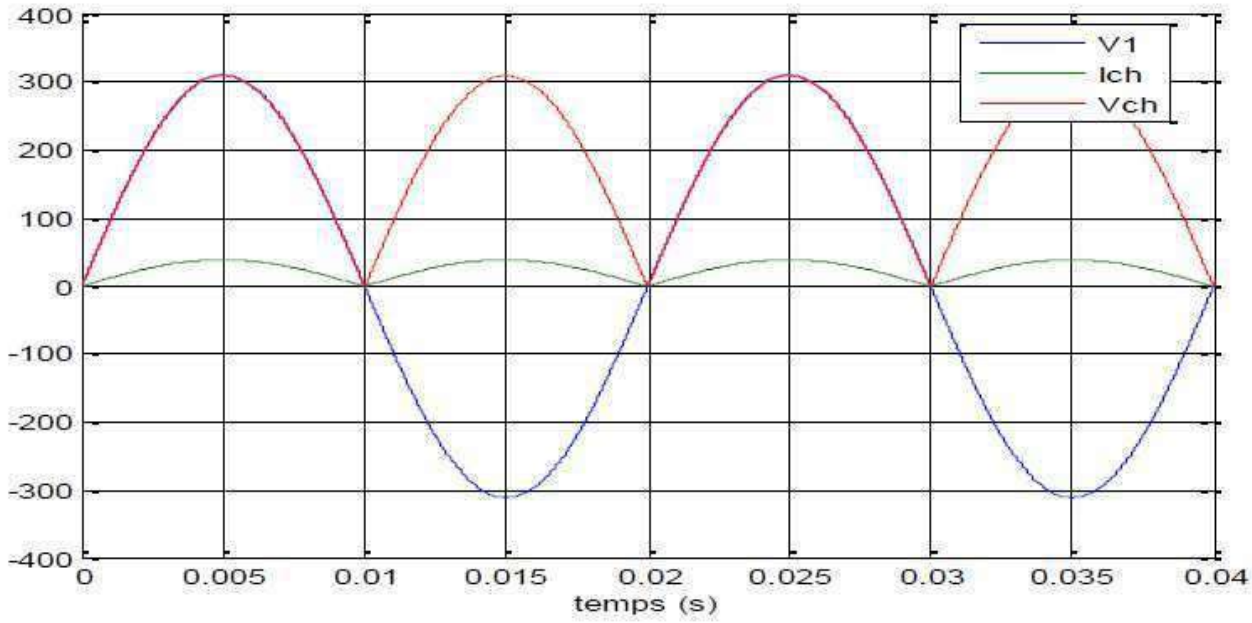


Figure II.4 signal d'un redresseur à pont de Graetz.

Grandeurs caractéristiques :

Similairement à réponse du redresseur monophasé simple alternance :

$$Us_{max} = Ue\ max \quad \text{(II.8)}$$

$$Us_{min} = 0 \quad \text{(II.9)}$$

$$US_{moy} = 2\frac{US_{max}}{\pi} \quad \text{(II.10)}$$

$$US_{eff} = \frac{US_{max}}{2} \quad \text{(II.11)}$$

- **Redresseur à point milieu**

A partir du réseau monophasé, grâce un transformateur à point milieu, on obtient deux tensions Ue et Ue' égales mais déphasé de π figure (II.5).
Les résultats et courbes obtenus sont strictement identiques au montage précédent.
Soit :

$$Ue = U_{max}\ sin\ \omega t \quad \text{(II.1)}$$

$$Ue' = -Ue \quad \text{(II.12)}$$

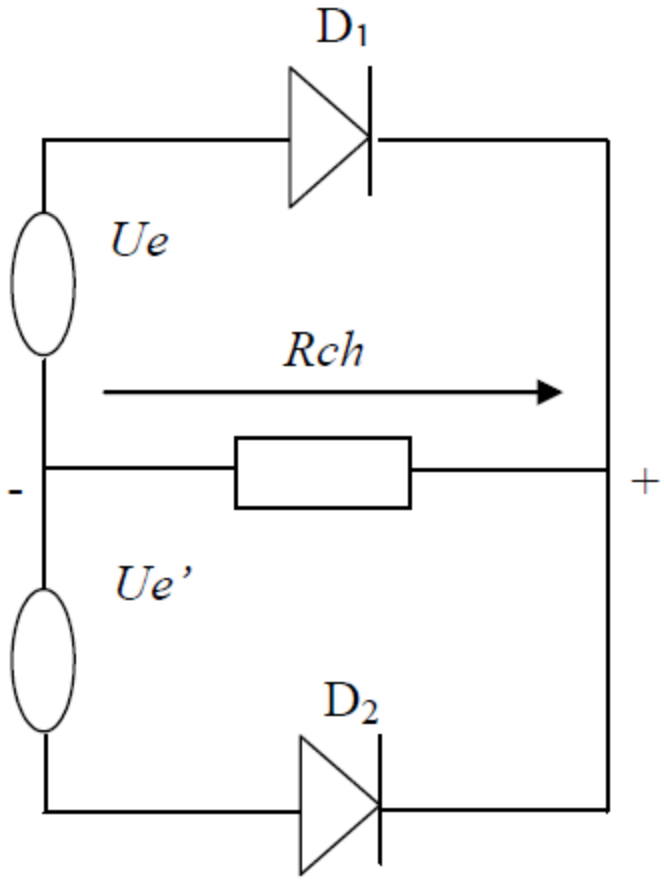


Figure II.5 Redresseur à point milieu.

II.2.2 Redresseurs triphasé :

II.2.2.a Redresseurs triphasé simples alternances :

Le montage redresse les courants entre les phases et le neutre, comme il est montré dans la figure (II.6)

Les tensions simples des réseaux triphasés équilibrés directs sont :

$$V_{1N} = Vm\, sin(\omega t - \varphi) \qquad \text{(II.13)}$$

$$V_{2N} = Vm\, sin(\omega\, t - \varphi - 2\pi\, 3\,) \qquad \text{(II.14)}$$

$$V_{3N} = Vm\, s\,(\omega\, t - \varphi - 4\pi\, 3\,) \qquad \text{(II.15)}$$

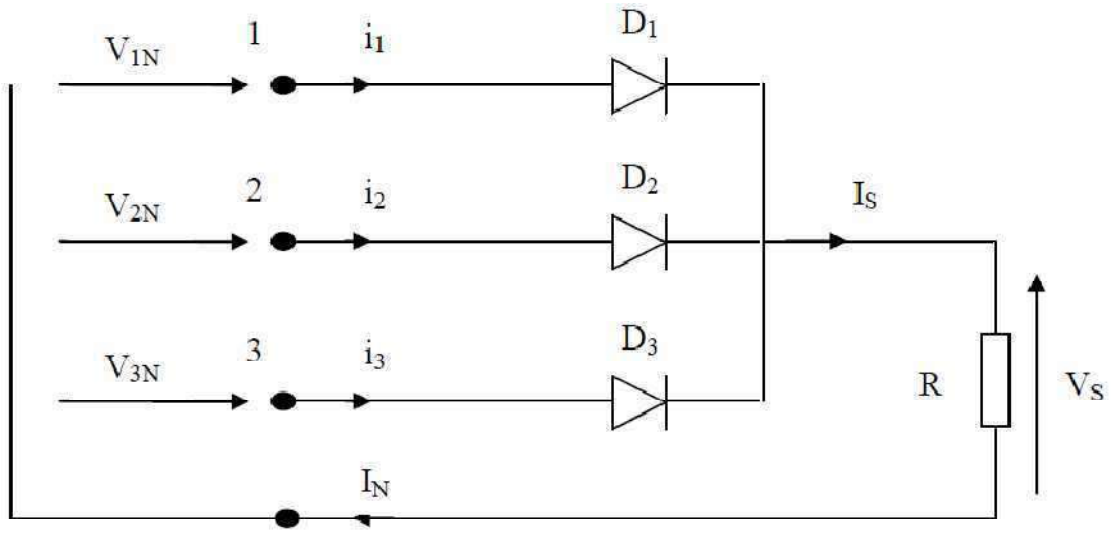


Figure II.6 redresseur triphasé simple alternance.

Courbes obtenues :

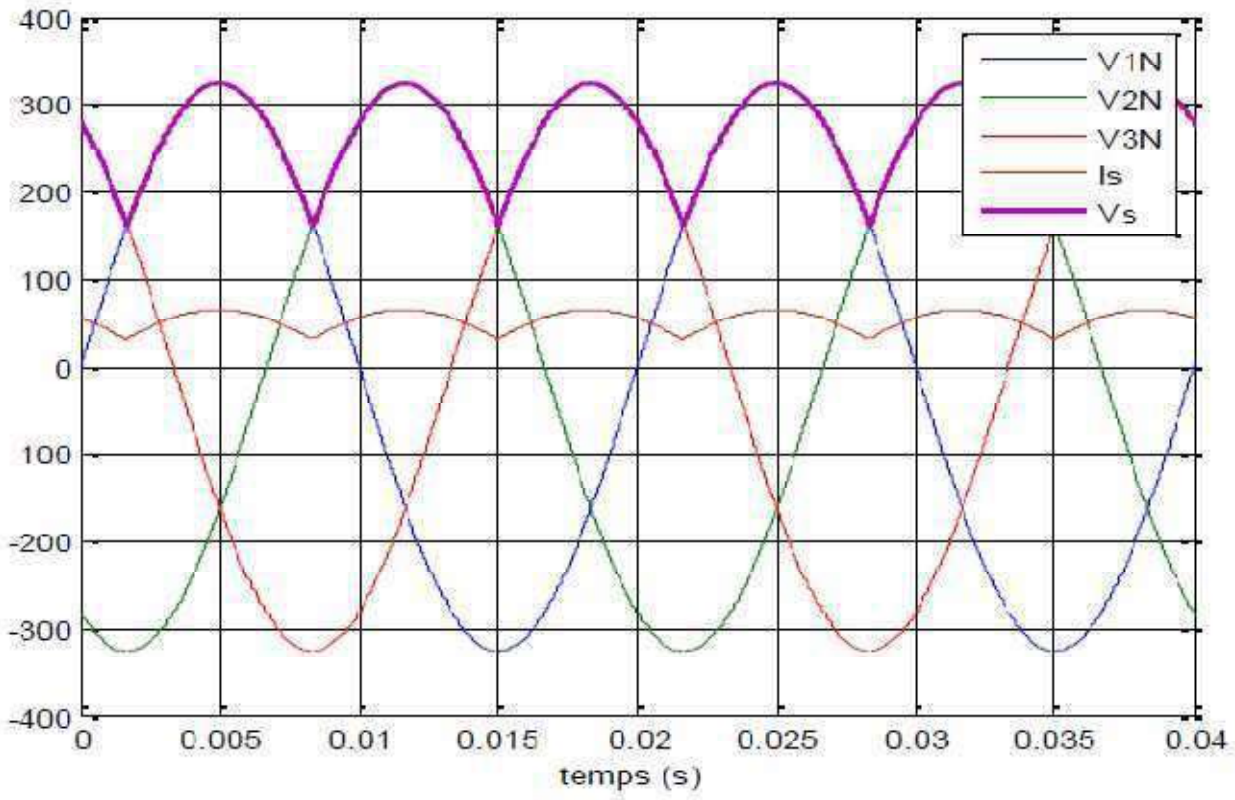


Figure II.7 signal d'un redresseur triphasé simple alternance.

Grandeurs caractéristiques :

$$V_s moy = \frac{2}{2\pi}\int_{-\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}} V_s max\ cos\theta\ d\theta \qquad \text{(II.16)}$$

D'où $$V_s moy = \frac{3\sqrt{3}V_s max}{2\pi} \qquad \text{(II.17)}$$

$$V_s{}^2{}_{eff} = \frac{3}{2\pi}\int_{-\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}} V_s{}^2 max\ cos^2\theta\ d\theta \qquad \text{(II.18)}$$

D'où $$V_{S\,eff} = V_s max\sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{8\pi}} \qquad \text{(II.19)}$$

II.2.2.b Redresseur triphasé double alternance :

Le pont triphasé à diodes alimenté par un système de tension sinusoïdales triphasées, est représenté par la figure suivante

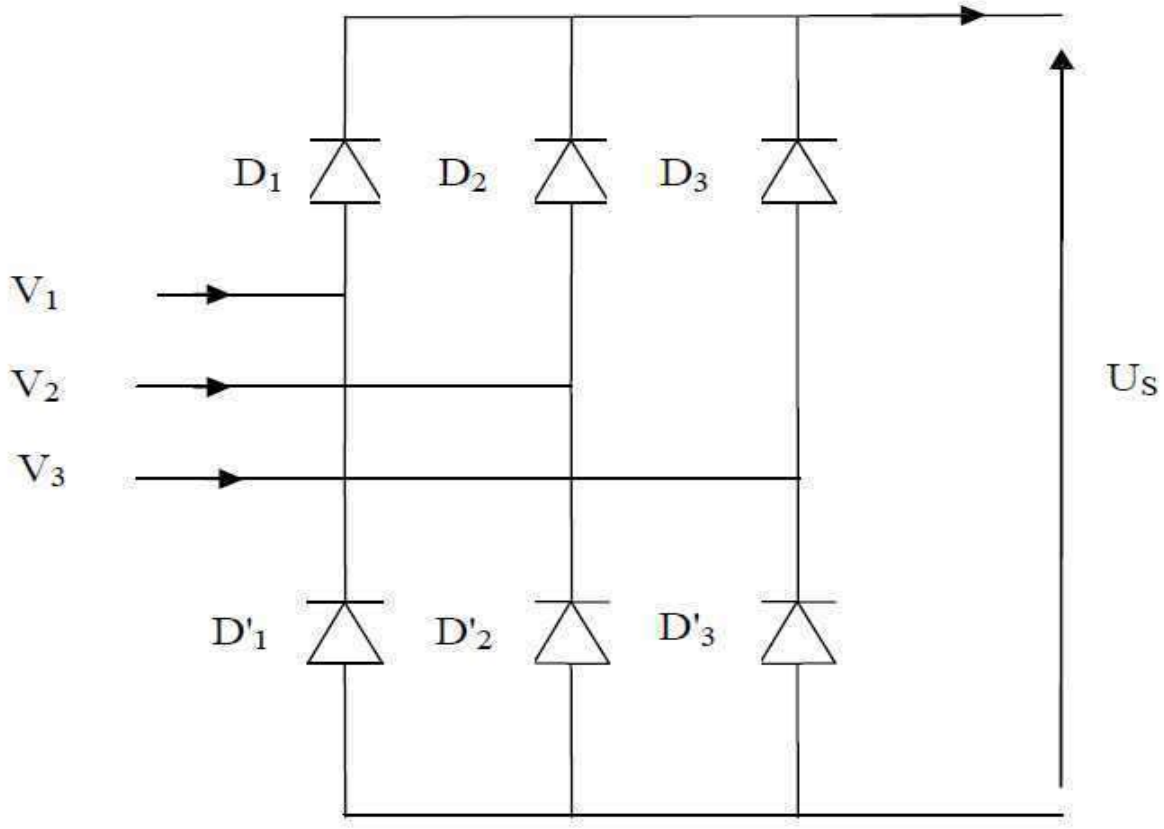


Figure II.8 Redresseur triphasé double alternance en pont.

Deux diodes d'un même bras ne peuvent conduire simultanément. Lorsque D1 conduit, l'une des deux diodes D'2 et D'3 conduit également. Il en vient que D1 conduit lorsque V1est supérieur à V2 et V3, ou encore :

$$V1 = MAX(V_j)\ ; \qquad j = 1,2,3$$

Le même raisonnement conduit aux conditions suivantes :

Di Conduit si . $V_i = MAX(V_j)$; $\quad i = 1,2,3$; $\quad j = 1,2,3$
D'i Conduit si . $V'_i = MIN(V_j)$; $\quad i = 1,2,3$; $\quad j = 1,2,3$
Pendant chaque séquence de conduction, la tension Ud à la sortie du redresseur est :

$$U_d = V_i = MAX(V_j) - MIN(V_j); \quad j = 1,2,3$$

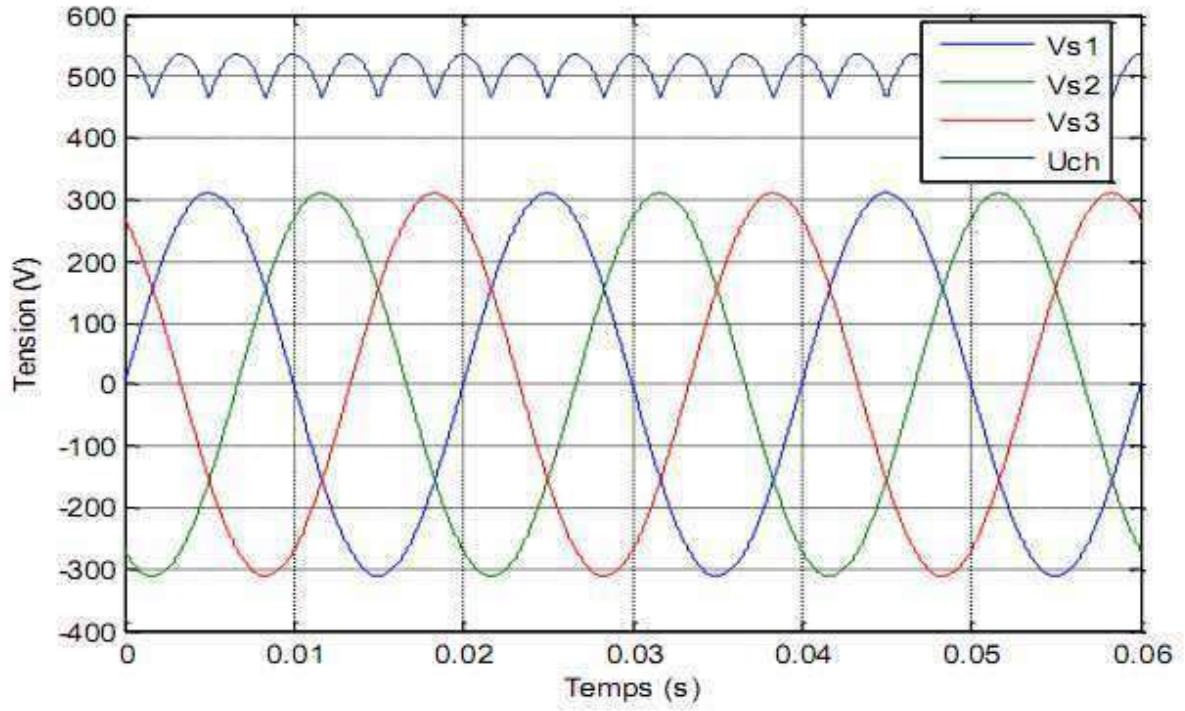


Figure II.9
Signal d'un redresseur triphasé double alternance en pont.

Grandeurs caractéristiques :

$$U_s moy = \frac{3}{\pi}\int_{-\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{6}} U_s max\ cos\theta\ d\theta \qquad \text{(II.20)}$$

D'où $$U_s moy = \frac{3U_s max}{\pi} \qquad \text{(II.21)}$$

$$U_s{}^2{}_{eff} = \frac{3}{\pi}\int_{-\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{6}} U_s{}^2 max\ cos^2\theta\ d\theta \qquad \text{(II.22)}$$

D'où $$U_{S\,eff} = U_s max\sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{4\pi}} \qquad \text{(II.23)}$$

II.3 Partie de simulation :

dans cette partie on va simuler des charges non linéaire comme un redresseur monophasé à double alternances (pont de graïtz), une lampe fluorescente (lampe basse consommation L B C) et, Nous nous concentrons sur ce qui suit :

- la forme du courant de source
- la forme de la tension de source
- le spectre d'harmonique de I_s et V_s
- le taux de distorsion harmonique (TDH_I,TDH_V)

II.3.1 redresseur monophasé double alternances avec charge inductive

(Pont de graïtz + R L)

Le montage dans la figure II.1 est simulé en Matlab-simulink pour obtenir les résultats voulu qu'on a mentionnées précédemment .

Avec :

R = 10 Ω

L = 10 mH

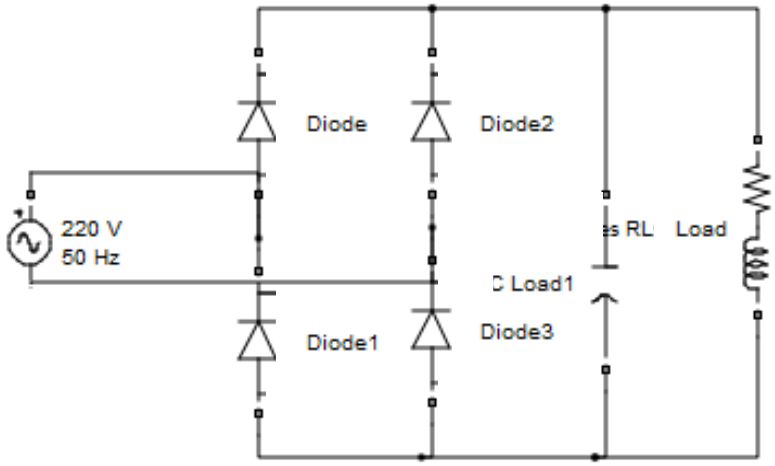


Figure II.10
Redresseur avec charge RL

Après la simulation on a obtenu les courbes suivantes :

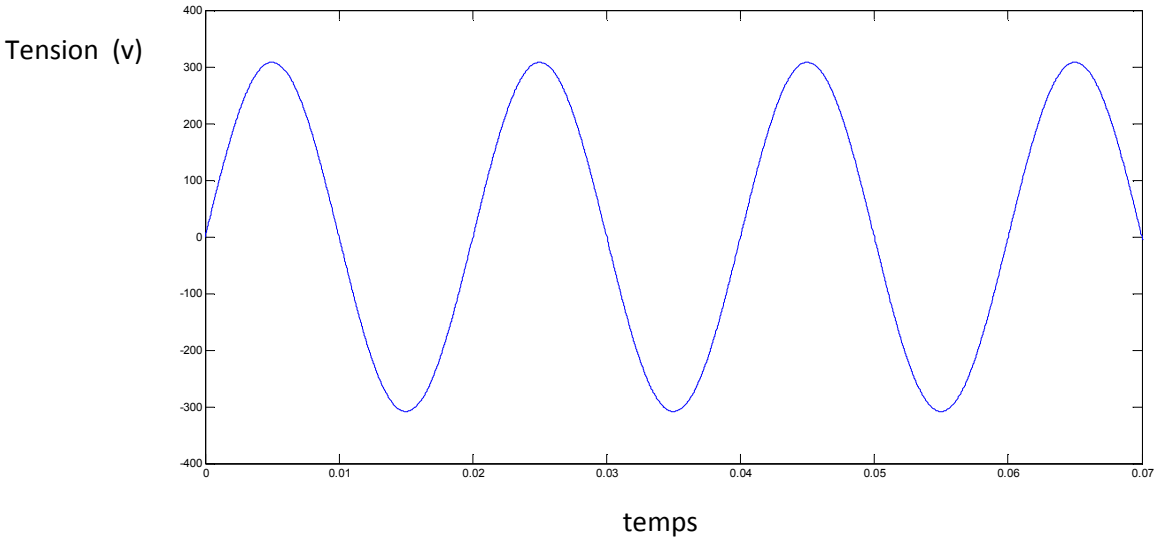


Figure II.11 La courbe de la tension au borne du redresseur

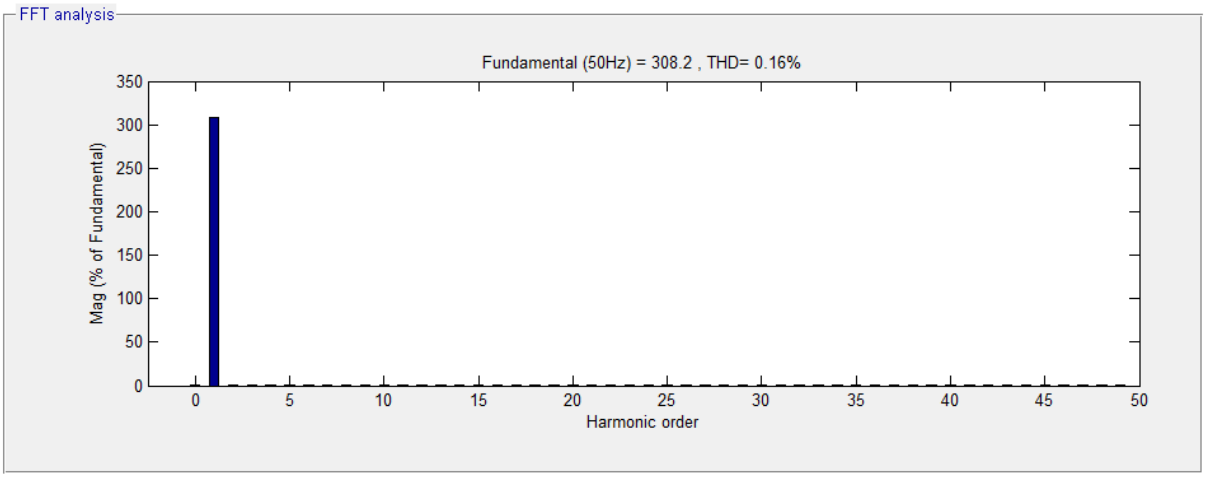


Figure II.12 Tension de source Vs et spectre d'harmonique.

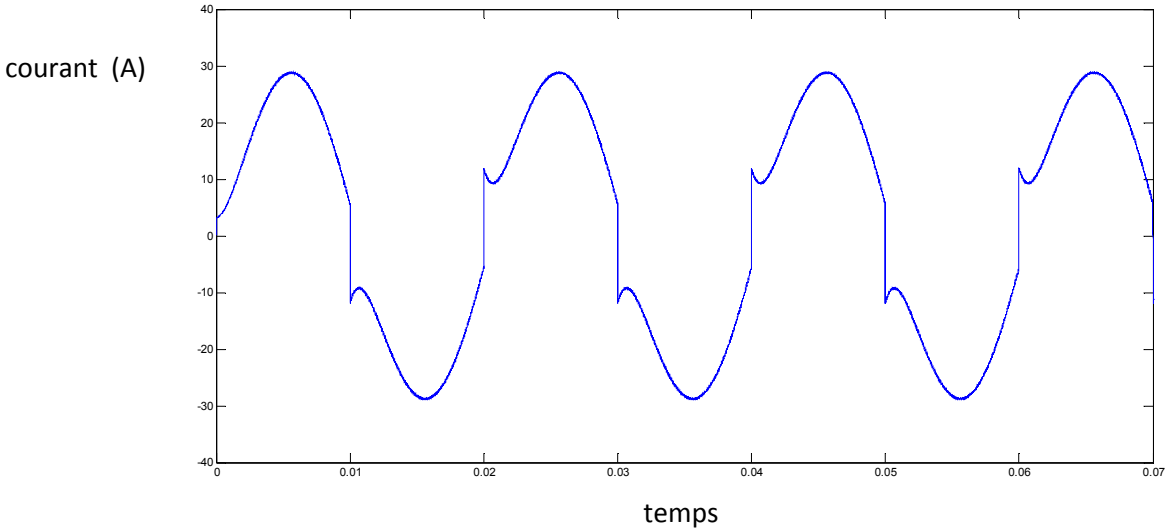


Figure II.13 L'allure du courant de source du redresseur(is)

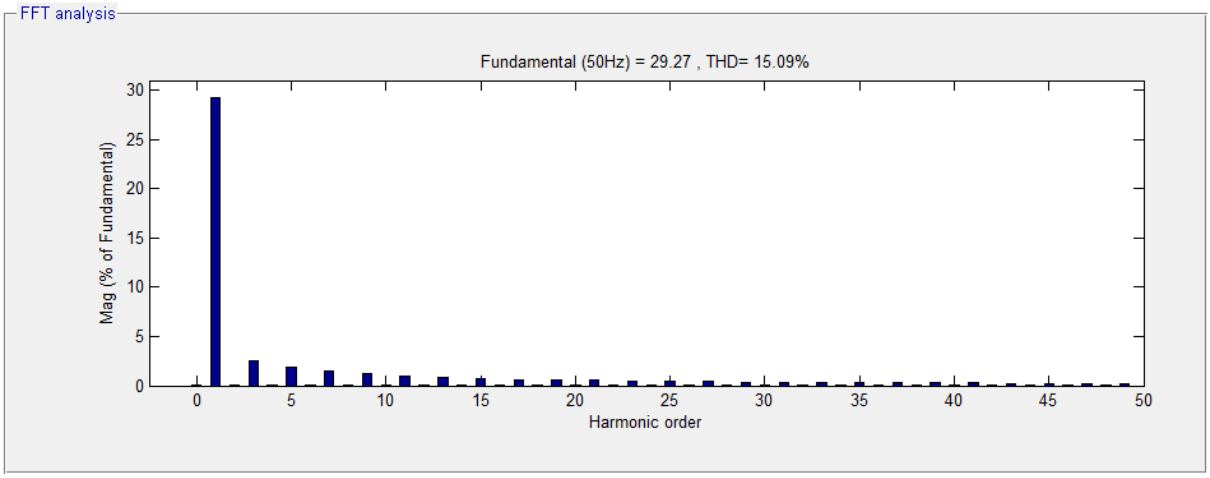


Figure II.14spectre d'harmonique du Courant de source Is

D'après l'analyse spectrale du signal de courant de charge, on constate que le THD global a voisine cette valeur montre qu'une telle charge est une source génératrice d'harmoniques, son fonctionnement conjugué avec d'autres charges même linéaires peut engendrer des perturbations remarquables sur le réseau électrique.

On a observé que le courant I_s n'est pas sinusoïdal donc il y a des harmoniques de courant.

La figure II.14 représente les harmoniques sous forme des barres, l'amplitude de ces harmoniques est inversement proportionnel avec la fréquence c.à.d. Les hauts fréquences sont de faible amplitude, implique de faible puissance.

En générale les harmoniques pris en compte dans un réseau électrique sont inférieurs à 2500Hz. Ce correspond au domaine des perturbations basse fréquence au sens de la normalisation.

Les harmoniques de fréquence plus élevée sont fortement atténuées par la présence des inductances de ligne. De plus, les appareils générant des harmoniques on une grande majorité, un spectre d'émission inférieur à 2500Hz, c'est-à-dire des rangs de 2 à 50.

On a observé aussi que les harmonique d'ordre pair sont nuls à cause de la symétrie par rapport l'axe du temps.
Le taux de distorsion égal à 15.09 % donc cette charge ne respect pas les normes compatibilité électromagnétique.

II.3.2 Présentation de la charge étudiée :

Les harmoniques présentés sur les réseaux électriques proviennent de l'utilisation de charges non linéaires.

Ces charges se comportent comme des sources de courants harmoniques le courant harmonique Vien de la charge non linéaire et non par l'impédance ou la tension de réseau.

L'utilisation d'un ensemble important de récepteurs de faibles puissances sur un même réseau peut donner naissance à des conséquences similaires à celles engendrées par les récepteurs non linéaires de fortes puissances. Un exemple des plus rencontré est le parc d'éclairage à base de lampes fluorescentes.

II.3.3 simulation de la lampe L.B.C

les lampes basse consommation (L.B.C) sont caractérisé par ses pertes réduites mais malheureusement elles sont riches en harmoniques donc elles sont considérées comme des charges non-linéaires et la figure suivante représente un model de la lampe.[6]

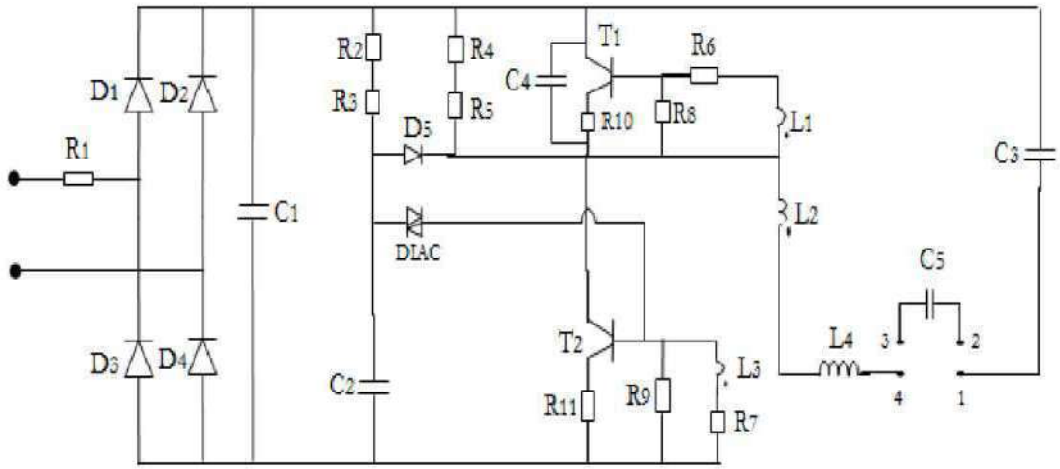


Figure II.15 Model de la lampe L B C

II.3.4 lampe L.B.C alimenté par une tension monophasée

La courbe suivante démontre que la lampe L.B.C n'absorbe pas un courant sinusoïdal, donc elle est considérée comme une charge perturbatrice,

La figures (II.16) représentent les tensions de source avec leurs spectres d'harmoniques.

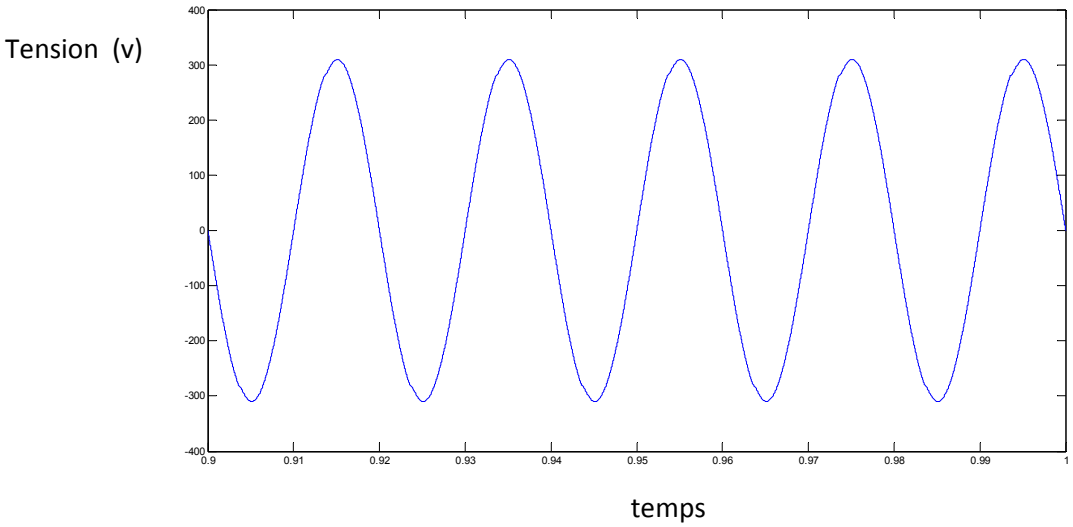


Figure II.16 tension de source Vs.

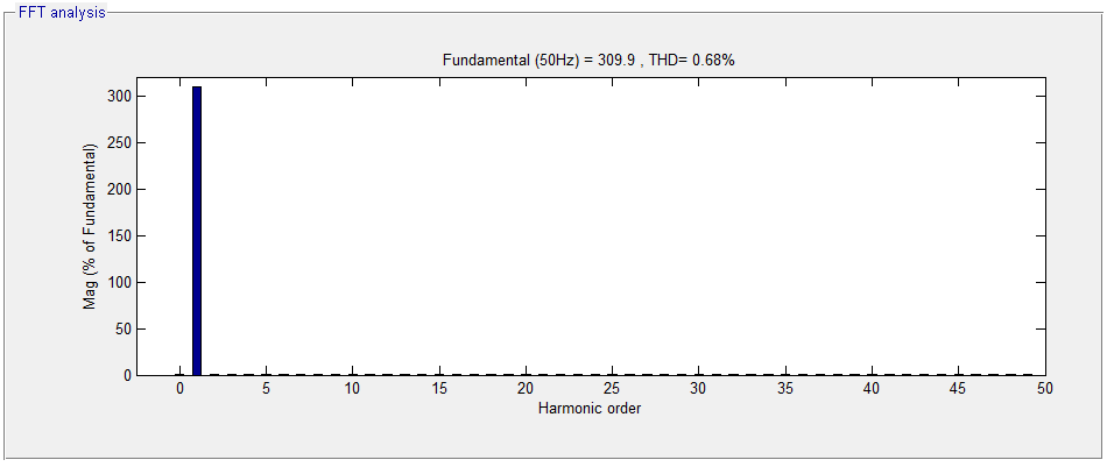


Figure II.17 spectre d'harmonique de la tension de source Vs.

Le courant absorbé par la lampe avec son spectre d'harmonique est illustré sur les figures

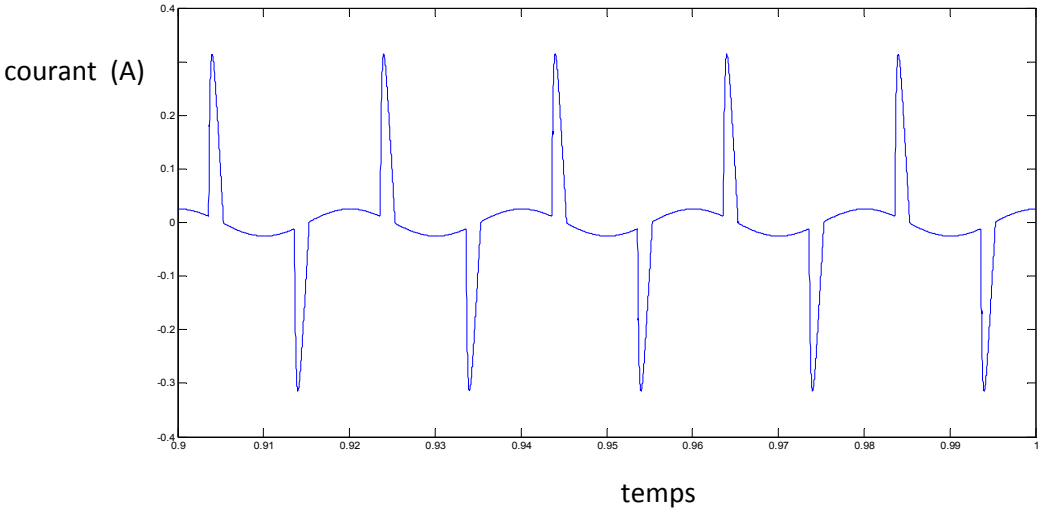


Figure II.18 L'allure de courant absorbé par la lampe.

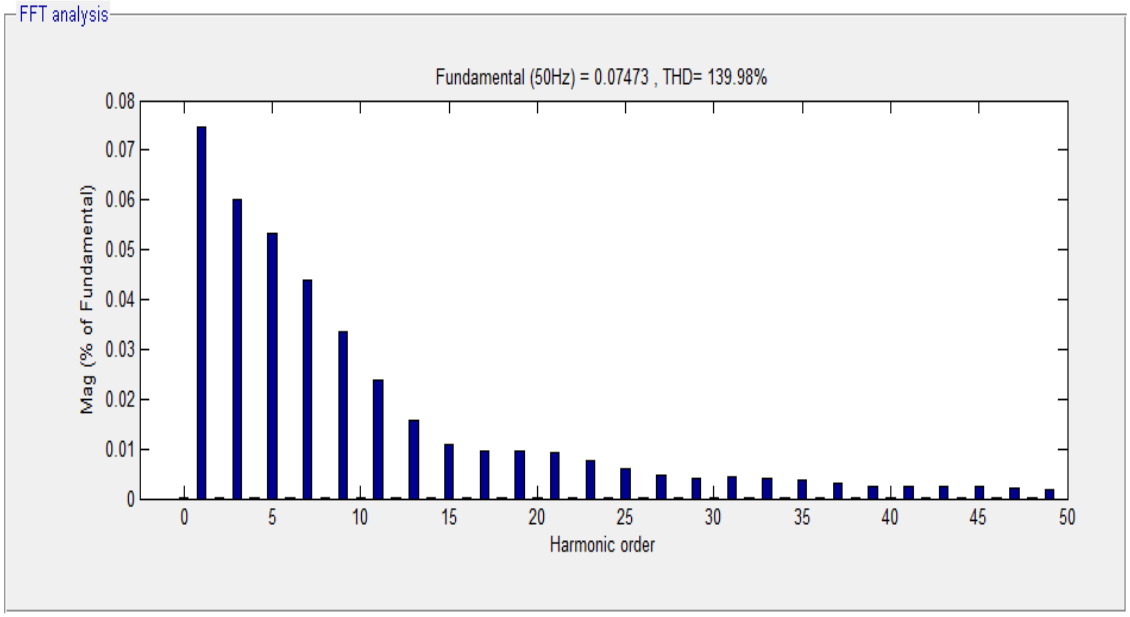


Figure II.19 le spectre d'harmonique du courant absorbé par la lampe

II.3.5 lampe L.B.C alimenté par une tension triphasée :

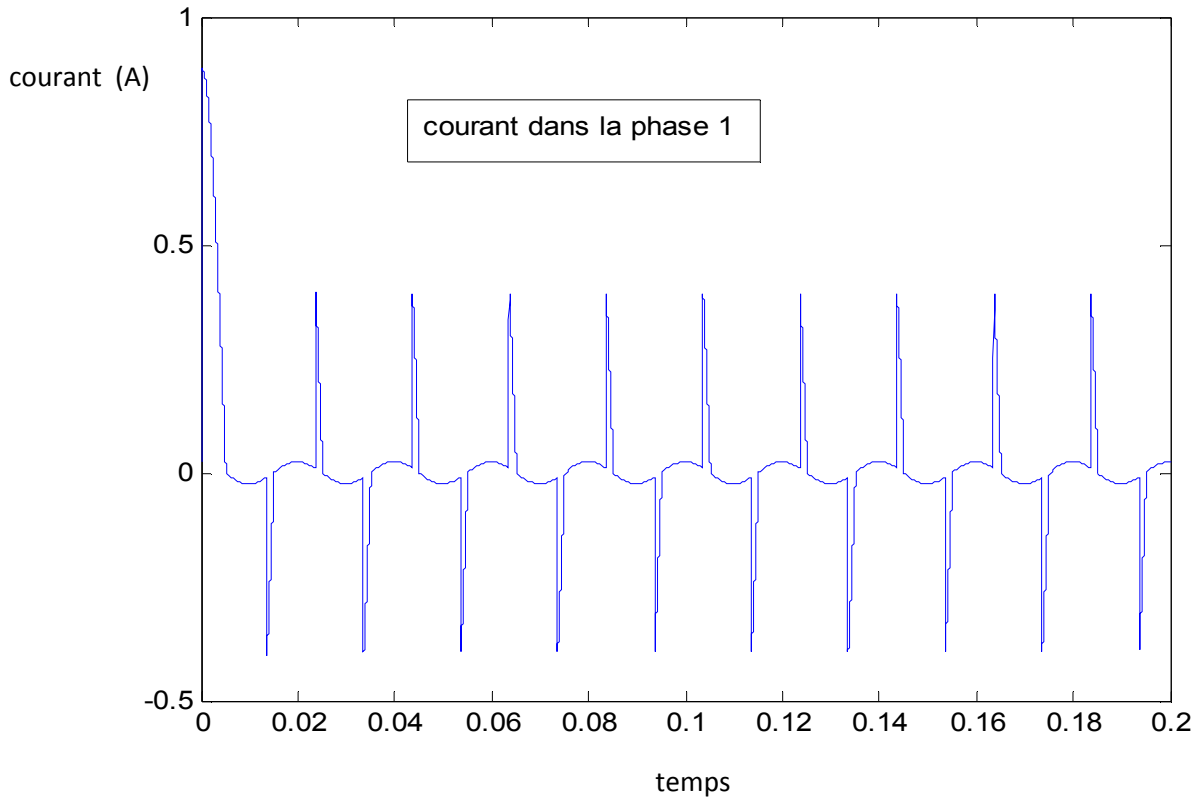


Figure II.20 L'allure Courant de la première phase

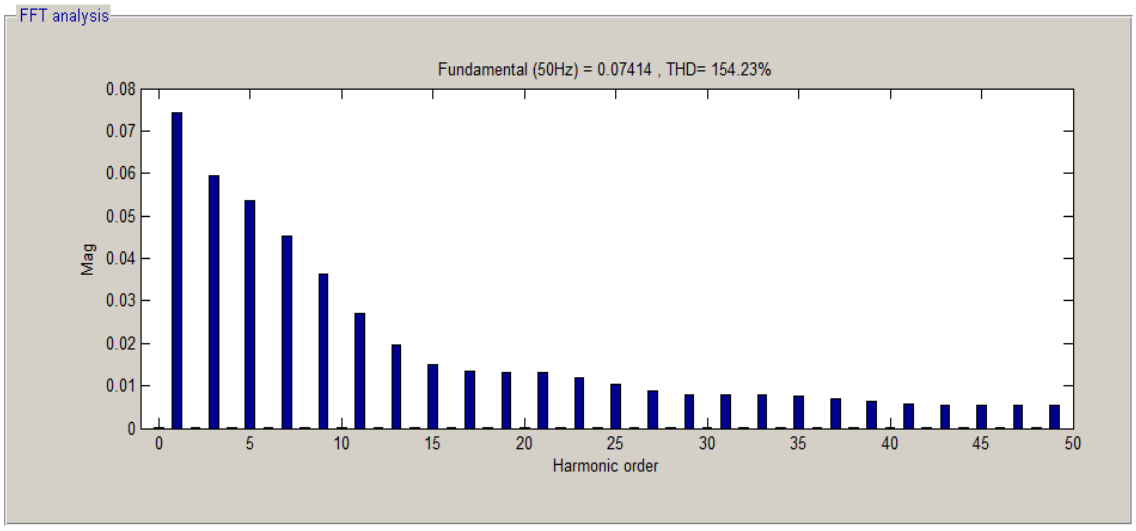


Figure II.21 Spectre d'harmonique du courant dans la phase$_1$

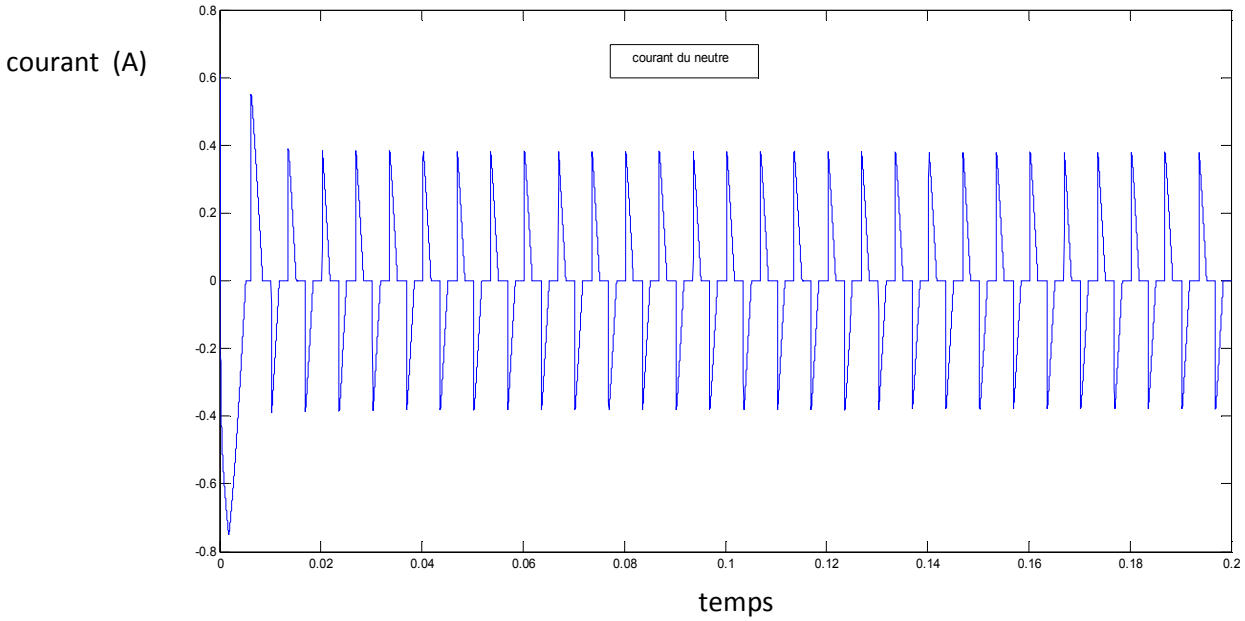


Figure II.22 Courant dans le neutre

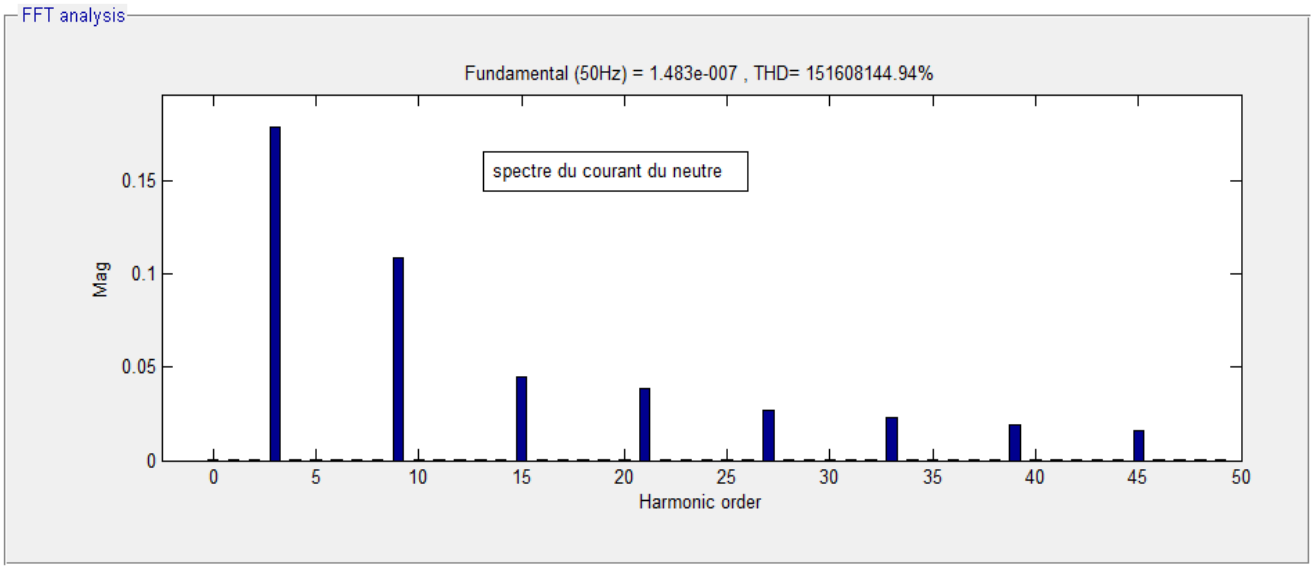


Figure II.23 Spectre d'harmonique du courant dans le neutre

Remarque :

On observe que les harmoniques d'ordre multiple de 3 tel que (n=6*k-3)(k=1 2 3....) , sur tout l'harmonique numéro 3 s'augment ,et la fondamental s'annule car le system triphasé couplé en étoile et il est équilibré .

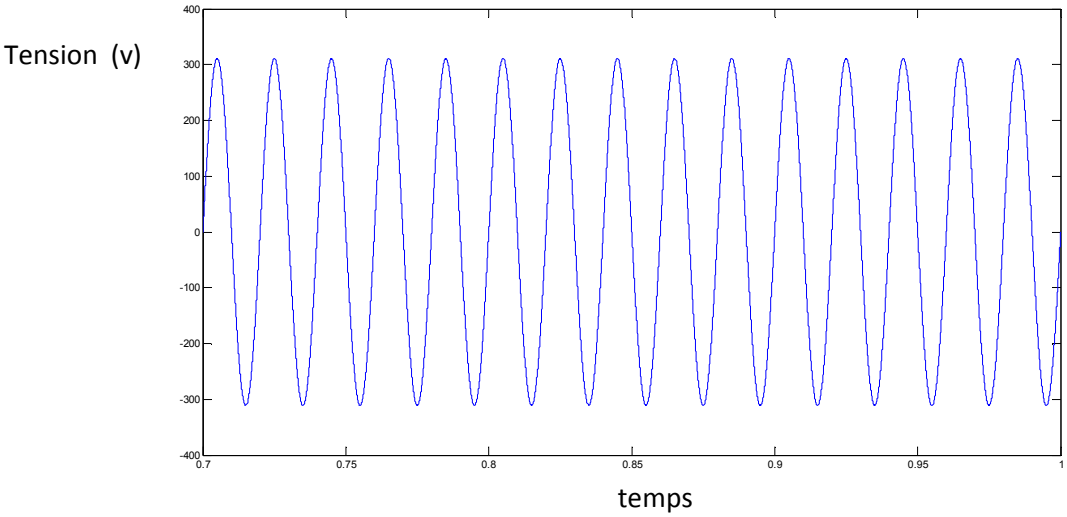


Figure II.24 La courbe de la tension simple

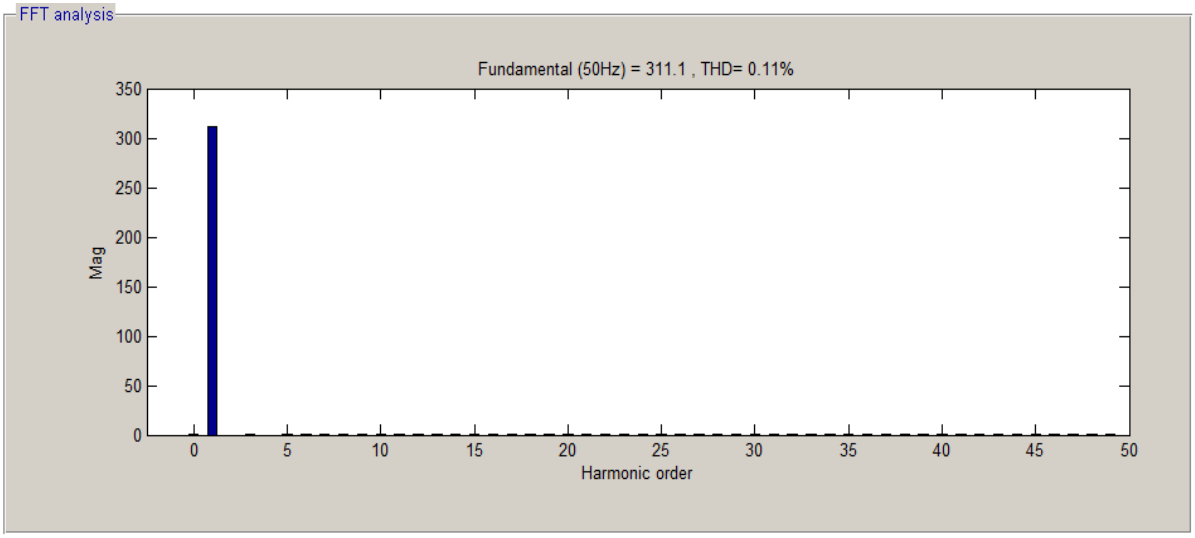


Figure II.25 Le spectre de la tension simple

Conclusion :

Après avoir modélisé et mise en expérience les lampes L.B.C, on peut conclue que :

Ces lampes sont génératrices d'harmoniques, donc elles sont des charges non linéaires.

Et le taux de distorsion de ce courant vaut 139%,

Donc si elles utilisés en un grand nombre, peut être source de désagrément dans

le réseau BT pour ce là on va propose des solutions de filtrage dans le chapitre suivant.

III.1 Introduction :

Les solutions classiques généralement utilisées pour réduire les harmoniques et augmenter le facteur de puissance consistent en des filtres passifs parallèles qui piègent les courants harmoniques localement et limitent leur propagation dans le réseau. Cette solution extrêmement simple de principe et fort répandue, pose tout de même certains problèmes :

La conception du filtre nécessite une connaissance approfondie de la configuration du réseau électrique.

Le dimensionnement dépend du spectre harmonique de la charge et de l'impédance de la source.

Aux fréquences spécifiques, il existe des anti-résonances entre l'impédance de source et les filtres passifs. En plus, des harmoniques de courants générés par la tension de source non-sinusoïdale s'écoulent par les filtres passifs LC

La variation de fréquence de la source alternative affecte les caractéristiques de compensation des filtres passifs. Par conséquent, la taille des composants dans chaque branche accordée devient peu pratique si la variation de fréquence est grande. En systèmes de puissance nous considérons une grande variation de la fréquence de plus ou moins 0,5 Hz

Toute modification du réseau (restructuration, nouveaux clients, ...), en changeant la fréquence d'accord, peut rendre le filtre passif inadapté et perturbateur (phénomène de résonance). Donc, si le réseau se modifie, il faut modifier les paramètres du filtre.

Afin de limiter les risques de résonance en tension, le facteur de qualité du filtre accordé est dégradé et provoque une consommation de puissance active

Pour le fondamental, ces circuits ont un comportement capacitif et sont une source de puissance réactive. Ces problèmes rendent la conception des filtres passifs difficiles, étant donné que le spectre généré est variable, leurs combinaisons pour des rangs d'harmoniques fixes ne suffisent plus pour dépolluer les réseaux soumis à des perturbations dont le caractère est de plus en plus dynamique.

III.2 Etude du filtre :

Le filtre est un quadripôle linéaire qui ne laisse passer que certaines composantes fréquentiels de signal appliqué à l'entrée.

Le domaine de fréquence où le signal passe est délimité par les fréquences de coupures, on l'appelle la bande passante de filtre.

Si un filtre n'est constitué qu'avec des éléments passifs linéaires RLC, on dit qu'il est un filtre passif. S'il contient des éléments actifs, on dit qu'il est un filtre actif.

Fonction de transfert:

On définit la fonction de transfert complexe d'un quadripôle par :

$$F(j\omega) = \frac{Vs}{Ve} = |F(\omega)|e^{j\varphi(\omega)} \qquad \text{(III.1)}$$

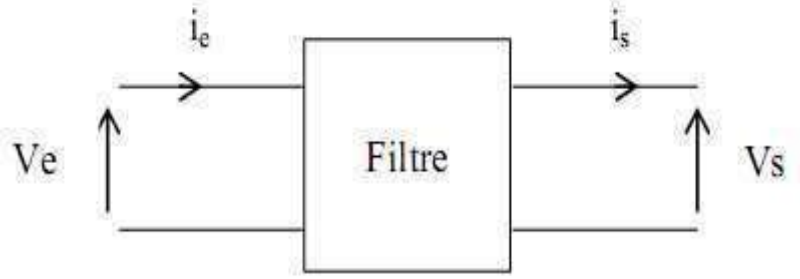


Figure III.1 Schéma d'un filtre.

Avec :

$|F(\omega)| = \left|\frac{Vs}{Ve}\right|$ est le gain du quadripôle. (III.2)

$\varphi(\omega) = \varphi_s(\omega) - \varphi_e(\omega)$ est la phase de la fonction. (III.3)

III.2.1 Fréquence de coupure :

La fréquence de coupure d'un filtre est définie comme étant la fréquence pour laquelle le module de la fonction de transfert, égale sa valeur efficace.

$$|F(\omega_c)| = \frac{|F(\omega)|_{max}}{\sqrt{2}} \qquad \text{(III.4)}$$

$$f_c = \frac{\omega_c}{2\pi} \qquad \text{(III.5)}$$

III.3 Filtrage Passif :

Notre travail est essentiellement basé sur le filtrage passif des harmoniques, ce filtrage consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance de valeur très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau

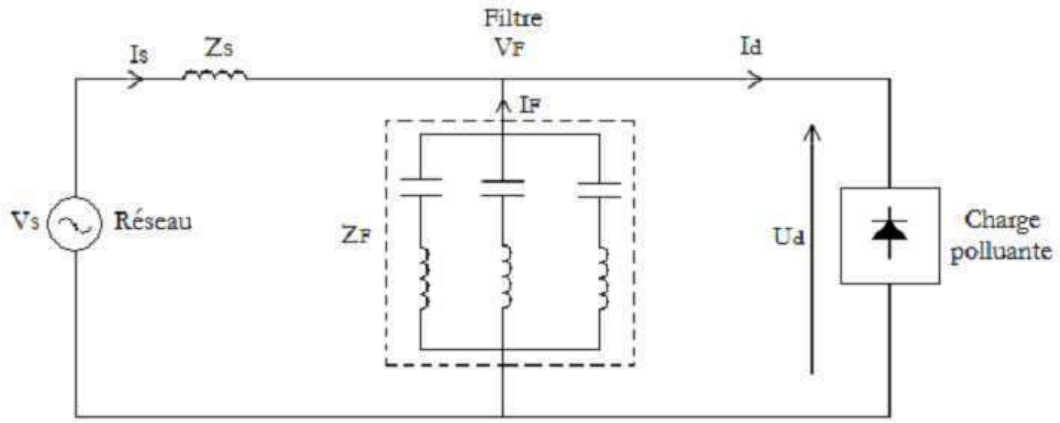


Figure III.2 L'emplacement du filtrage passif.

III.3.1 Principe de fonctionnement :

Le principe du filtrage passif est de modifier localement l'impédance du réseau afin de faire dévier les courants harmoniques et, du même coup, éliminer les tensions harmoniques résultantes. Ces filtres sont composés d'éléments capacitifs et inductifs qui sont disposés de manière à obtenir un résonance série sur une fréquence déterminée. Les types de filtre passif utilisés sont choisis en fonction de l'atténuation harmonique recherchée.

III.3.2 classification des filtres passifs :

Ils peuvent être classifiés selon leur emplacement, leur mode de connexion au circuit principal, leur degré d' amortissement ainsi que les fréquences de leurs résonances. On distingue généralement un filtre shunt et un filtre série. Par ailleurs, le filtre shunt est utilisé exclusivement du côté courant alternatif *(ca)* pour les raisons suivantes:

il est possible de classifier les filtres passifs selon leur emplacement sur le réseau, leur mode de connexion, leur degré d'amortissement de même que leur fréquence de résonance.

Les filtres passifs peuvent se diviser en deux familles, soit les filtres parallèles et les filtres séries. Selon le type choisi, les harmoniques peuvent être ;

(a) littéralement bloqués par une impédance série élevée entre le convertisseur et le réseau,

(b) déviés par une faible impédance en parallèle ou une combinaison des deux.

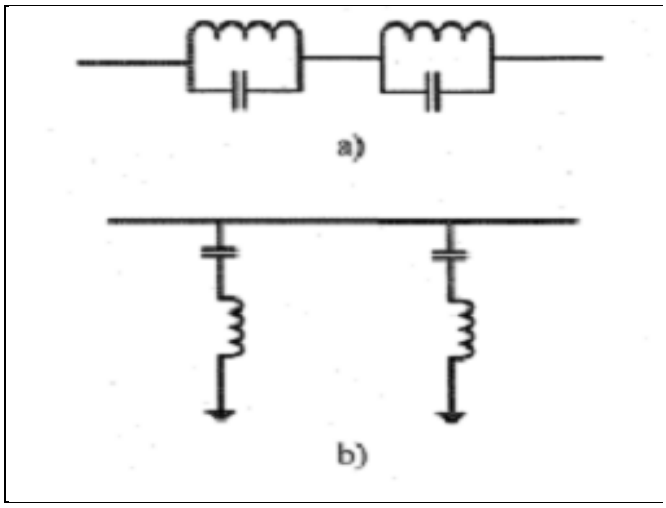


Figure III.3 a) Filtre série et b) Filtre parallèle.

Le filtre parallèle est utilisé exclusivement du côté alternatif pour trois raisons :

- il porte uniquement le courant harmonique et il est lié à la terre.
- À la fréquence fondamentale, il possède l'avantage de fournir de la puissance réactive.
- Pour une efficacité équivalente au filtre série, le filtre parallèle est beaucoup moins cher.

Le filtre parallèle est surtout utilisé dans le cas des charges génératrices de courants harmoniques alors que le filtre série l'est pour les charges génératrices de tensions harmoniques

III.4 Différents types de filtres parallèles:

- **Inductance anti-harmonique** :

Cette première solution consiste à installer une inductance en série avec les condensateurs de compensation sur chaque branche monophasée.

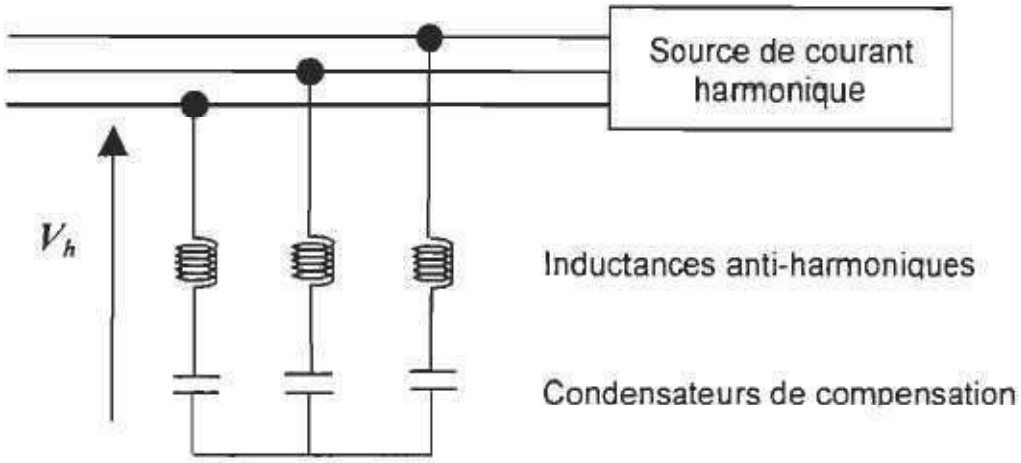


Figure III.4 Raccordement d'une inductance anti-harmonique

Ce type de filtre a pour objectif essentiel de protéger les batteries de condensateurs d'une surintensité due aux harmoniques. Il a en outre pour effet de réduire les tensions harmoniques aux bornes de ces condensateurs.

Il permet souvent de réduire les valeurs d'impédance harmonique du réseau, vues du point d'injection au voisinage de la fréquence d'accord et donc les tensions harmoniques sur le réseau.

Pour éviter que ce filtre présente une résonance parallèle (anti-résonance) avec l'inductance du réseau sur lequel ils sont raccordés, on les accorde sur une fréquence inférieure à celle de la première injection de courant harmonique.

A noter aussi que l'installation d'inductances anti-harmoniques accroît la tension permanente à la fréquence fondamentale aux bornes des condensateurs qui doivent donc être dimensionnés en conséquence.

- **Filtre résonant** :

Un filtre résonant a pour objet de présenter une impédance très faible au passage d'un courant harmonique à un rang déterminé.

Le facteur de qualité d'un filtre résonant est élevé; l'accord du filtre est donc très pointu.

Plusieurs filtres résonants correspondant aux différents rangs harmoniques à filtrer, sont souvent installés, en parallèle.

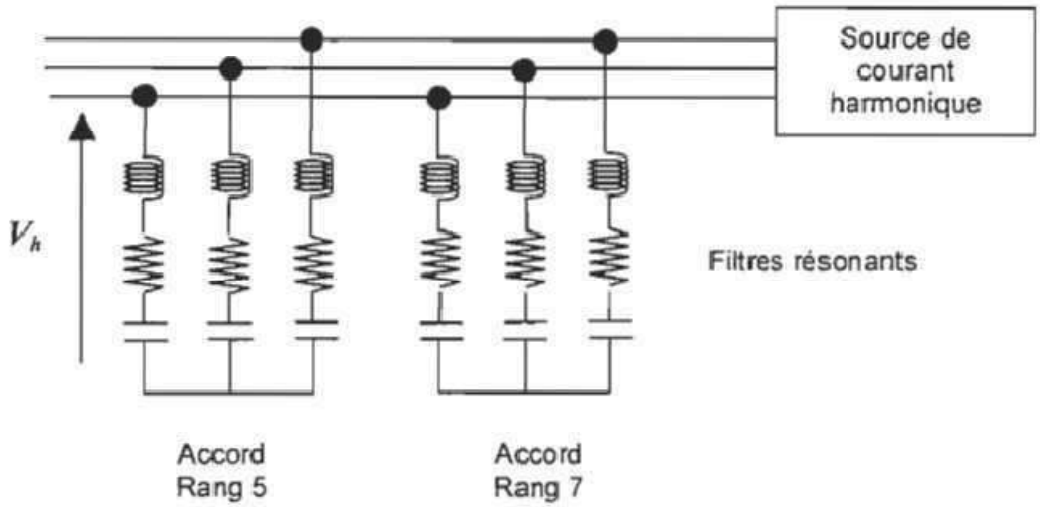


Figure III.5 Installations de filtres résonants

La puissance réactive nécessaire pour l'installation est répartie entre condensateurs des différents filtres.
Ceci nécessite une étude fine du profil de charge de l'installation.

Les filtres résonants présentent l'inconvénient d'être sensibles aux variations de l'inductance (dues à la qualité de réalisation) ou de la capacité (dues au vieillissement ou à la température), ce qui entraîne un désaccord de l'ensemble.
Cette dérive est plus marquée pour les filtres utilisant des condensateurs de faible capacité.

Afin d'ajuster la fréquence du filtre à la mise en service, l'inductance doit être munie de prises de réglage.

- Filtre amorti:

On distingue trois types de filtres amortis tels qu'illustrés en figure 1.5; nous avons en (a) un filtre amorti de premier ordre, en (b) un filtre amorti de second ordre et en (c) un filtre de troisième ordre.

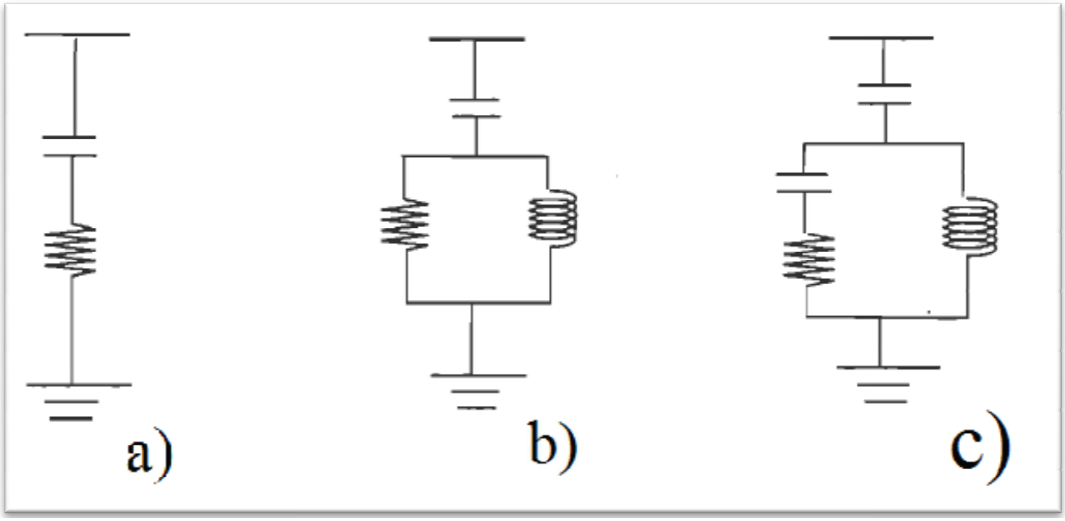


Figure III.6 Filtre amorti passe haut
a) du premier ordre b) du deuxième ordre
c) du troisième ordre

Le filtre de premier ordre exige une grande capacité et présente une perte de puissance excessive à la fréquence fondamentale.
Les filtres de second ordre et d'ordre 3 sont couramment utilisés.
Tous les deux sont en général conçus avec un faible facteur de qualité Fq compris entre 0,7 et 1,4.

Un filtre amorti de second ordre se compose d'une capacité en série avec un ensemble constitué de la mise en parallèle d'une inductance et d'une résistance appelée résistance d'amortissement.
Il est utilisé lorsque les performances demandées ne sont pas élevées pour filtrer simultanément les plus hautes fréquences du spectre; c'est un filtre passe-haut de deuxième ordre.

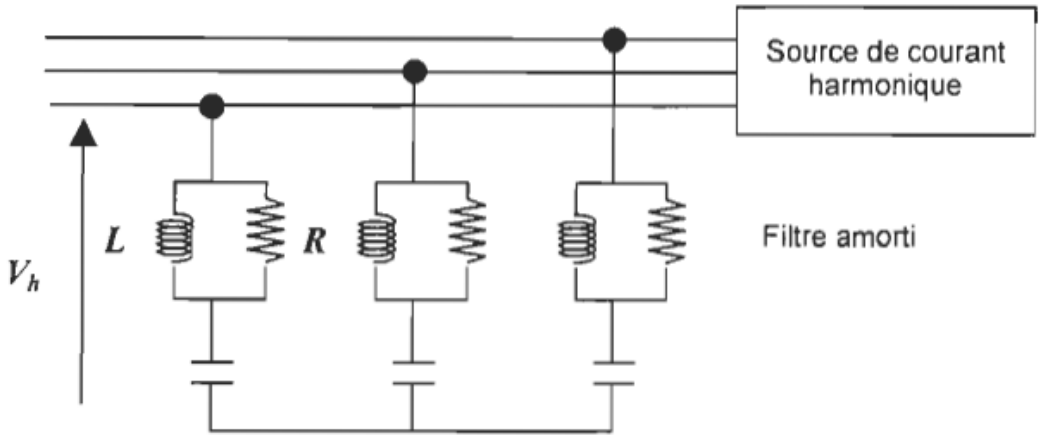


Figure III.7 Installation des filtre amortie

En pratique, il est courant de mettre en œuvre :
- des filtres résonants accordés sur les premiers rangs harmoniques (rangs 5 et 7) où les injections de courant sont importantes.
- Un filtre amorti pour limiter l'impédance harmonique sur le reste du spectre (rangs > 11).

L'anti-résonance des filtres provoque une amplification des rangs harmoniques inférieurs à la fréquence d'accord. Le premier filtre est alors accordé sur la première fréquence d' injection de
façon à ne pas faire coïncider la fréquence d'anti-résonance avec une injection de courant.
Il est important de prévoir une inductance ajustable afin d'accorder correctement le filtre; ce en raison des tolérances sur les valeurs des condensateurs et de l'inductance dont l' effet peut être très important sur l' efficacité du filtre.

III.5 Filtre résonant :

Le filtrage passif résonnant est constitué d'un circuit résonnant composé d'un condensateur et d'une inductance en série accordés sur la fréquence de l'harmonique que l'on veut éliminer, Ce filtre possède une impédance faible pour l'harmonique concerné et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau. Par conséquent il faut autant de circuit résonnant que d'harmonique à supprimer.

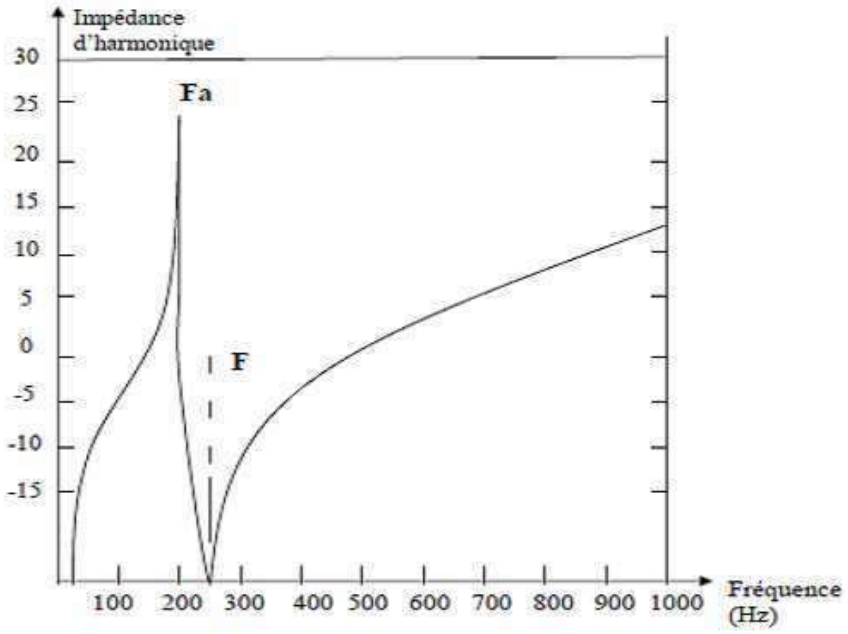


Figure III.8 L'impédance du filtre en fonction de la fréquence

Dans le cas présent, la fréquence d'accord correspond au rang 5 c'est-à-dire 250Hz, on remarque qu'à la fréquence de résonance l'impédance est très faible; ce qui dérive les courants harmoniques vers le filtres.

A une fréquence légèrement inférieure à la fréquence de résonance on observe, un accroissement important, une résonance parallèle dite (anti-résonance). Cette dernière est due à l'impédance du filtre (Z) en parallèle avec l'impédance de la source (Zs).

Lorsqu'on veut filtrer un rang harmonique élevé il faut toujours prendre garde à ce que l'anti-résonance n'amplifie pas les rangs harmoniques les faibles ; c'est pourquoi lorsqu'on utilise des filtres accordés sur des rangs harmoniques différents, par exemple 5, 7, 11, leur mise en service doit se faire par ordre croissant aux rangs harmoniques filtrés et inversement lors de la mise hors service.

La présence de résonance au sein d'un réseau électrique entraîne certain nombre de risques vis-à-vis des perturbations harmoniques.

La performance d'un filtre résonnant est caractérisée par la tension harmonique entre ses bornes Vfh. Cette tension ce calcule à partir du courant harmonique Ihf traversant l'impédance du réseau Zs en parallèle avec l'impédance Zf du filtre, calculées à une fréquence h fois celle du fondamental :

$$V_{Fh} = \frac{Z_{f*h*Z_s}}{Z_{f+h*Z_s}} I_{dh} \qquad \text{(III.6)}$$

Or au voisinage de l'accord, le module de ZF s'écrit :

$$Z_s = \frac{1}{c\omega_1 h}\sqrt{\frac{1}{Q^2}} + 4\sigma \qquad \text{(III.7)}$$

Avec :

$Q = \frac{L\omega_1 h}{r}$ Coefficient de qualité de l'inductance série

$\sigma = \frac{\Delta\omega}{\omega 1}$ Précision d'accorde

Comme: ZF << h*Zs, on obtient:

$$V_{Fh} = Z_F I_{dh} \qquad \text{(III.8)}$$

Le filtre sera plus performent avec Q grand et σ Faible. Il faut noter qu'il existe toujours une antirésonance pour un range h_a inférieur à celui de l'accorde, due à l'inductance Ls du réseau.

$$h_a = \sqrt{\frac{1}{(L_s+L)c{\omega_1}^2}} \qquad \text{(III.9)}$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_c} \qquad \text{(III.10)}$$

$$X_c = \frac{{V_{cap}}^2}{Q} \qquad \text{(III.11)}$$

$$Q = \frac{X_r}{W_r} \qquad \text{(III.12)}$$

$$L = \frac{1}{(2\pi f)^2 (h)^2 * \frac{C}{n}} \qquad \text{(III.13)}$$

III.6 Filtre amorti :

Un filtre amorti se compose d'une capacité en série avec un ensemble constitué de la mise en parallèle d'une inductance et d'une résistance appelée résistance d'amortissement. Il est utilisé lorsque les performances demandées en sont pas trop élevées, on l'utilise souvent pour filtrer simultanément la plus haute fréquence du spectre, et non une fréquence particulière, c'est un filtre passe haut.

Le schéma monophasé équivalent de l'installation d'un filtre amorti est montré dans la figure (III.9).

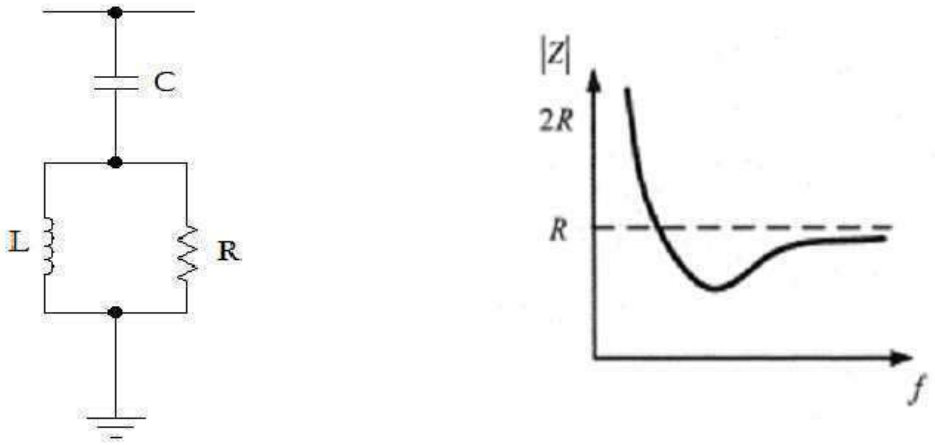


Figure III.9 Filtre amorti.

Il est moins sensible à la variation de ses éléments (capacité, inductance, et résistance) qu'un filtre résonant.

La résistance d'amortissement influe légèrement sur la fréquence d'accord. Les filtres amortis d'ordre 2 sont les plus répandus. Il existe également des filtres amortis d'ordre 3 qui comportent deux éléments capacitifs par phase au lieu d'un

III.7 Circuits accordé :

Souvent on associe aux filtres résonants un filtre amorti pour filtrer simultanément les plus hautes fréquences du spectre. La Figure ci-dessous montre le schéma d'un filtre passif relié à un réseau électrique.

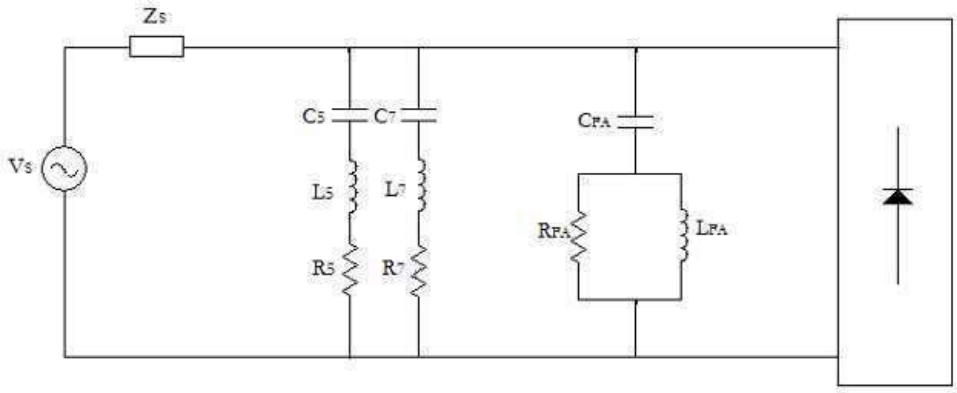


Figure III.10

Schéma monophasé d'un réseau avec deux filtres résonants et un filtre amorti.

On utilise les circuits accordés sur les rangs harmoniques (5, 7,11) parce que ce sont les harmoniques qui ont des amplitudes respectivement élevée dans le spectre de fréquence. En pratique, lorsqu'un besoin de filtrage devient nécessaire, il est courant de mettre en œuvre des filtre résonant accorés sur les premières ranges harmoniques (5.7) ou les injections de courant sont importantes. Un filtre amorti pour limiter l'impédance harmonique sur le réseau du spectre (>11).

L'antirésonance des filtres provoque une amplification des ranges harmonique inférieure à la fréquence de résonance du filtre. La valeur de l'impédance du réseau à la fréquence d'anti- résonance, conditionne fortement l'allure de la courbe de l'impédance en fonction de fréquence.

On accorde donc le premier à la première fréquence d'injection de façon à ne pas faire coïncider avec la fréquence d'antirésonance.

III.8 Calcul des filtres passifs :

Dans notre cas, on a intéressé à l'application d'un filtre résonant sur une charge non linéaire (lampe L.B.C).

Un circuit accorde (RLC) à une impédance :

$$Z = R + j(L\omega - \frac{1}{C\omega}) \qquad \text{(III.14)}$$

Avec :

Z : impédance complexe du circuit.

R : résistance.

Lω: réactance inductive

$\frac{1}{C\omega}$: réactance capacitive

A sa fréquence de résonance son impédance se réduit à une petite valeur soit R, et on peut écrire :

$$L\omega r = \frac{1}{C\omega r} \qquad \text{(III.15)}$$

ωr : est la pulsation de résonance, elle est égale à :

$$\omega r = 2\pi f_r \qquad \text{(III.16)}$$

f_r est la fréquence de résonance, elle est égale a :

$$f_r = \frac{\omega r}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \qquad \text{(III.17)}$$

La réactance inductive ou capacitive qui correspond à cette fréquence est :

$$Xr = L\omega r = \frac{1}{C\omega r} \qquad \text{(III.18)}$$

D'où : $$\omega_r{}^2 * LC = 1 \qquad \text{(III.19)}$$

$$Xr = \sqrt{\frac{L}{C}} \qquad \text{(III.20)}$$

Dans le cas d'un filtre résonance, le facteur de qualité est défini comme étant :

$$Q = \frac{Xr}{\omega r} \qquad \text{(III.21)}$$

III. 8.1 Détermination des paramètres du filtre :

Calcul de la réactance capacitive par la relation suivant :

$$Xc = \frac{(Vcap)^2}{Q} \qquad \text{(III.22)}$$

Tell que :

Vcap : la tension aux bornes de capacité.

Q : la puissance réactive.

Par conséquent, la capacité et l'inductance respective du filtre en fonction de Xc sont :

La valeur du condensateur :

$$C = \frac{1}{2\pi f * Xc} \qquad \text{(III.23)}$$

La valeur de l'inductance :

$$L = \frac{1}{(2\pi f)^2\ (h)^2 * C/n} \qquad \text{(III.24)}$$

Avec :

n : c'est le nombre des rangs qu'on veut éliminer, pour le triphasé en multiple $n = k * 3.\ (k = 1\ \ 2\ \ 3 \ldots.)$

f : la fréquence fondamental.

h : le rang de l'harmonique qu'on veut éliminer.

III.9 Application du filtre sur une charge non linéaire :

Les problèmes liés aux filtres passifs (non adaptabilité aux variations de la charge et du réseau, phénomène de résonance) ont conduit à la conception d'une nouvelle structure de filtres appelée filtres actifs.

Comme la déjà montré, les lampes L.B.C sont des charges polluantes, dans cette présent partie de travail, on va s'intéresser au filtrage des courants absorbés par une lampe alimenté en monophasé (230V-50Hz).
Pour cela, on a simulé le modèle de lampe avec et sans filtre, ainsi qu'une mise en pratique de la solution au laboratoire.

III. 10. PARTIE DE SIMULATION

Dans cette partie , nous avons simulé une installation contenant une lampe L.B.C, et puis une L.B.C avec filtre résonnant d'ordre 3

III.10.1 Résultats de simulation en monophasé:

- **La charge sans filtre :**

Dans la figure suivante on a le model de la lampe L B C alimenté en monophasé avec la présence d'une impédance de ligne qu'on va simuler

Pour déterminer la forme du courant.

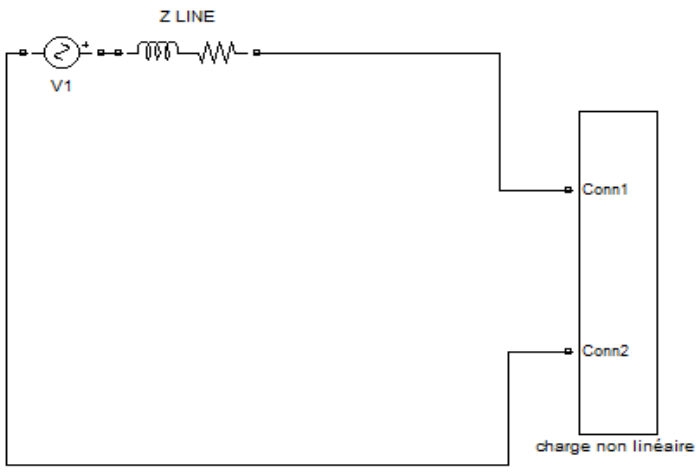


Figure III.11 Le model de source +charge(L B C) en monophasé

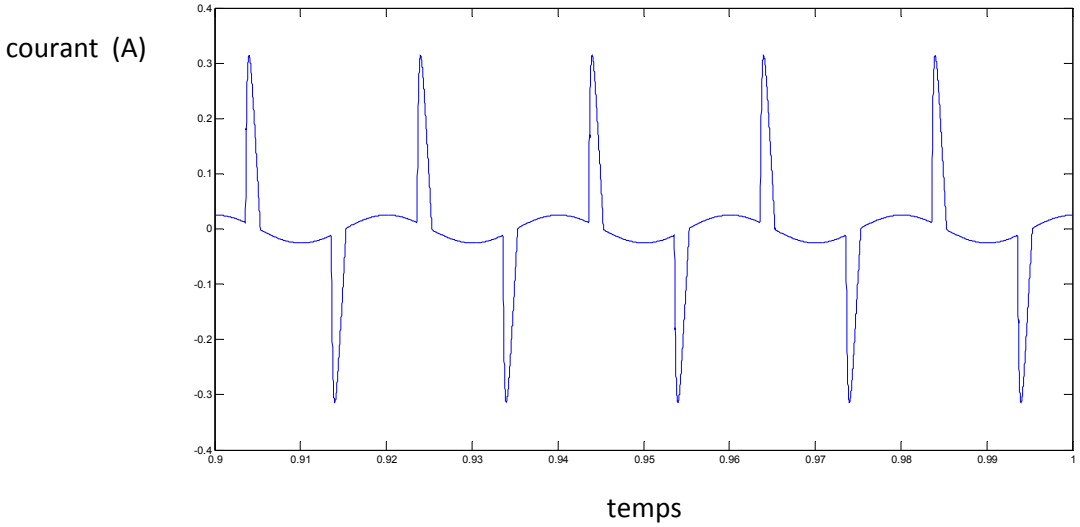


Figure III.12 L'allure du courant absorbé par la lampe

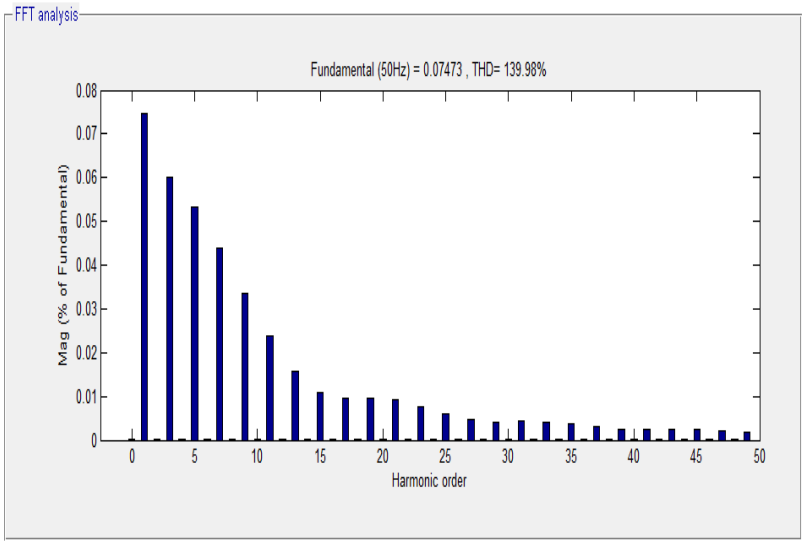


Figure III.13 Le spectre d'harmonique du courant de la lampe

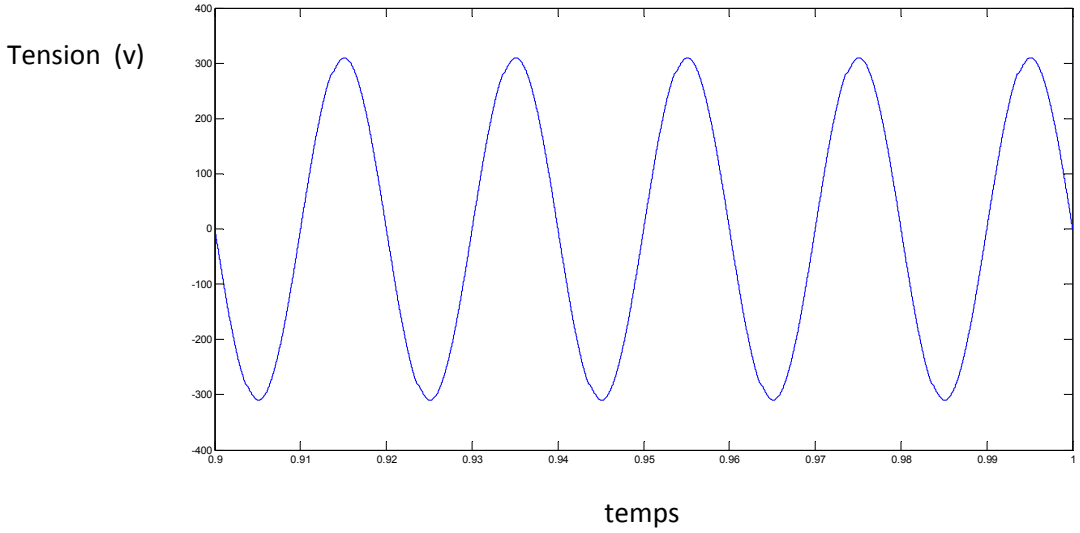


Figure III.14 La courbe de la tension au borne de la charge

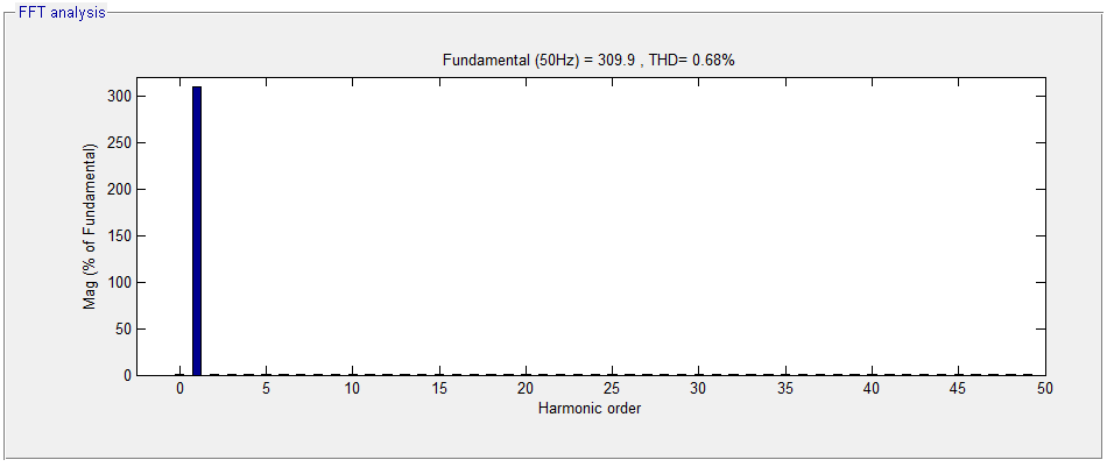


Figure III.15 Le spectre d'harmonique de la tension au borne de la charge

- **La charge avec filtre :**

La figure suivante démontre comment se place le filtre résonant par rapport la charge pour éliminer les harmoniques.

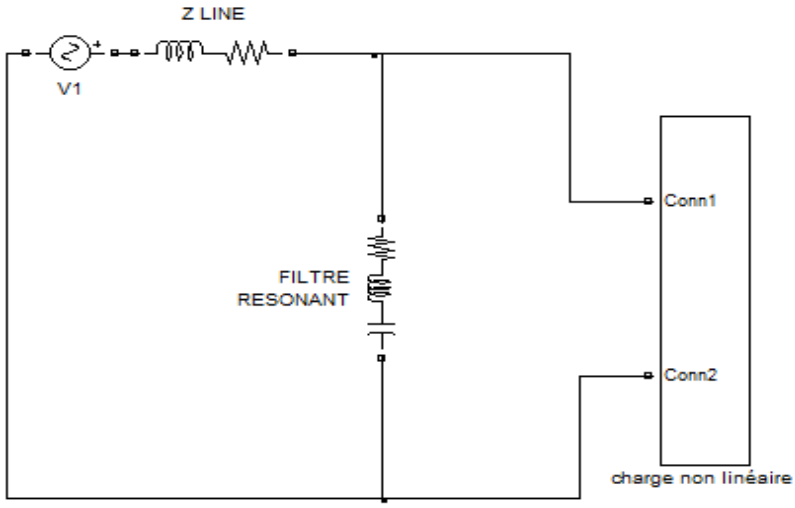


Figure III.16 Circuit présente l'emplacement du filtre

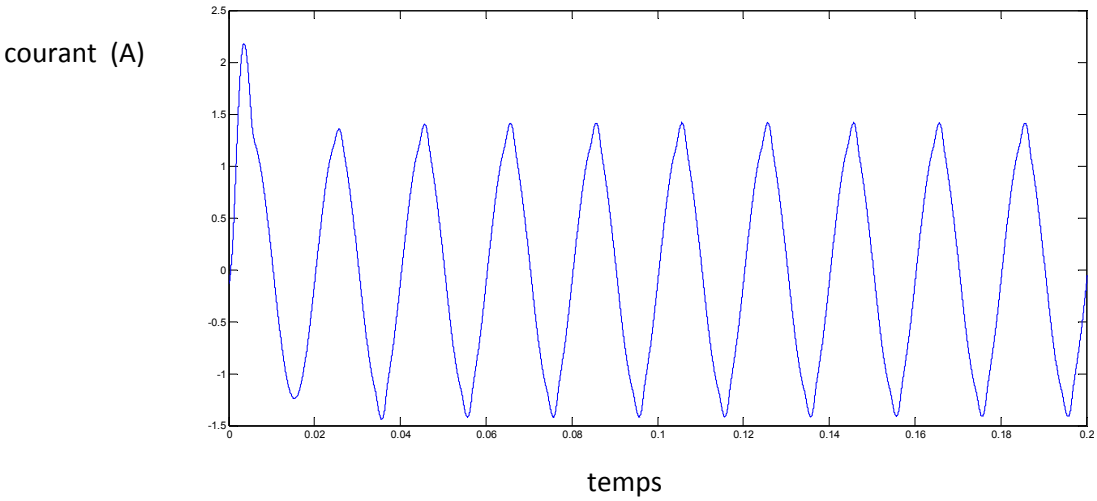


Figure III.17 Le courant de la source après filtrage

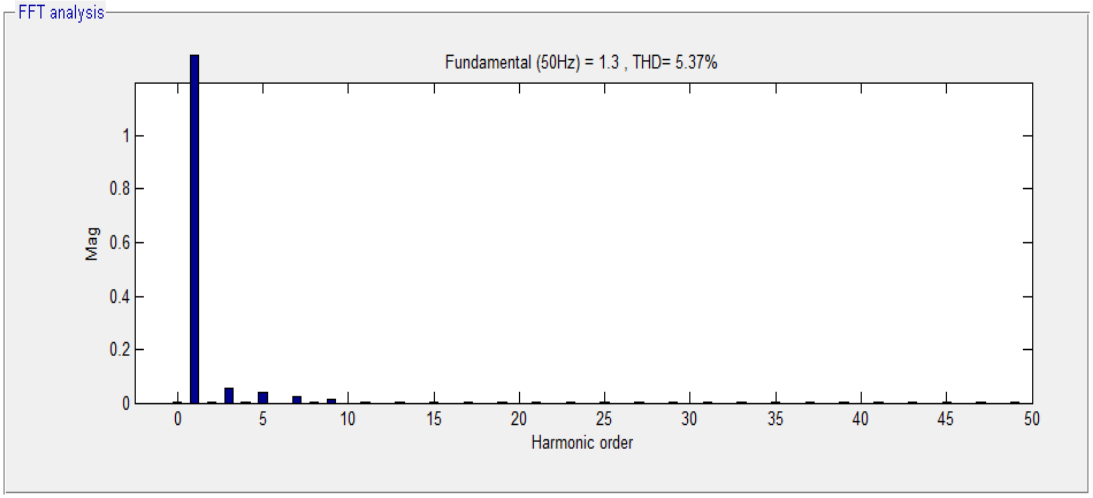


Figure III.18 Le spectre d'harmonique de I_{source} après filtrage.

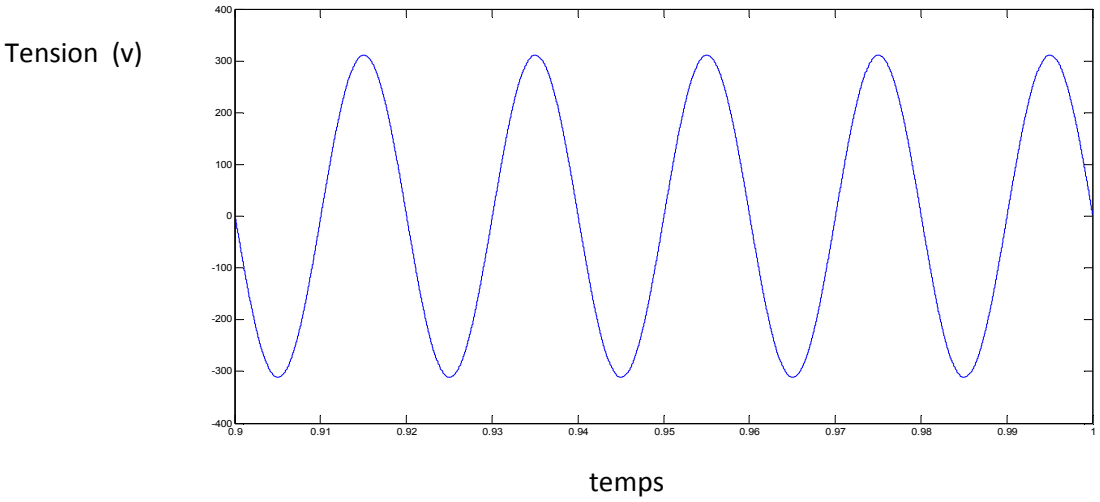


Figure III.19 La courbe de la tension au borne de la charge

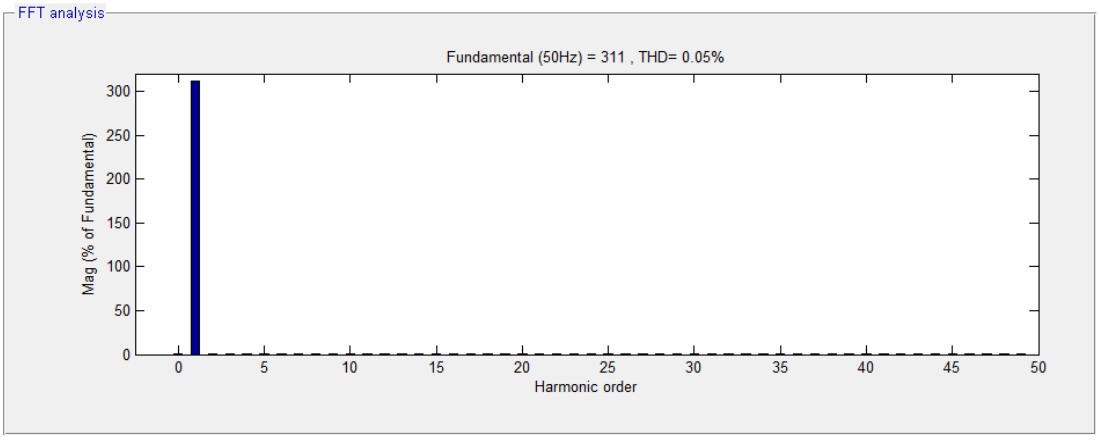


Figure III.20 Spectre de la tension

III.10.2 Résultats de simulation en triphasé:

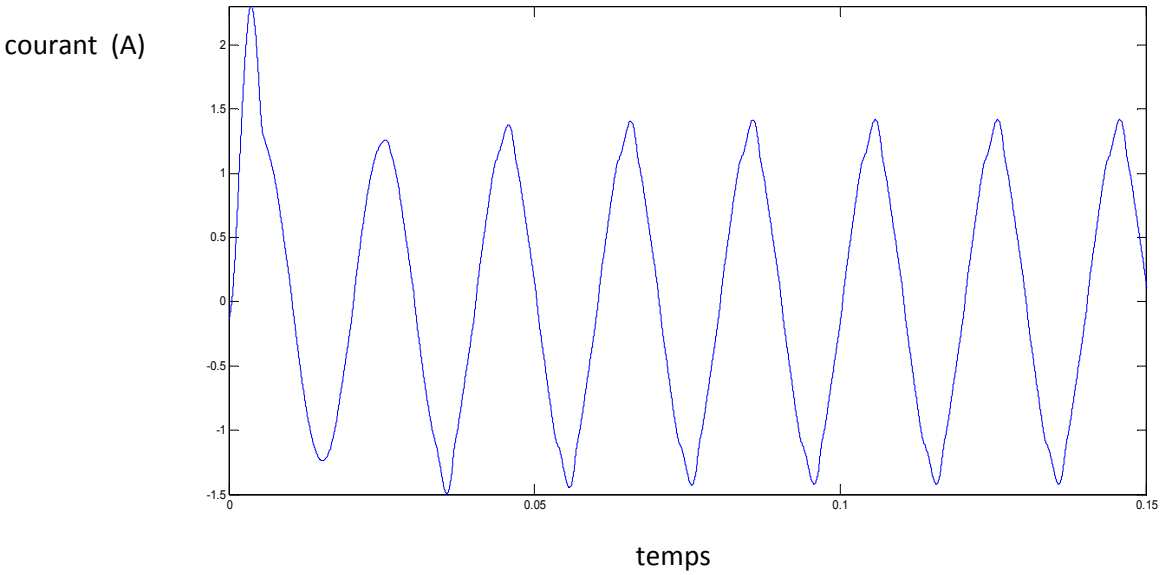


Figure III.21 Courant dans la première phase après filtrage

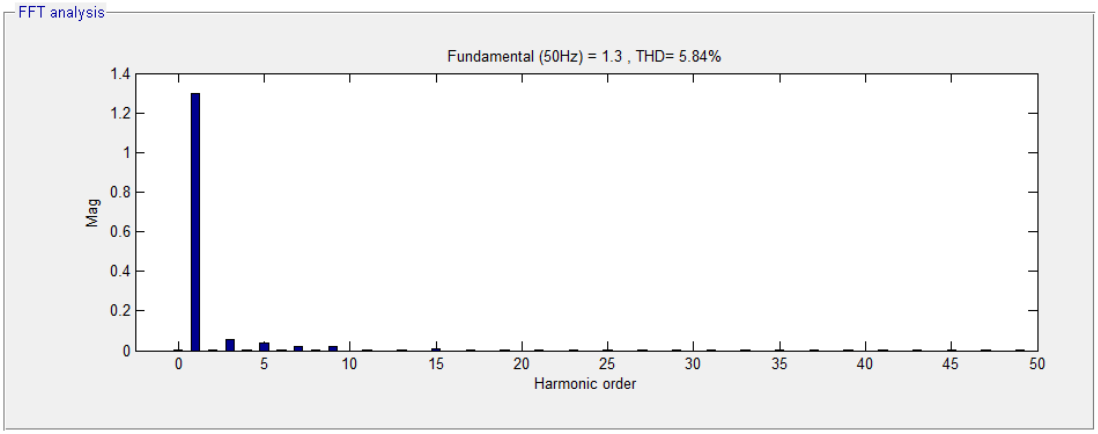


Figure III.22 Spectre du Courant de la première phase après filtrage

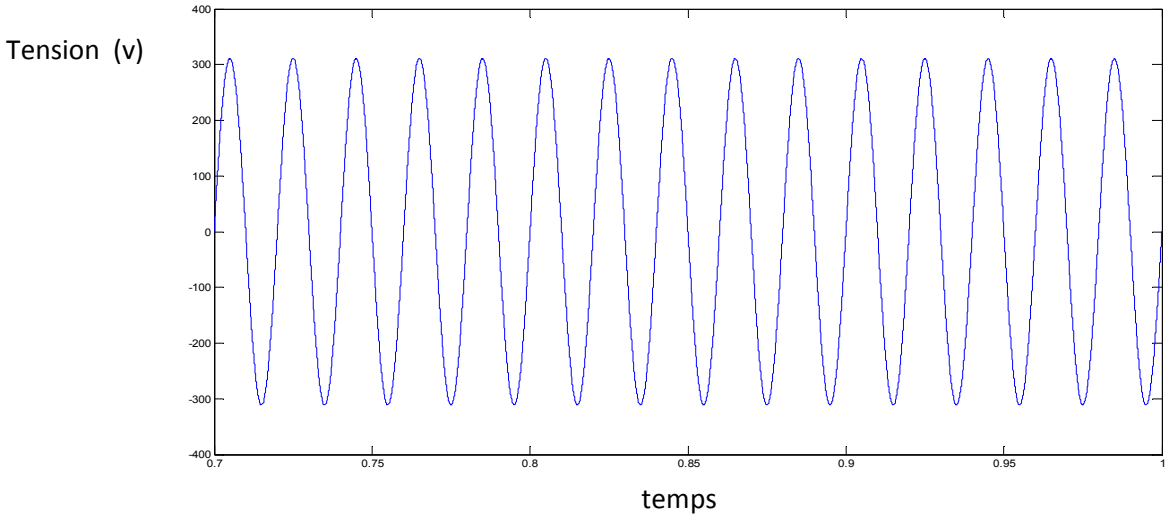


Figure III.23 La tension simple après filtrage

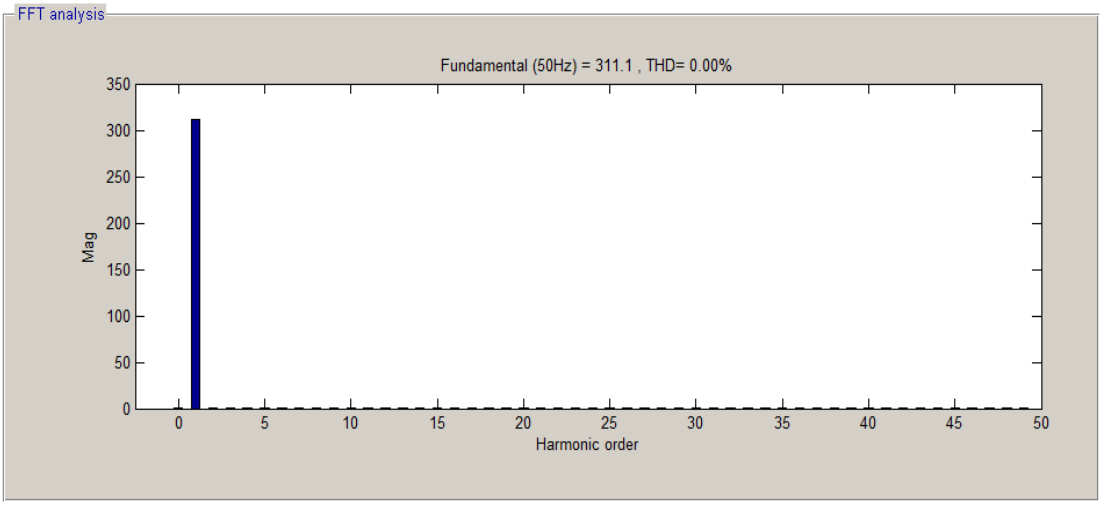


Figure III.24 Spectre de La tension simple après filtrage

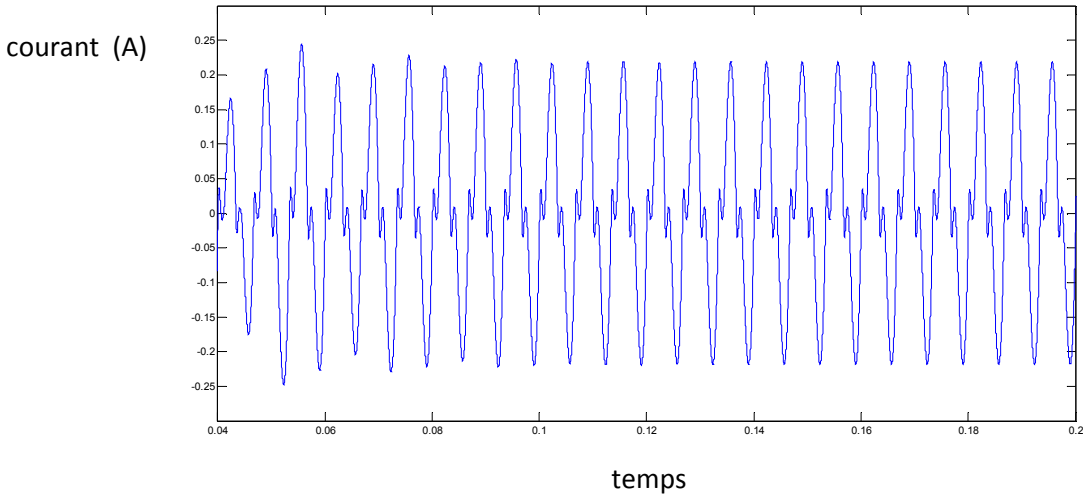


Figure III.25 Le courant dans le neutre

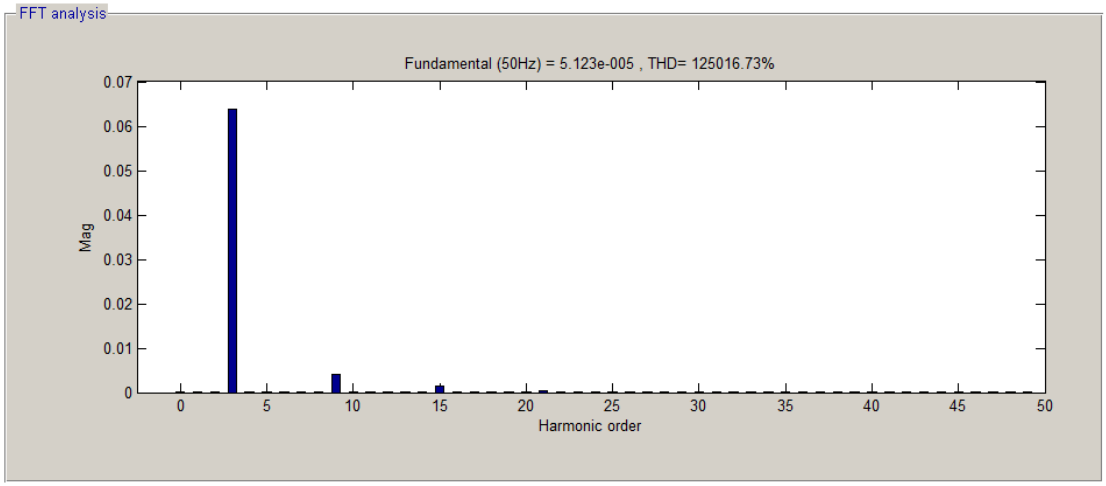


Figure III.26 Spectre du courant dans le neutre

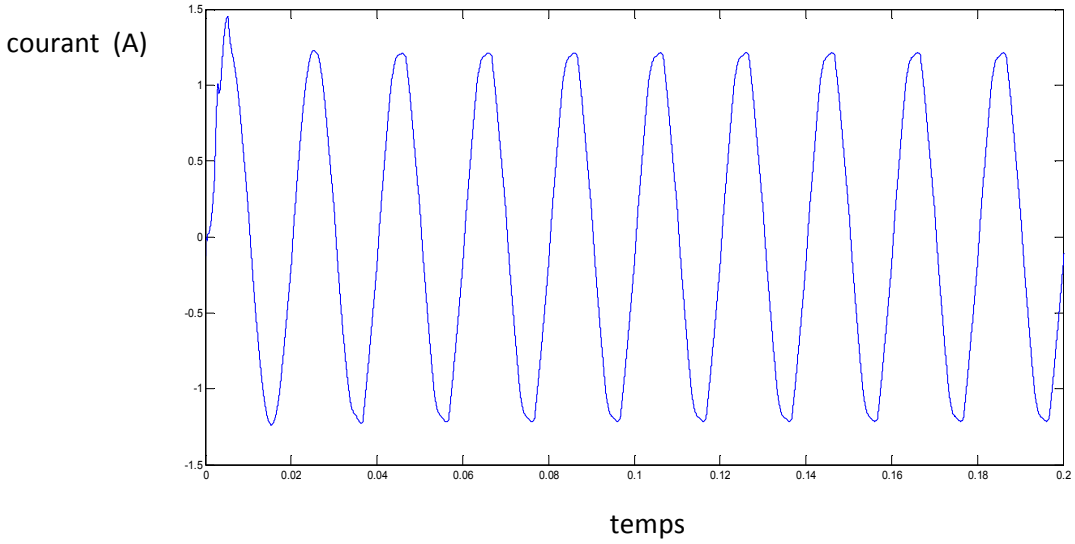


Figure III.27 La forme du courant dans le filtre

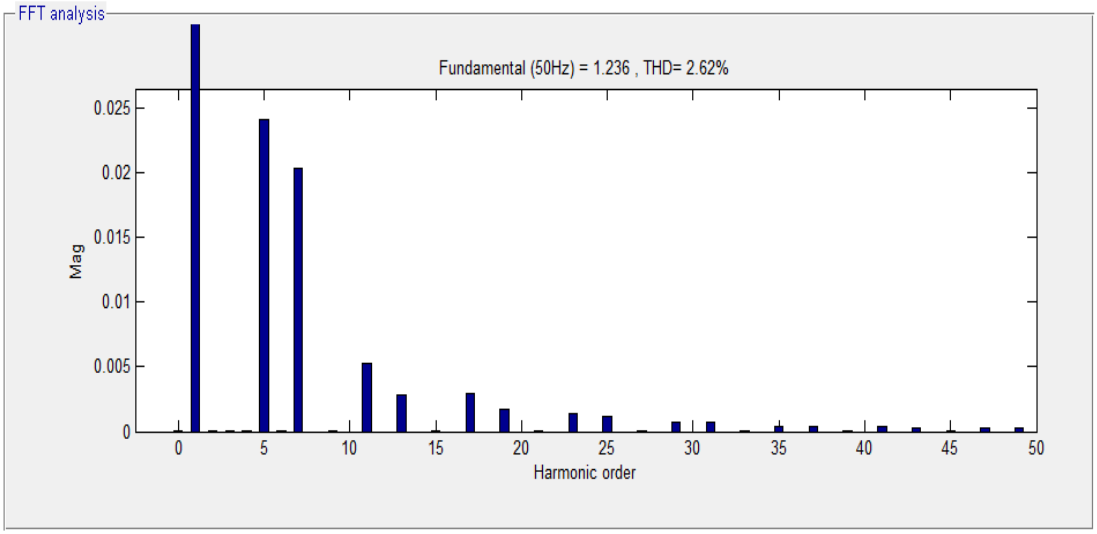


Figure III.28 le spectre du courant dans le filtre

Interprétation des résultats :

D'après les résultats obtenus en simulation , on peut dire que le filtre résonant améliore la qualité de l'onde du courant de source . en d'autres termes le TDH global se réduit de 140% jusqu'à 5.37%, ça pour le monophasé.

Pour le triphasé la forme du courant est amélioré aussi le courant dans le neutre diminue et devient de l'ordre de 10^3 (mA).

III.11 Partie expérimentale :

Dans cette partie on utilise un filtre résonant parallèle (R.L_f.C) avec une bobine de lissage en série (L) comme la figure suivant montre.

Avec :

R= 1.192 KΩ L_f= 0.1 mH C= 3*27 µF

L= 0.9H

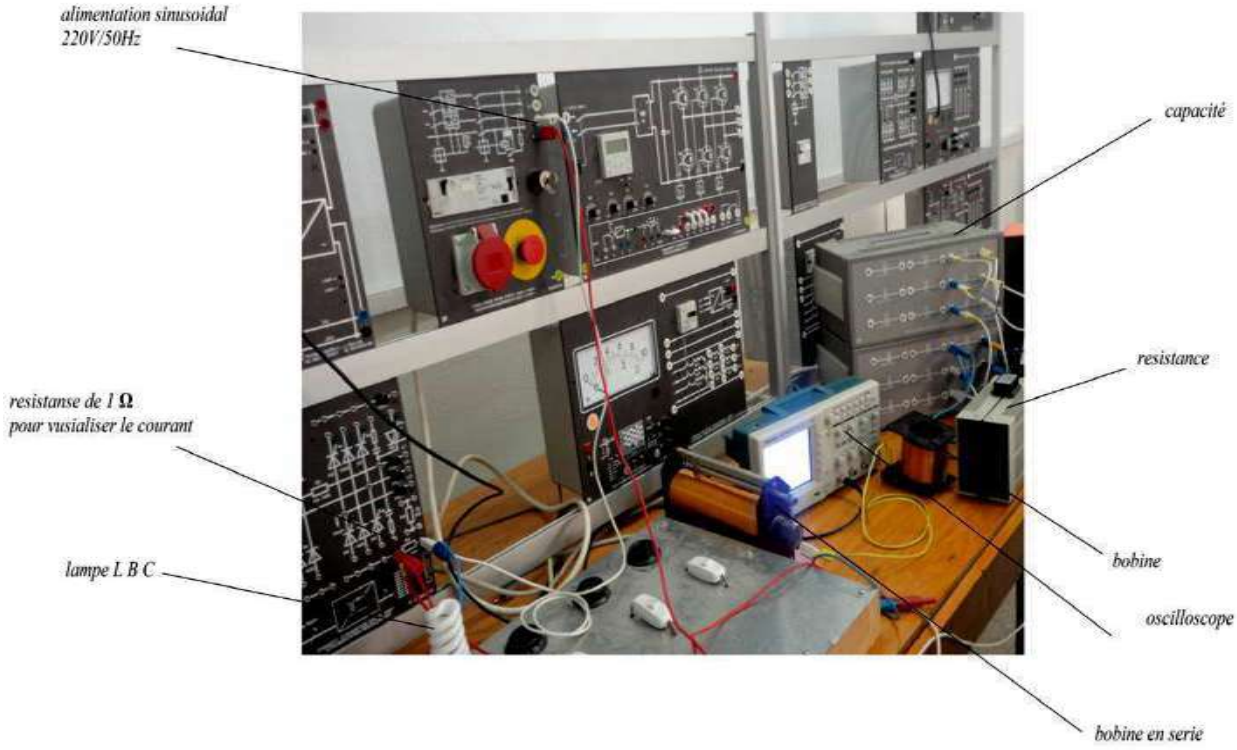


Figure III.28

Représentation du montage réalisé au laboratoire.

Les deux figure suivantes illustre l'allure de courant de source avant et après le filtrage.

- **Sant filtre**

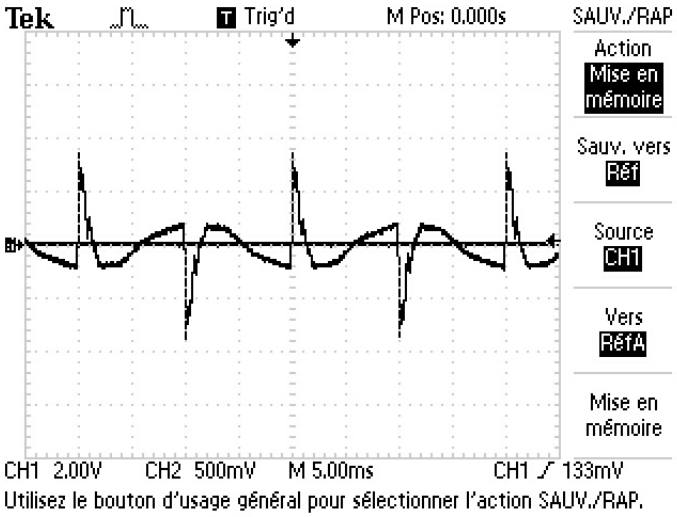


Figure III.29

La courbe de courant de la lampe avant filtrage.

- **Avec filtre**

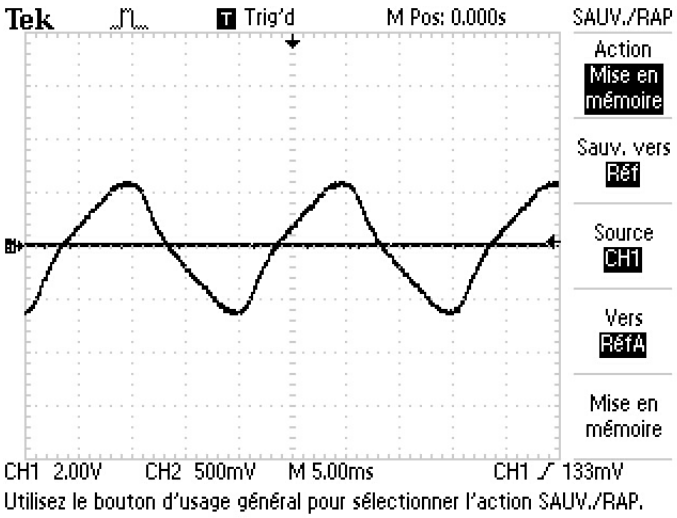


Figure III.30

La courbe de courant de la lampe après filtrage.

$$Is_{eff} = 0.24\ A \qquad \text{(I RMS)}$$

$$I_{filtre} = 0.18\ A \qquad \text{(I RMS)}$$

Interprétation des résultats :

D'après les résultats des essais précédentes on obtient un courant de source plus proche d'une sinusoïde,
mais ce courant s'augmente a cause de la présence du filtre car le filtre consomme 0.18 A et le courant de source prend la valeur 0.24 A.

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons tout d'abord déterminer les harmoniques, l'origine et les effets néfastes sur les équipements électriques ces effets peuvent provoque des échauffement et de la dégradation du fonctionnement de ces équipements.

Le filtrage passif présent quelque inconvénients :

- L'impédance du réseau en présence des filtres peut faire apparaître des résonances.
- Le filtrage passif peut absorber les courants harmoniques d'autres charges non linéaires et dans ce cas, le filtre passif peut être surchargé.
- Le filtrage passif est peu flexible et, en cas de modifications dans le réseau, il peut avoir du mal à s'adapter aux nouveaux besoins du filtrage.

IV.1 Etat de l'art des filtres actifs parallèles :

Dans [1] un état de l'art des filtres actifs de puissance parallèles est présenté. Cette étude a été approfondie et ensuite élargie aux filtres actifs multi-niveaux et aux filtres actifs de moyenne tension.

Même s'il existe des références antérieures sur les filtres actifs , la première famille de filtres actifs parallèles a été conçue à partir d'onduleurs à thyristors commandés en MLI .

Ces filtres ont été développés pour éliminer les harmoniques générés par les convertisseurs utilisés dans les systèmes de transmission de courant continu en haute tension (HVDC).

Toutefois, à cette époque la technologie des interrupteurs d'électronique de puissance ne permettait pas un développement applicatif significatif.

Les années suivantes ont vu des progrès importants avec la commercialisation de composants d'électronique de puissance qui commutent des puissances de plus en plus importantes avec des fréquences de plus en plus élevées. Ainsi, en 1982, le premier filtre actif parallèle de 800kVA, composé d'un commutateur de courant à MLI et thyristors GTO, a été installé pour la compensation d'harmoniques .

Par la suite, de nombreux onduleurs de puissance commandés en MLI ont été développés pour des applications de filtrage actif .En conséquence, les filtres actifs parallèles ont commencé à être commercialisés et installés à travers le monde et surtout au Japon, où en 1996, il y avait plus de cinq cents filtres actifs parallèles installés avec des puissances allant de 50kVA à 2MVA.

Les premiers dispositifs ne compensaient que les perturbations harmoniques de courant. Toutefois, les filtres actifs ont évolué et des prototypes avec des fonctionnalités plus nombreuses ont été conçus. Les filtres actifs modernes, en plus de compenser et amortir les courants harmoniques, compensent les déséquilibres de courant, contrôlent la puissance réactive et le flicker.

Jusqu'à cette époque, tous les filtres actifs parallèles étaient installés par les consommateurs industriels. Néanmoins, l'installation par le distributeur d'énergie de ces dispositifs peut s'envisager.

Au cours de l'année 1997, la topologie multi-niveaux a débuté aussi pour des applications de filtrage actif. un filtre actif avec un onduleur clampé par le neutre est présenté.

Aussi, Dans la même année un filtre actif en utilisant des onduleurs en cascade de 11 niveaux. Les années qui ont suivi ont vu de nombreuses publications sur les filtres actifs multi-niveaux avec différentes topologies.

L'évolution des dispositifs d'électronique de puissance vers des applications à chaque fois plus puissantes est palpable dans le domaine des filtres actifs, quoique à moindre échelle qu'ailleurs. On y constate, de plus en plus, une évolution vers des tensions et des puissances plus élevées, y compris sans transformateur de couplage.

La première référence sur un filtre actif connecté à un réseau de moyenne tension date de 2001. cette référence propose la connexion d'un filtre actif shunt monophasé à l'extrémité d'une ligne de traction de 25kV dans le but de diminuer les harmoniques de tension 3, 5 et 7 au point de connexion du filtre et de fournir de la puissance réactive pour maintenir la tension sur la ligne. Par la suite, une autre thèse propose une étude similaire mais avec un convertisseur de topologie hybride de cinq niveaux. Un bras de ce convertisseur est composé d'un convertisseur clampé par le neutre (NPC) qui utilise des IGBTs et l'autre bras est composé d'un convertisseur à deux niveaux conventionnel à IGCTs.

Une contribution plus récente est consacrée à un filtre actif à base d'onduleurs en cascade connecté à un réseau de 4.16kV avec transformateur. L'auteur constate qu'une Combinaison des semi-conducteurs de puissance élevée et une inductance de filtre réduit en moyenne tension peut être une solution compétitive, au niveau du coût, par rapport aux filtres actifs conventionnels en basse tension.

Néanmoins, à présent, les références liées aux filtres actifs de moyenne tension dans la littérature sont relativement limitées, et on constate plutôt une évolution vers l'utilisation de filtres hybrides pour ce type d'application. En effet, on constate que ces filtres se présentent comme une solution très intéressante pour surmonter les limitations des filtres actifs, surtout en ce qui concerne la montée en tension. [9]

IV.2Introduction :

Ce chapitre sera décomposé en quatre parties. Dans une première partie, nous étudierons la structure générale du filtre actif parallèle, laquelle a été divisée en deux: la partie puissance et la partie contrôle-commande. Dans la partie puissance, nous introduirons les trois principaux blocs de cette structure, à savoir l'onduleur de tension, l'élément de stockage d'énergie et le filtre de sortie. Dans la partie contrôle-commande, nous aborderons les cinq principaux blocs, soit l'identification des courants perturbés, la régulation de la tension continue et du courant du filtre actif parallèle, la commande de l'onduleur

Pour fournir aux consommateurs une bonne qualité de l'énergie électrique, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, les filtres actifs sont proposés comme des solutions avancées de dépollution des réseaux électriques. En effet, ces solutions peuvent s'adapter aux évolutions de la charge et du réseau électrique et ceci sans toucher aux installations du fournisseur d'énergie et du consommateur.

IV.3Filtrage actif :

L'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors GTO et les transistors IGBT, a permis d'envisager de nouvelles solutions de compensation des perturbations des réseaux électriques. Les filtres actifs constituent une alternative intéressante aux solutions classiques. Flexibles car auto-adaptatifs, ils viennent s'ajouter à des structures déjà existantes de convertisseurs. Ils peuvent également être utilisés comme complément aux solutions traditionnelles de dépollution. Le rôle d'un filtre actif est de compenser en temps réel les perturbations, en tout ou en partie, présentes dans les réseaux électriques.

- Le filtrage actif parallèle ou appelé compensateur actif :

Le filtrage actif constitue aujourd'hui une solution plus sophistiquée que le filtrage passif, bénéficiant des technologies les plus performantes et constamment améliorée par les constructeurs.

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau, comme le montre la figure (IV.1), injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux a ceux absorbes par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant coté réseau est alors sinusoïdal. Ainsi l'objectif du filtre actif parallèle consiste à empêcher les courants perturbateurs (harmoniques et réactifs), produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif

Les filtres actifs parallèles de puissance sont composés d'un onduleur connecté au réseau à travers d'un filtre de nature inductive. Ils sont connectés avec ou sans transformateur en parallèle avec le réseau comme le montre la Figure (IV.1) :

Les filtres actifs parallèles, à part pour compenser certains harmoniques, ont aussi d'autres possibles fonctionnalités :

- Contrôle de la puissance réactive
- Equilibrage des charges

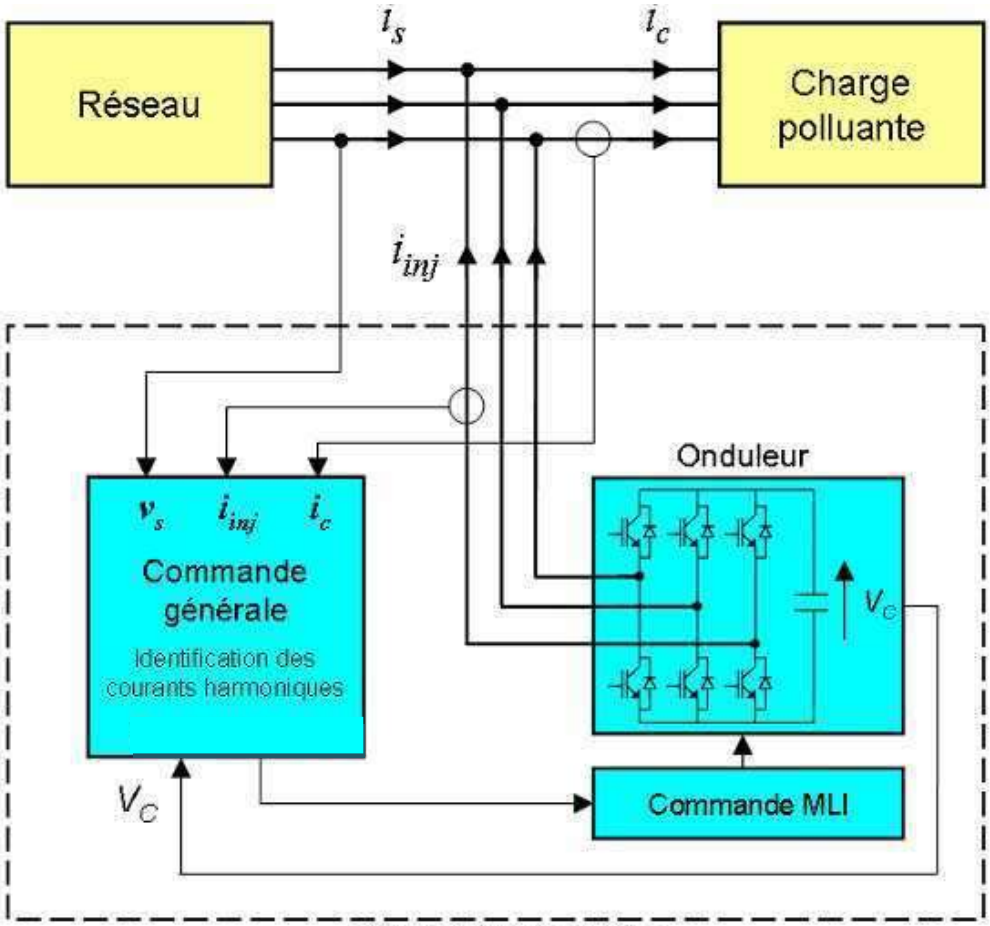


Figure IV.1 filtre active parallèle

IV.4 Topologie générale :

La structure générale du filtre actif parallèle est représentée dans la Figure (IV.2), laquelle se présente sous la forme de deux blocs :

la partie puissance et la partie commande.

La partie puissance est constituée :

- d'un onduleur de tension à base d'interrupteurs de puissance, commandables à l'amorçage et au blocage (GTO, IGBT, ...etc.) avec des diodes en antiparallèle,
- d'un circuit de stockage d'énergie, souvent capacitif,
- d'un filtre de sortie.

La partie commande est constituée :

- de la méthode d'identification des courants perturbés,
- de la régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie.
- de la régulation du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension
- de la commande de l'onduleur de tension.

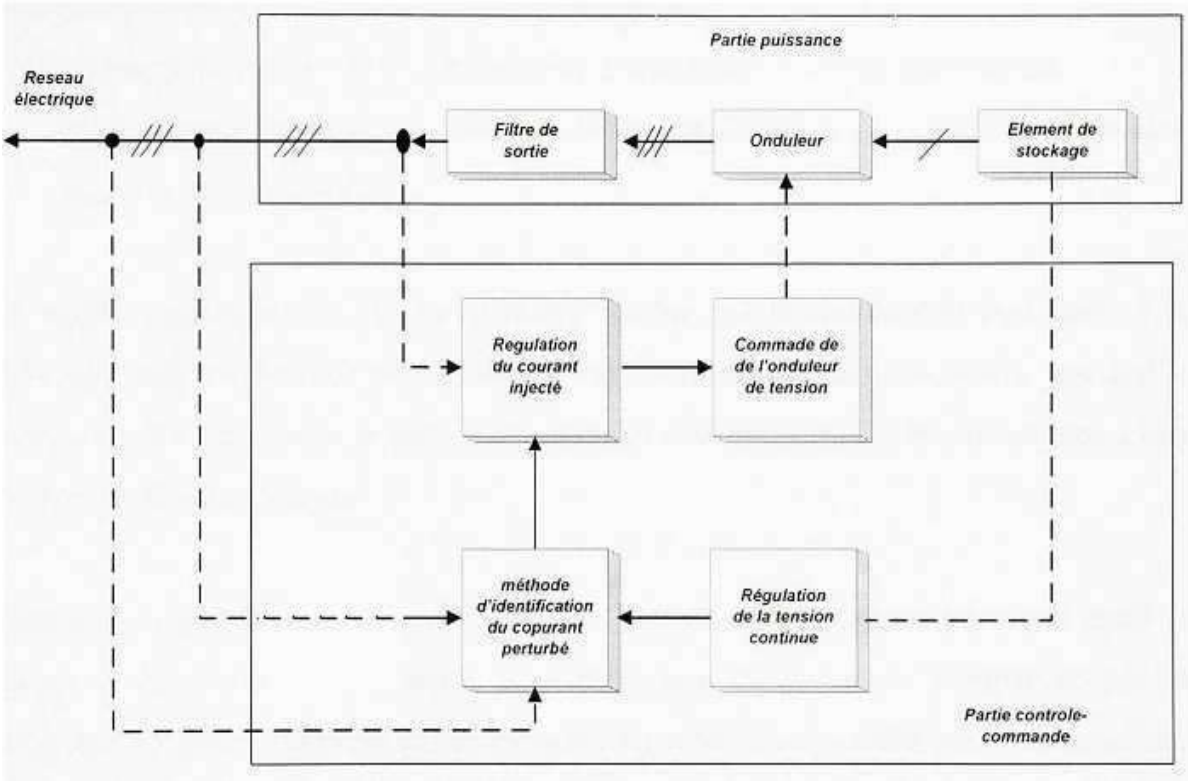


Figure IV.2 Structure générale du filtre actif

IV.5 Classement des filtres actifs parallèles :

Il existe une grande variété de types de filtres actifs parallèles. Ils sont classés de différentes manières selon le nombre de phases, la technologie de l'onduleur et la topologie .

- Filtres actifs monophasés ou triphasés.
- Filtres actifs avec ou sans neutre raccordé.
- Filtres actifs basés sur l'onduleur de tension ou sur le commutateur de courant.

Même si les filtres actifs monophasés ont été largement étudiés dans la littérature les applications industrielles, ce sont les filtres actifs triphasés qui sont les plus répandus (pour des applications de type variateurs ou rédresseurs à dépolluer) du fait que les filtres monophasés sont normalement limités aux applications en basse puissance (les redresseurs des sources d'alimentation en continu), sauf dans le cas de la traction électrique .

La deuxième classification se fait autour de la topologie utilisée, avec ou sans neutre raccordé.

Les filtres actifs avec neutre raccordé ont été développés afin de pouvoir injecter et compenser les composantes homopolaires. Dans la littérature la plupart des filtres sont connectés sans neutre raccordé. Toutefois, on trouve plusieurs filtres avec neutre raccordé : certains avec un onduleur à trois bras et d'autres avec un onduleur à quatre bras .

En ce qui concerne la technologie de l'onduleur, les filtres actifs sont soit basés sur l'onduleur de tension avec un condensateur côté du continu et un filtre de raccordement inductif du côté réseau, soit sur un commutateur de courant avec une inductance du côté continu et un filtre de raccordement capacitif du côté du réseau (voir Figure IV.3).

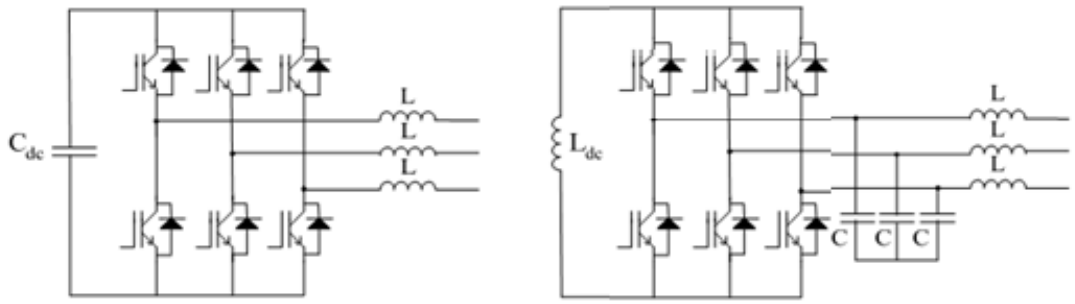


Figure IV.3

Filtre actif basé sur un onduleur de tension (à gauche)

et sur un commutateur de courant (à droite).

Actuellement, même si l'on trouve des articles basés sur le commutateur de courant , l'onduleur de tension est généralement préféré à cause de son meilleur rendement, de son moindre coût et de son volume plus réduit (si l'on compare le condensateur et l'inductance du côté continu). Par ailleurs, les modules à IGBTs disponibles actuellement sur le marché sont bien adaptés aux onduleurs de tension car en général une diode en anti-parallèle est rajoutée pour chaque IGBT. Le commutateur de courant a quant à lui besoin de mettre en série avec chaque IGBT une diode anti-retour. De plus, un aspect vient clore provisoirement le choix : le commutateur de courant ne peut pas être utilisé avec des topologies multiniveaux classiques . En conséquence, presque tous les filtres actifs qui sont sur le marché sont composés d'onduleurs de tension .

Ainsi, le choix le plus commun dans la plupart des applications consiste à utiliser un filtre actif triphasé basé sur un onduleur de tension sans neutre raccordé.

IV.5.1 Le filtre actif série

Les filtres actifs séries injectent une tension, sur le réseau, qui est ajoutée à la tension de source pour maintenir une tension purement sinusoïdale aux bornes de la charge.

Le but est de protéger les installations sensibles à toutes perturbations de la tension fournie par le réseau.

Cependant, le filtrage actif série ne permet pas de compenser les harmoniques de courant crées par la charge.

Le principe des filtres actifs séries est montré en Figure IV.4

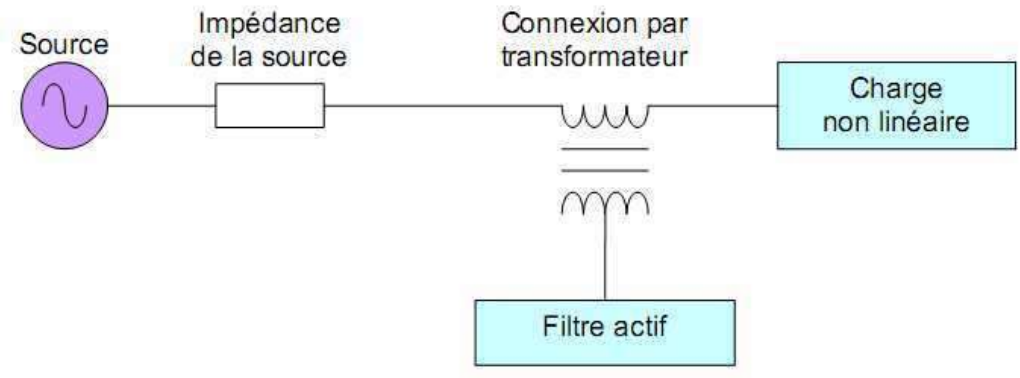


Figure IV.4 Le principe des filtres actifs séries

IV.5.2 Filtre Actif Parallèle (FAP)

Cette classe de filtre constitue la configuration la plus largement répandue dans les procédés industriels. Le filtre est connecté au circuit principal de puissance comme montré dans la Figure

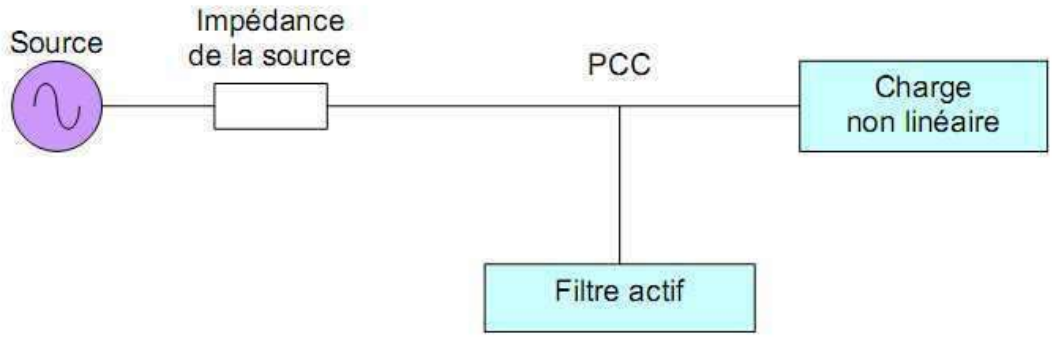


Figure IV.5

Le principe des filtres actifs parallèles

Le filtre actif parallèle injecte dans le réseau les harmoniques de courant consommés par la charge de telle sorte que le réseau ne fournisse plus que le courant fondamental comme on peut le voir sur la Figure(IV.6)

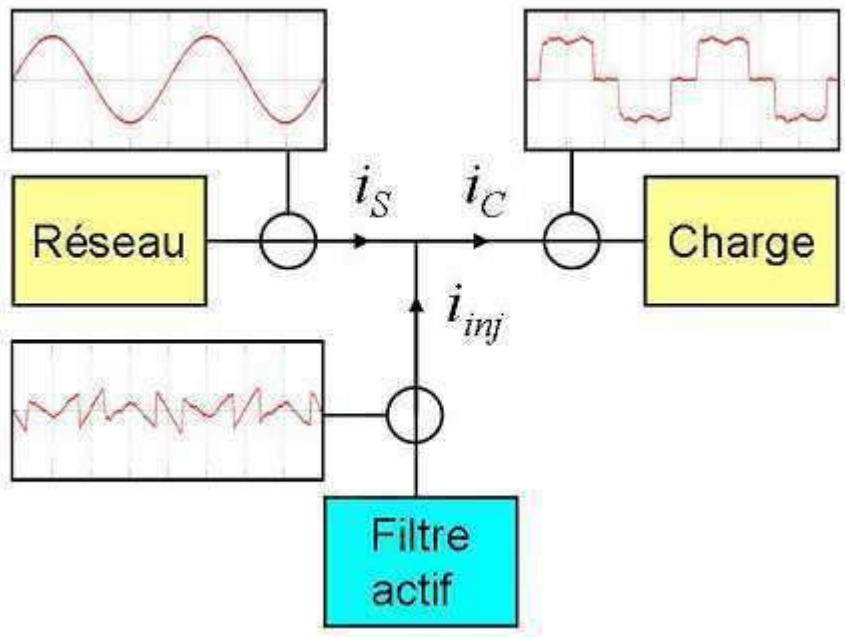


Figure IV.6 Visualisation des courants mis en jeu

Le but de ce type de filtre est d'annuler les harmoniques de courant que la charge fournit à la source. Il peut également contribuer à la compensation de la puissance réactive et équilibrer les 3 phases du courant. Les filtres actifs parallèles ont l'avantage d'apporter seulement le courant de compensation et un peu du fondamental du courant fournit pour compenser les pertes du système. Il est aussi possible de connecter plusieurs filtres en parallèle pour approvisionner des courants importants, ce qui rend ce type de circuit adapté pour une large gamme de puissance.

IV.5.3 Structures hybrides :

Afin de réduire le dimensionnement et par conséquent le prix des filtres actifs, l'association de filtres actifs de faible puissance à des filtres passifs peut être une solution.

Dans ce cas, les filtres passifs ont pour rôle d'éliminer les harmoniques prépondérants permettant de réduire le dimensionnement des filtres actifs qui ne compensent que le reste des perturbations.

Des structures hybrides ont été développées pour combiner les effets des FAS et des FAP. Ces structures permettent à la fois de compenser la tension de charge et le courant du réseau indépendamment.

1. Combinaison de filtres actifs parallèles et séries :

Pour obtenir les avantages des filtres actifs parallèles et séries, une combinaison des 2 types de filtres, montré en Figure(IV.7), peut être utilisé pour atteindre les exigences fixées pour un certain circuit de puissance.

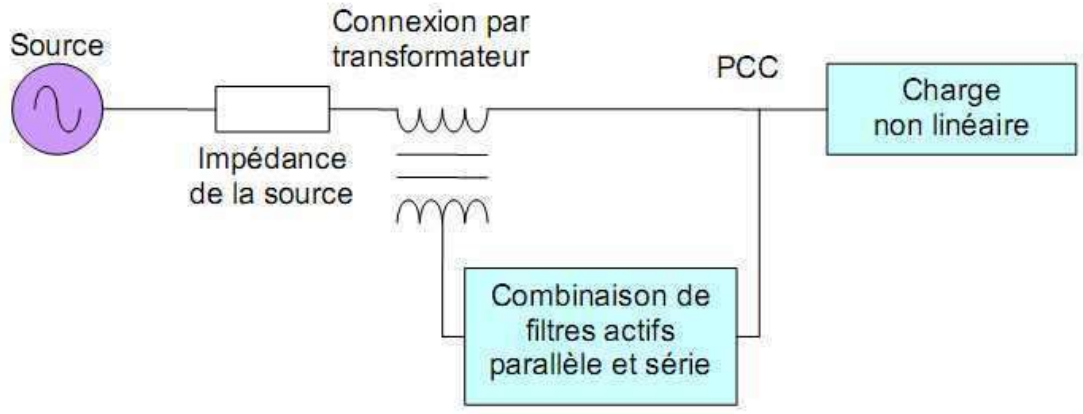


Figure IV.7

Combinaison de filtres actifs parallèle et série

La demande pour ces filtres combinés est limitée à cause de la complexité à les contrôler et de leurs coûts élevés. La complexité du contrôle est due à la dépendance du système de découpage à la fois au circuit parallèle et au circuit série. Par

conséquent, ce type de filtre a reçu moins d'attention que les autres configurations existantes.

2. Combinaison de filtres actifs séries et de filtres passifs parallèles :

Pour réduire la complexité de la combinaison de filtres présentée précédemment, le filtre actif série, qui constitue une haute impédance pour les harmoniques de hautes fréquences, est accompagné par un filtre passif parallèle. Cette combinaison, représentée par la Figure(IV.8) , permet une amélioration sur les caractéristiques d'un ensemble de filtres actifs et l'extension de leurs capacités à inclure la réduction des harmoniques de courant et l'élimination des harmoniques de tension. Cette configuration n'a cependant pas encore été étudiée profondément du fait d'un manque d'intérêt pour les filtres actifs séries.

Il empêche les courants harmoniques de circuler vers le réseau et les oblige à passer par les filtres passifs raccordés à leurs fréquences.

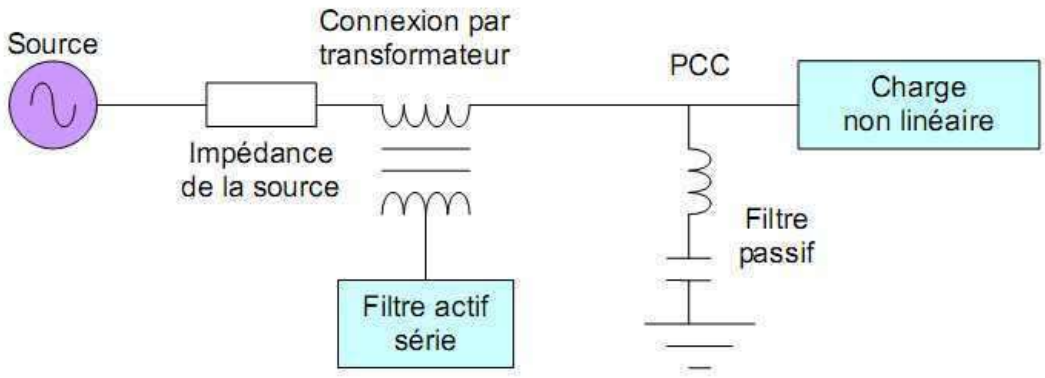


Figure IV.8

Combinaison d'un filtre actif série et d'un filtre passif parallèle

3. Combinaison de filtres parallèles actifs et passifs :

Cette combinaison, montrée en Figure est constituée d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif parallèle. Le filtre actif est conçu pour éliminer seulement les harmoniques de courants d'ordres faibles pendant que le filtre passif est conçu pour éliminer l'ensemble des harmoniques du courant de charge. Avec de telles combinaisons, le système peut-être conçu pour de hautes puissances sans excès de coûts pour le découpage à hautes puissances.

Le principal défaut de cette technique est qu'elle contient trop de composants de puissance, en particulier pour le filtre passif. Puisque les filtres passifs sont connectés ont permanence au système, cette approche est seulement adaptée pour une charge unique avec une source d'harmonique prédéfinie.

Il a le rôle de compenser des courants harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante. Le filtre passif accordé sur une fréquence élevée, élimine les harmoniques hautes y compris ceux crées par le filtre actif parallèle. Ce type déjà été appliqué à la compensation des courants harmonique émis par un cycloconvertisseur de forte puissance.

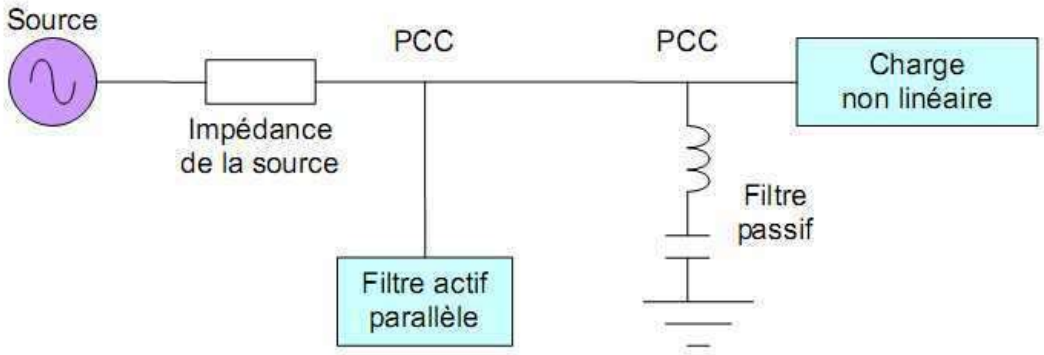


Figure IV.9

Combinaison de filtre actif parallèle et de filtre passif parallèle

4. Combinaison d'un filtre actif en série avec des filtres passifs parallèles :

Cette configuration, montrée en Figure est importante pour les applications avec des tensions moyennes ou élevées où le filtre passif réduit la tension accentuée par le découpage dans le filtre actif. Pour cette raison, ce concept est très prometteur pour les applications avec de hautes tensions. Cependant, d'autres recherches sont nécessaires pour confirmer l'efficacité de la configuration.

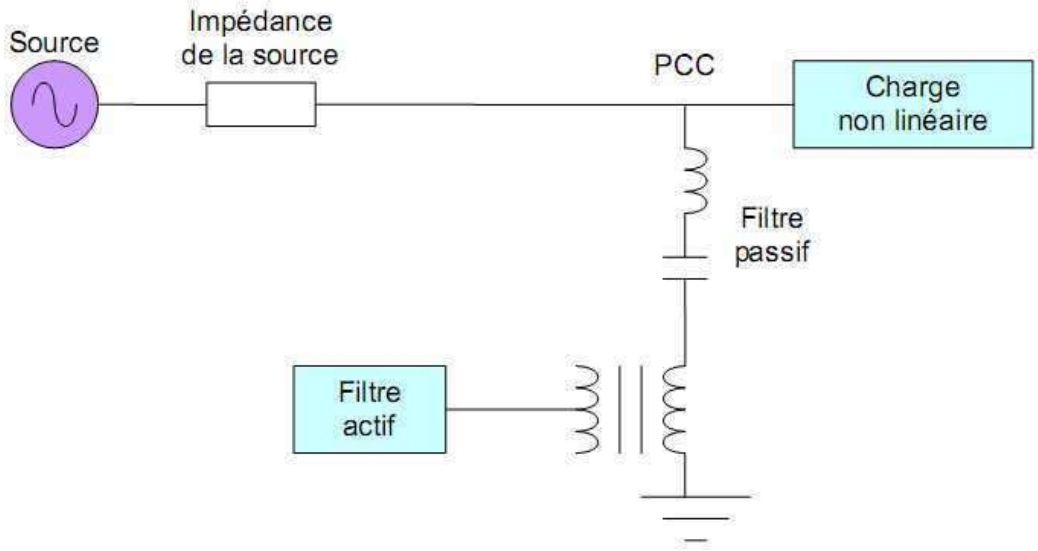


Figure IV.10

Combinaison d'un filtre actif en série avec un filtre passif parallèle

La mise en œuvre de telles structures est plus complexe et demande plus de matériel, pour des performances qui n'égalent pas forcément celles d'un FAS ou d'un FAP pris séparément.

Il a le même principe que la combinaison d'avant avec l'avantage de réduire encore le dimensionnement du FAS car le courant qui le travers est plus faible. De plus, le FAS est à l'abri d'un éventuel court-circuit de la charge.

Les avantages des filtres actifs parallèles sont les suivants :

- Ils peuvent être installés avec des coûts de développement et d'installation minimaux et sont très bien adaptés aux charges industrielles de puissances apparentes faibles à moyennes.
- Ils ne créent aucun problème de déplacement du facteur de puissance.
- Ils ne nécessitent pas de condensateurs de découplage à la sortie de l'onduleur.
- Plusieurs filtres peuvent être utilisés pour augmenter les capacités de charge.
- Les filtres actifs parallèles ne nécessitent pas d'appareil de protection coûteux.

Les principaux défauts des filtres actifs parallèles sont :

- Les filtres actifs parallèles peuvent poser des problèmes pour la compensation à des niveaux de puissances élevés.
- Les onduleurs MLI génèrent des harmoniques qui peuvent circuler dans des filtres passifs qui seraient connectés au système.

Ainsi pour cette étude c'est le FAP qui a été retenu car il répond principalement à la problématique des harmoniques de courant qui est la plus cruciale actuellement, tout en restant simple à mettre en œuvre et offre de très bonnes performances.

En effet le est au centre des recherches des deux dernières décennies sur le filtrage actif et les références traitant de FAP sont extrêmement nombreuses, en particulier sur les sources telles que la revue IEEE et sa publication dédiée à l'électronique industrielle. Il est également évolutif et permet d'implémenter de nouvelles stratégies à partir de la même structure matérielle.[6]

IV.6 Identification des courants harmoniques et commande du Filtre Actif :

Les méthodes d'identifications déterminent les perturbations qui agissent sur le courant, laquelle identification servira à générer les références nécessaires aux régulateurs. Les perturbations les plus fréquentes affectant les courants dans un système triphasé sont les déséquilibres et la distorsion de la forme d'onde. Une boucle externe d'identification des perturbations du courant est utilisée. La sortie de

cette boucle est l'entrée de la boucle interne de contrôle (référence de courant ou de puissance).

IV7.Classification des méthodes d'identification :

La qualité du filtrage réside dans l'efficacité de la méthode utilisée pour l'identification des courants harmoniques. Les méthodes d'identification sont classées en deux roupes : « méthodes du domaine fréquentiel et méthode du domaine temporel ».

- **Méthodes du domaine fréquentiel**

Les méthodes du domaine fréquentiel utilisent l'analyse de Fourier (la transformée discrète, la transformée rapide, la transformée discrète récursive, etc.) pour identifier les harmoniques de courant . Ces méthodes sont bien adaptées aux charges où le contenu harmonique varie lentement. Par ailleurs, elles ont l'avantage d'identifier les harmoniques individuellement : elles permettent donc une compensation sélective.

Néanmoins, les inconvénients les plus importants de ces méthodes sont des résultats moyens en régime transitoire et un volume de calcul et une allocation de mémoire très considérables.

- **Méthodes du domaine temporel**

Les méthodes du domaine temporel permettent une réponse plus rapide et requièrent moins d'opérations que les méthodes précédentes. Le principe de ce type de méthodes est séparation du fondamental ou de certains harmoniques du reste des harmoniques par filtrage.

Les méthodes les plus importantes sont:

- La théorie P-Q de la puissance instantanée .
- Algorithme du Repère de Référence Synchronisé (SRF) .
- Algorithme de la détection synchronisée (SDA) .
- Algorithme Fryze-Bucholz Depenbanck (FBD) .
- La méthode sinusoïdale Généralisée de Fryze (SGF) .
- La méthode basée sur le courant actif .
- La méthode tri-monophasée .
- La méthode basée sur la régulation de la tension continue.

IV.8 Comparaison entre les méthodes d'identification des courants harmoniques

La méthode de la théorie (P-Q) a l'avantage d'être assez simple pour la mettre en application sous forme analogique puisqu'elle a besoin seulement des opérations de multiplication et de filtrage simple.

L'inconvénient le plus évident de la méthode (P-Q) est qu'elle s'exécute mal dans des conditions non équilibrées de tension d'alimentation, parce que l'algorithme suppose que les tensions d'alimentation sont sinusoïdales et équilibrées.

Un avantage de la méthode SRF est qu'elle s'exécute bien avec n'importe qu'elle forme d'onde du courant. Un inconvénient est que l'algorithme est assez complexe et exige un circuit PLL pour fonctionner correctement.

Dans la méthode SDA, l'exécution est bonne pour les conditions de la tension d'alimentation en cas de déséquilibre. Un inconvénient de cette méthode est qu'elle suppose que les courants dans chaque phase sont égaux, ou la charge est équilibrée.

Tableau IV.1

Comparaison entre les méthodes d'identification des harmoniques.

La méthode	Analogique	Numérique	Avantages	Inconvénient
Théorie P-Q	Oui	Oui	Simple	Bonne pour des tensions sinusoïdales uniquement.
SRF	Non	Oui	Utilisé pour une source déséquilibré avec/sans distorsion	Exige un circuit PLL.
SDA	Oui	Oui	Utilisé pour une source déséquilibré.	Suppose que les courants dans les phases sont équilibrés.
SGF	non	Oui	Utilisé pour une source déséquilibré avec/sans distorsion	Exige un circuit PLL.

Les performances de la méthode basée sur le principe du courant actif et la méthode des puissances instantanées sont parfaitement identiques, car ces deux méthodes sont en effet deux implantations différentes d'un même algorithme.

Les trois méthodes (courant actif, P-Q, et tri-monophasé) permettent la compensation des harmoniques et/ou du fondamental réactif, mais la méthode basé sur la régulation de la tension continu n'est envisageable que dans le cas où le filtrage compense automatiquement les courants harmoniques et le fondamental actif.

Du point de vue implantation, la méthode basée sur le courant actif est complexe.

L'algorithme d'identification des méthodes régulation de la tension continu, tri-monophasé et P-Q est plus simple que la méthode basée sur le courant actif.

Toutefois, des nouvelles méthodes apparaissent en se basant sur des réseaux de neurones et sur le calcul de produit de convolution et de corrélation entre signaux.

La méthode d'identification des courants harmoniques P-Q a une souplesse incomparable, un temps de réponse réduit et une implantation simple pour retourner au régime sinusoïdal [9].

D'après ces comparaisons (Tableau IV.1) on va opter à l'utilisation de la méthode P-Q pour l'identification des courants harmoniques pour la commande du filtre actif.

Méthode des puissances instantanées

Cette méthode d'identification des courants harmoniques, plus simple, consiste à éliminer la composante continue des puissances active et réactive instantanées ce qui est relativement facile à réaliser [9].

On exploite la transformation de Concordia pour obtenir les puissances active et réactive et nécessite de tensions sinusoïdales à la fréquence fondamentale. On note respectivement les vecteurs des tensions simples au point de raccordement [Vs] et des courants de charge [ic] d'un système triphasé et équilibré par :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix} \quad \text{(IV.1)} \quad \text{et} \quad [I_c] = \begin{bmatrix} I_{c1} \\ I_{c2} \\ I_{c3} \end{bmatrix} \quad \text{(IV.2)}$$

La transformation des valeurs triphasées instantanées de la tension et du courant dans le repère des cordonnées $\alpha - \beta$ est donnée par les expressions suivantes :

$$\begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix} \quad \text{(IV.3)}$$

Et pour les courants :

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c1} \\ i_{c2} \\ i_{c3} \end{bmatrix} \quad \text{(IV.4)}$$

Les puissances réelle et imaginaire instantanées, notées respectivement P et q, sont définies par la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} P \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & V_{s\beta} \\ -V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} \quad \text{(IV.5)}$$

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

$$P = V_{s\alpha} i_{c\alpha} + V_{s\beta} i_{c\beta} = V_{s1} i_{c1} + V_{s2} i_{c2} + V_{s3} i_{c3} \quad \text{(IV.6)}$$

De même, pour la puissance imaginaire on a :

$$q = V_{s\alpha} i_{c\beta} - V_{s\beta} i_{c\alpha} = -\frac{1}{\sqrt{3}}[(V_{s1} - V_{s2}) i_{c3} + (V_{s2} - V_{s3}) i_{c1} + (V_{s3} - V_{s1}) i_{c2}] \quad \text{(IV.7)}$$

A partir de l'expression (IV.), En posant :

$$\Delta = {V_{s\alpha}}^2 + {V_{s\beta}}^2 \quad \text{(IV.8)}$$

On a

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ q \end{bmatrix} \quad \text{(IV.9)}$$

Ou alors :

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \left\{ \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ q \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} i_{c\alpha p} \\ i_{c\beta q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{c\alpha q} \\ i_{c\beta q} \end{bmatrix} \quad \text{(IV.10)}$$

Avec :

$$\left.\begin{aligned} i_{c\alpha p} &= \frac{V_{s\alpha}}{\Delta} P \qquad i_{c\beta p} = \frac{V_{s\beta}}{\Delta} P \\ i_{c\alpha q} &= -\frac{V_{s\beta}}{\Delta} q \qquad i_{c\beta q} = \frac{V_{s\alpha}}{\Delta} q \end{aligned}\right\} \quad \text{(IV.11)}$$

Les puissances instantanées selon les axes α et β peuvent s'écrire :

$$\begin{bmatrix} P_\alpha \\ P_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s\alpha} . i_{c\alpha} \\ v_{s\beta} . i_{c\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s\alpha} . i_{c\alpha p} \\ v_{s\beta} . i_{c\beta p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{s\alpha} . i_{\alpha q} \\ v_{s\beta} . i_{c\beta q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{\alpha p} \\ P_{\beta p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_{\alpha q} \\ P_{\beta q} \end{bmatrix} \quad \text{(IV.12)}$$

$$P_{\alpha p} = \frac{{V_{s\alpha}}^2}{\Delta} P \qquad \text{(IV.13)}$$

$$P_{\beta p} = \frac{{V_{s\beta}}^2}{\Delta} P \qquad \text{(IV.14)}$$

$$P_{\alpha q} = -\frac{V_{s\alpha} V_{s\beta}}{\Delta} q \qquad \text{(IV.15)}$$

$$P_{\beta q} = -\frac{V_{s\alpha} V_{s\beta}}{\Delta} q \qquad \text{(IV.16)}$$

$P_{\alpha p}$: Puissance instantanée active selon l'axeα .

$P_{\beta p}$: Puissance instantanée active selon l'axe β .

$P_{\alpha q}$: Puissance instantanée réactive selon l'axeα .

$P_{\beta q}$: Puissance instantanée réactive selon l'axe β .

D'après les expressions (IV.9) et (IV.12), on peut écrive :

$$\mathrm{P} = P_{\alpha p} + P_{\beta p} + P_{\alpha q} + P_{\beta q} \qquad \text{(IV.17)}$$

L'analyse de l'équation (IV.10) nous ramène aux conclusions suivantes :

La somme des puissances instantanées et coïncide avec la puissance instantanée dans un circuit triphasé.

La puissance réactive correspond à la partie de la puissance instantanée qui dépend de q.

Ces puissances et s'annulent entre elles et elles n'apportent aucune contribution au transfert de puissance instantanée entre la source et la charge. Dans le cas où les tensions sont sinusoïdales et alimentent une charge non linéaire, les puissances instantanées P et ont pour expression :

$$\begin{cases} \mathrm{P} = \overline{\mathrm{P}} + \widetilde{\mathrm{P}} \\ q = \bar{\mathrm{q}} + \tilde{\mathrm{q}} \end{cases} \qquad \text{(IV.18)}$$

Avec :

$\overline{\mathrm{P}}$: puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant.

$\bar{q}$: puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant.

$\tilde{P}$ et $\tilde{q}$: puissance alternatives liées à la somme des composantes harmoniques du courant.

En considérant les équations IV. 10 IV18. .nous pouvons séparer le courant dans le repère (α-β) en trois composantes active et réactive à la fréquence fondamentale et la somme des harmoniques .ceci conduit à :

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{\Delta}\begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \bar{P} \\ 0 \end{bmatrix}}_{\text{courant active}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta}\begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix}}_{\text{courant réactive}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta}\begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \tilde{P} \\ \tilde{q} \end{bmatrix}}_{\text{courant harmoniques}} \quad \text{(IV.19)}$$

Il est évident, d'après la relation (IV.19), que pour identifier une des trois composantes, par exemple les courants harmoniques, les parties alternatives des puissances réelle et imaginaire doivent être séparées des parties continues. Cette séparation peut être réalisée en utilisant l'un des deux méthodes de filtrage illustré sur la figure II.1.

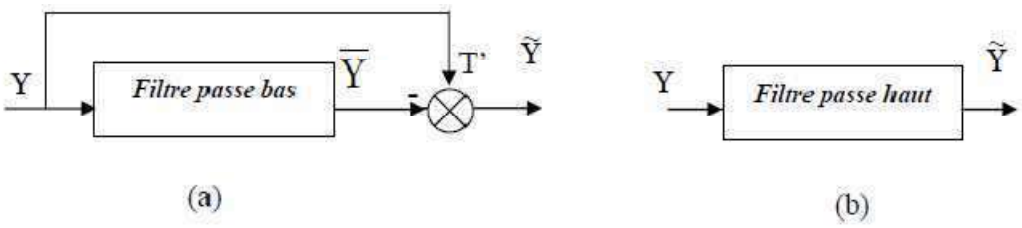


Figure IV.11

Schéma de principe des filtres utilisés pour l'extraction

des composantes alternatives de P et q.

Les courant harmoniques triphasés $i_{ck,h}$ (k=1,2,3) sont obtenues à partir des courants biphasés $i_{c\alpha}$ et $i_{c\beta}$ par la transformation inverse de Concordia soit :

$$\begin{bmatrix} i_{c1,h} \\ i_{c2,h} \\ i_{c3,h} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_{c\alpha,h} \\ i_{c\beta,h} \end{bmatrix} \qquad \text{(IV.20)}$$

Si **V** et $\mathbf{I}_1$ représentent respectivement les valeurs efficaces de la tension et du courant fondamental et , $\boldsymbol{\varphi}_1$ le déphasage entre eux, alors on peut écrire :

$$\begin{cases} \bar{P} = 3V\, I_{c1}\cos\boldsymbol{\varphi}_1 \\ \bar{q} = -3V\, I_{c1}\sin\boldsymbol{\varphi}_1 \end{cases} \qquad \text{(IV.21)}$$

Les termes $\overline{P}$ et $\bar{q}$ sont respectivement équivalent à la puissance active conventionnelle et à la puissance réactive conventionnelle.

De cette manière ,éliminer les courants harmoniques revient à compenser les composantes alternatives $\tilde{P}$ et $\tilde{q}$. La suppression des courants réactifs revient à compenser la composante continue $\bar{q}$.

. **Algorithme d'identification**

Le schéma de la figure IV.12 illustre les différentes étapes permettant l'obtention des composantes harmoniques du courant d'une charge non linéaire [9].

Schéma bloque

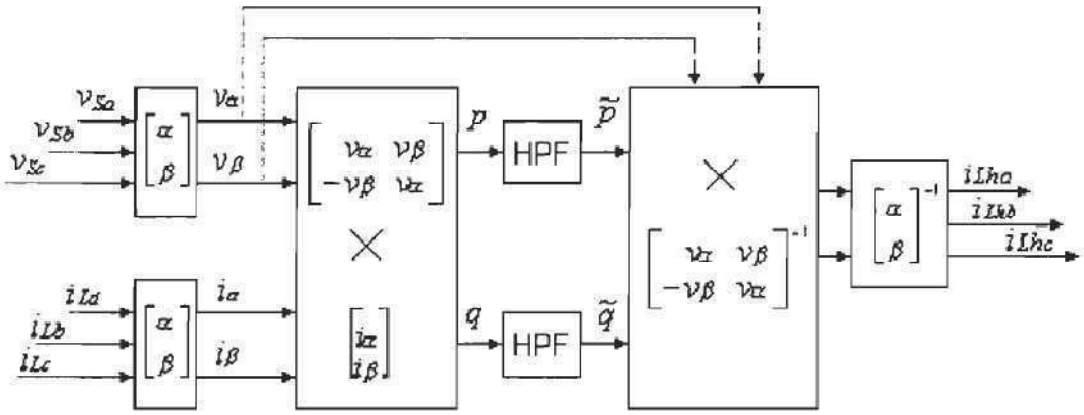


Figure IV.12

L'algorithme de l'identification sous forme d'un schéma bloque.

La théorie P-Q présentée auparavant est valable uniquement pour les systèmes triphasés dépourvus de composante homopolaire. L'extraction des courants des harmoniques dans des applications monophasées ne peut pas être réalisée par cette méthode. Elle est applicable dans le cas où les tensions Vs123 sont déformées, à condition de filtrer les ondulations présentées sur le module du vecteur

IV.9 Commande du filtre actif :

Les dispositifs de l'électronique de puissance capables de générer des formes d'ondes souhaitées pour compenser les harmoniques sont les onduleurs à commutation rapide. Comme dans le cas des applications industrielles (variateur de vitesse, alimentation de secours….), deux structures électrotechniques s'affrontent, du moins en théorie, l'onduleur de tension et l'onduleur commutateur de courant.

La structure tension a fait l'objet de nombreux travaux de recherche . La structure courant n'a pas été considérée avec le même intérêt à cause de considérations économiques. Le schéma synoptique de base d'un filtre actif parallèle que se soit à structure tension ou à structure courant est donné sur la figure(IV.13).

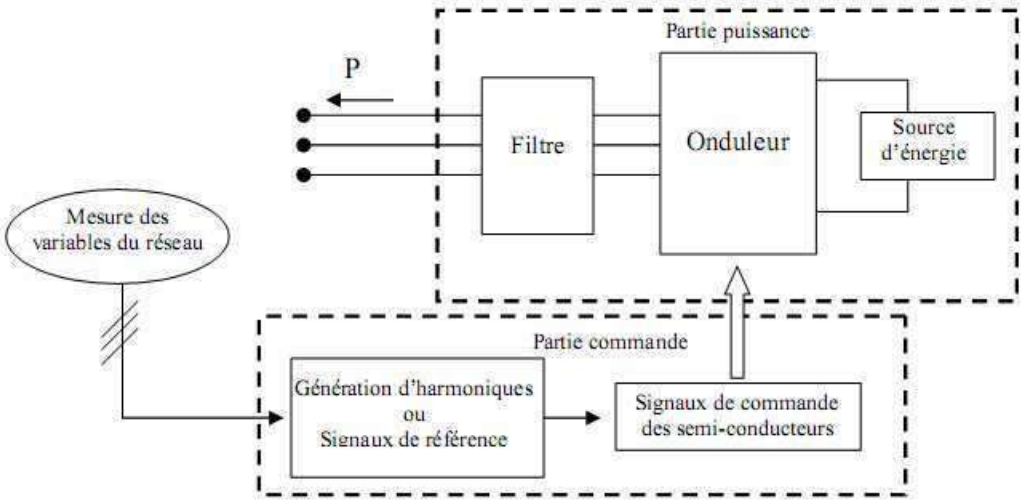


Figure IV.13

schéma synoptique d'un filtre actif parallèle

On va présenter le principe de fonctionnement et de commande d'un filtre actif triphasé de type tension. On s'intéresse à l'étude du circuit de puissance d'un filtre actif à base d'onduleur de tension ainsi que son dimensionnement et nous traiterons le contrôle de courant de sortie du filtre actif.

- **Configuration du filtre actif à structure tension**

On peut distinguer différentes réalisations d'un filtre actif parallèle à structure tension pour un réseau triphasé.

1. filtre actif avec trois onduleurs monophasés
2. filtre actif avec onduleur triphasé à quatre bras,
3. filtre actif avec un onduleur triphasé à trois bras.

La troisième configuration est la plus répandue. Dans ce cas, la compensation des courants harmoniques dans le réseau se fait par le contrôle des courants des trois phases de l'onduleur. Cette configuration est préférable du moins pour le filtrage actif parallèle, car elle présente les avantages suivants :

- Un nombre minimum de semi-conducteurs.
- Un seul élément de stockage coté continu avec un faible dimensionnement.

- **Description du filtre actif**

Le schéma du circuit de puissance d'un filtre actif parallèle à structure tension est donné sur la figure IV.14 On y distingue trois éléments :

- un onduleur de tension
- un filtre de découplage (sortie)
- un élément de stockage capacitif(c)

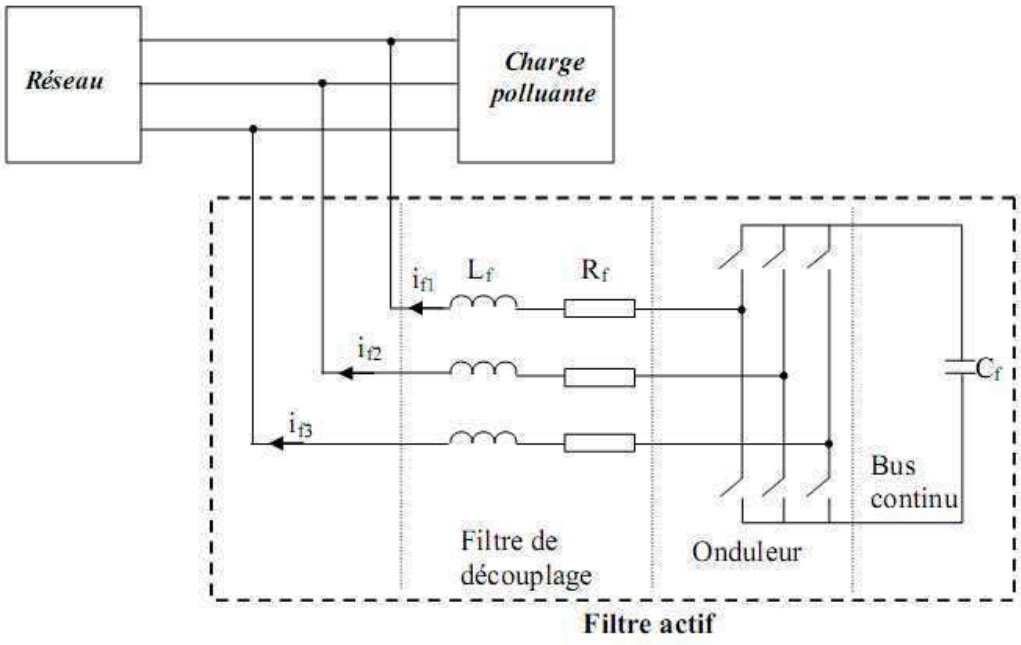


Figure IV.14

Schéma de puissance d'un réseau avec filtre actif à structure tension

- **L'onduleur de tension**

Notre étude sera basée sur un onduleur triphasé à trois bras (Figure IV.15)

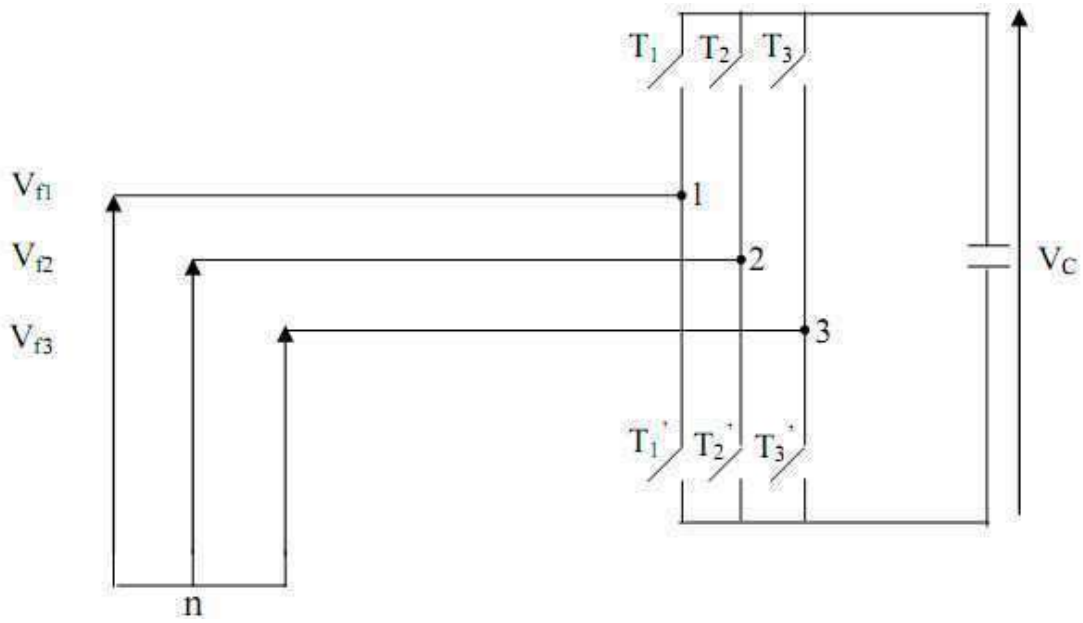


Figure IV.15

Onduleur triphasé à structure tension

Le stockage de l'énergie se fait dans un condensateur qui joue le rôle d'une source de tension continue. La fluctuation de la tension de condensateur doit être faible afin de ne pas dépasser la limite en tension des composants de puissance et afin d'éviter la perte de commutation des courants générés par le filtre actif.

En considérant les différents états des interrupteurs, on peut déduire l'ensemble des tensions délivrées par l'onduleur pour la configuration triphasée étudiée. Appelons Tk et Tk' les interrupteurs idéaux, connectés sur la phase k (k=1, 2, 3). Ck et Ck' sont les commandes logiques qui leurs sont associées. La commande est supposée alternée

IV.9.1Contrôle des courants du filtre actif

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

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

L'objectif de la commande, que se 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. [9]

- **Commande par hystérésis**

Cette commande est très adaptée pour les organes ayant une action à deux positions comme c'est le cas ici, l'IGBT peut être soit ouvert ou bloqué, cette commande consiste à changer la polarisation de la tension de sortie de l'onduleur de telle sorte à maintenir le courant dans une bande centrée autour de la référence, la dimension de ce filtre se résume à fixer la largeur de cette bande. Une règle pratique consiste à la prendre à 5% du courant nominal. Cependant elle ne garantie pas d'une manière systématique le respect de la fréquence de commutation maximale des semi-conducteurs [8].

Le schéma synoptique de la commande des courants du filtre actif par des régulateurs à hystérésis est donné par la figure (IV.16) :

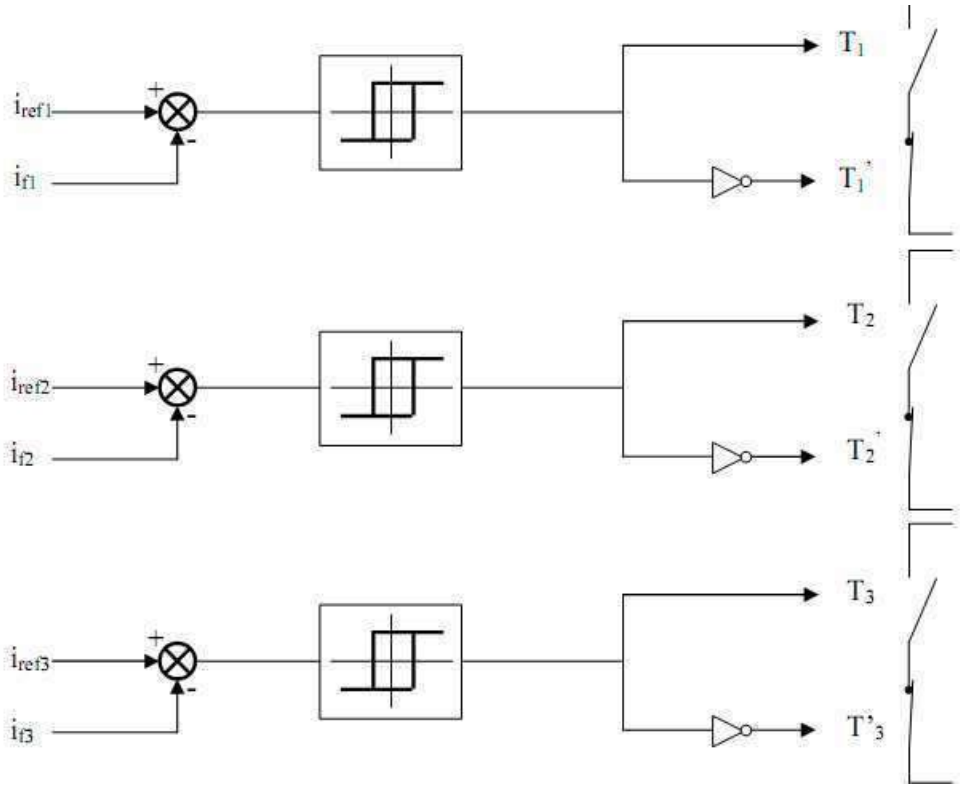


Figure IV.16

Schéma synoptique de la commande des courants du filtre actif par des régulateurs à hystérésis.

- **Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)**

Afin de contourner les problèmes précédents, nous introduirons une deuxième famille de commande de l'onduleur : la commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI). La technique de commande par MLI 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.17).

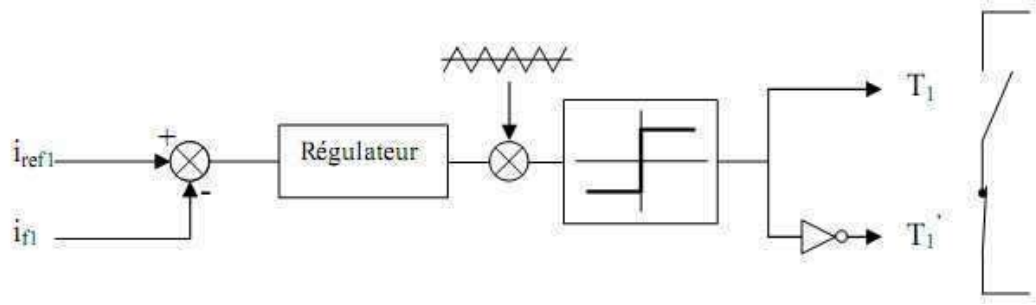


Figure IV.17

Principe de commande des courants par MLI

Les signaux logiques C qui en résultent donnent l'ordre de commutation des interrupteurs du filtre (Figure IV.18)

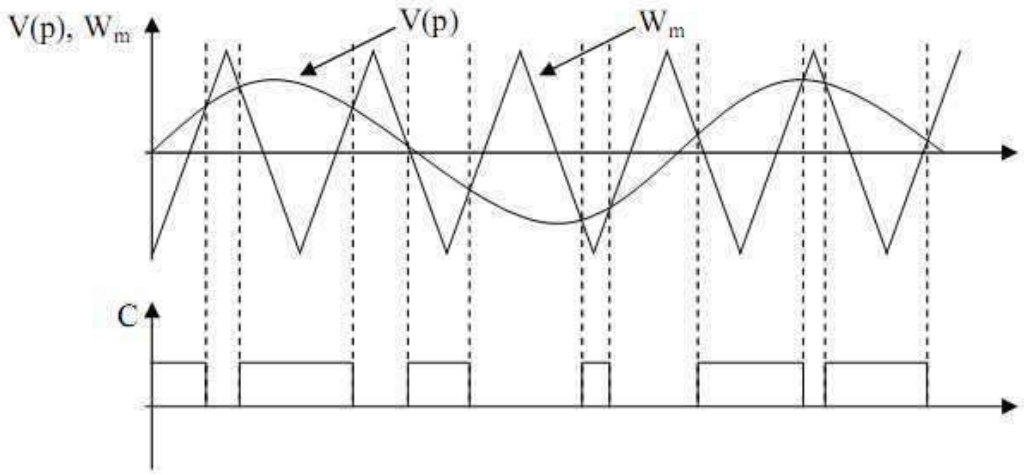


Figure IV.18

Répartition des commutations sur un bras d'un onduleur.

Remarque :

La méthode de la théorie pq a l'avantage d'être assez simple pour la mise en application sous forme analogique puisqu'elle à besoin seulement des opérations de multiplication, division et de filtrage simple.

L'inconvénient le plus évident de la méthode PQ est qu'elle s'exécute mal dans des conditions non équilibrées de tension d'alimentation, parce que l'algorithme suppose que les tensions d'alimentation sont équilibrées et sinusoïdales.

IV.10 Partie de simulation :

la structure générale d'un filtre actif parallèle sous matlab-simulink (simpower system)

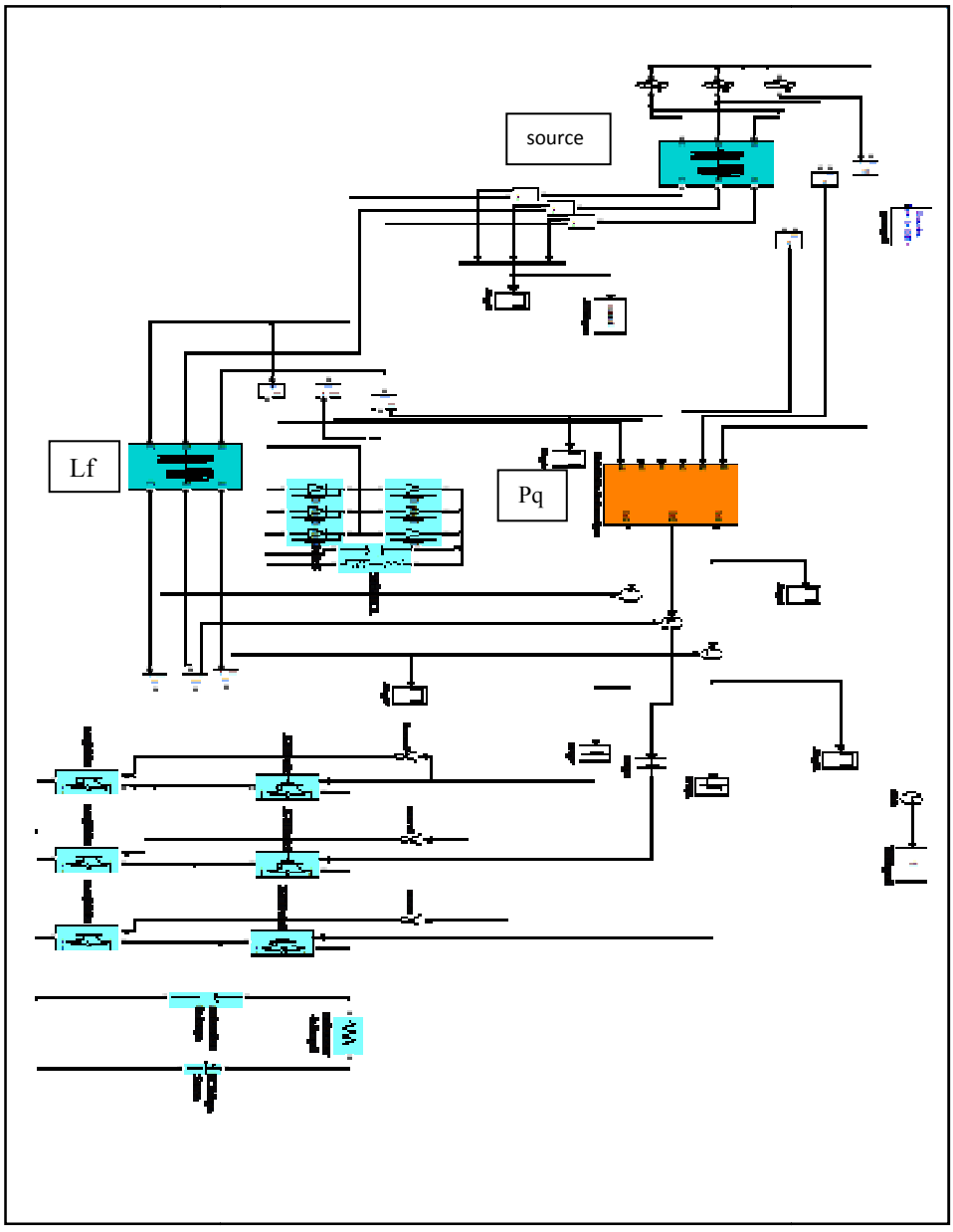


Figure IV.19 Schéma global sous matlab-simulink du f.a.p

IV.10.1 Les paramètre du filtre :

On utilise un onduleur triphasé avec **: VDc 800 V**

Et une capacité de **C= 30 µF**

L' Impédance de sortie **Lf= 1.28 mH + rf= 0.001 Ω**

La bande d'hystérésis est de **$2*10^{-2}$**

IV.10.2 IDENTIFICATION DES COURANTS PERTURBES :

la méthode des puissances instantanées (PQ)

Le courant de référence pour la compensation des harmoniques identifié par la méthode des puissances instantanées **(PQ)** est représentée sous matlab-simulink

Dans la figure suivante :

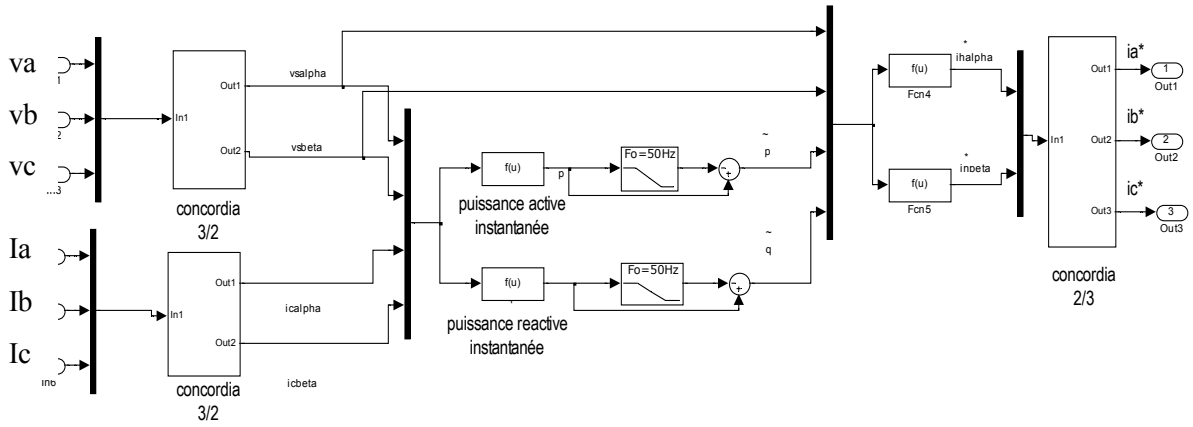


Figure IV.20 Méthode **pq** sous Matlab-simulink

IV.10 .3 Résultats de simulation

- **Avant le filtrage :**

Le courant de la charge polluante (absorbé du réseau)

La charge polluante (pont de graitz +RL) est alimentée par un système triphasé et équilibré de tension efficace de 220V, représenté sur la figure IV.21

Avec :
R= 17 Ω
L=3 mH

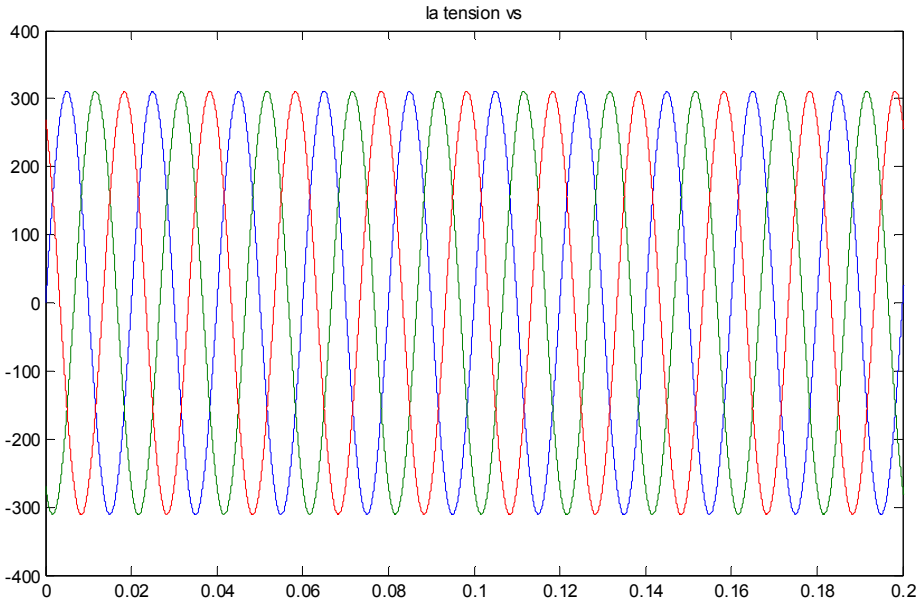


Figure IV.21 Les tensions du réseau d'alimentation.

Le courant triphasé absorbé par cette charge est représenté sur la figure suivante

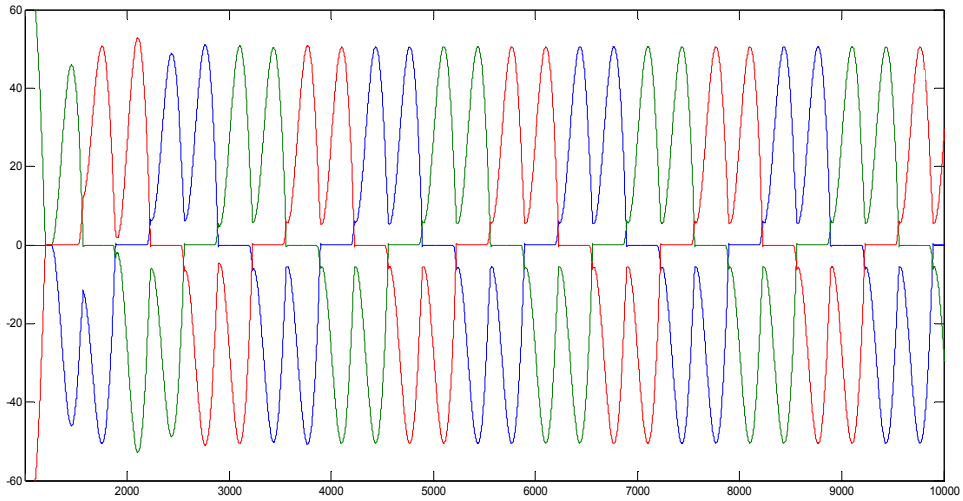


Figure IV.22 Courant absorbé par la charge polluante (en triphasé).

Le spectre d'harmonique du courant de source est représenter dans la figure suivante :

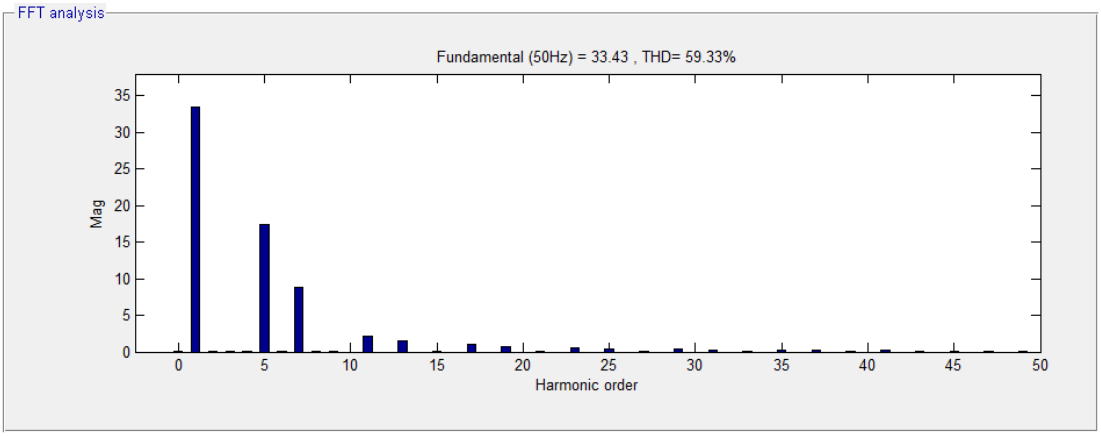


Figure IV.23

Spectre harmonique de is

- **Apres filtrage**

Le courant de référence identifié par la méthode des puissances instantanées est représenté dans la figure

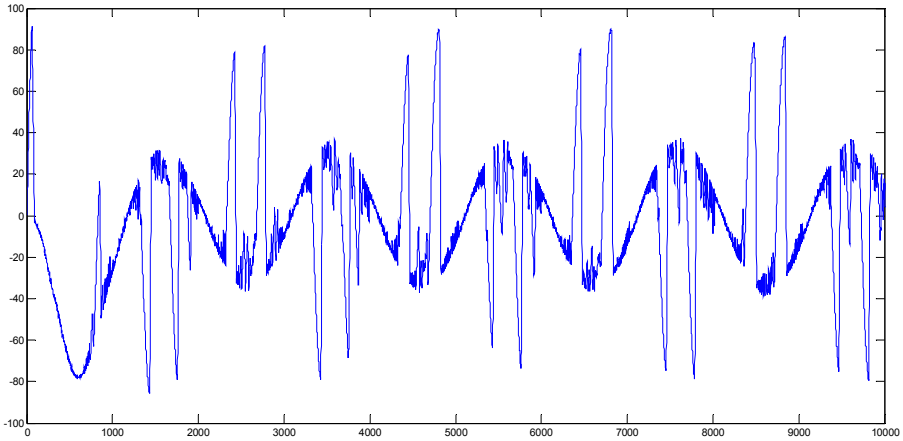


Figure IV.24 Figure Les courants de référence triphasés

Le courant de filtre est représenté dans la figure suivante :

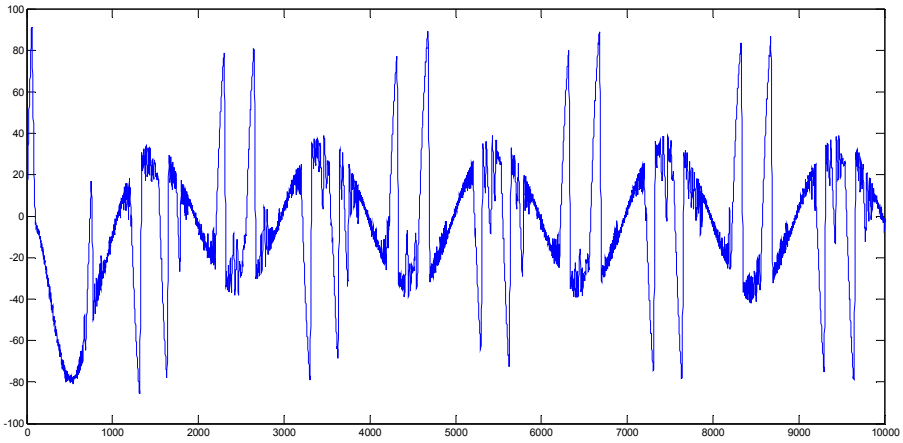


Figure IV.25 Le courant de filtre

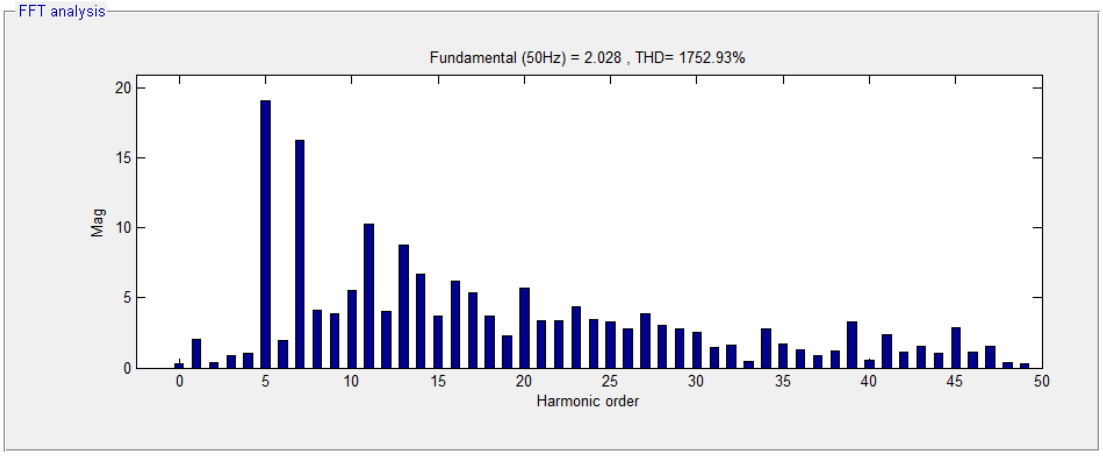


Figure IV.26 Le spectre harmonique du courant de filtre.

Le courant de la charge est représenté dans la figure IV.27

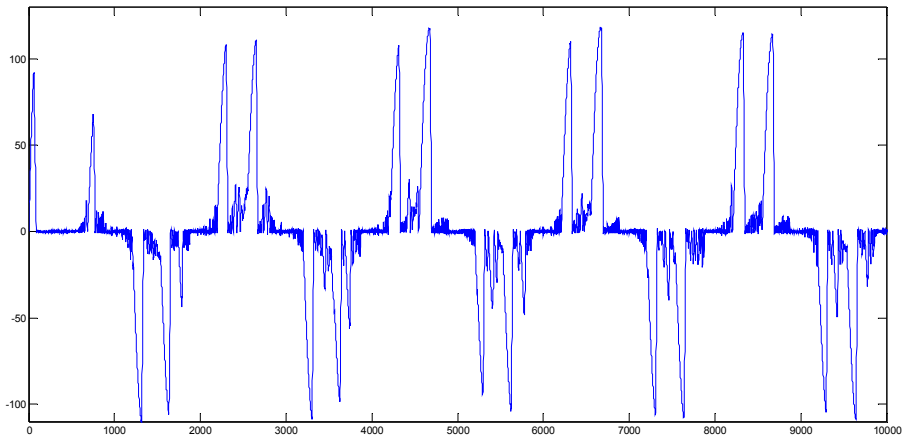


Figure IV.27 Le courant de charge

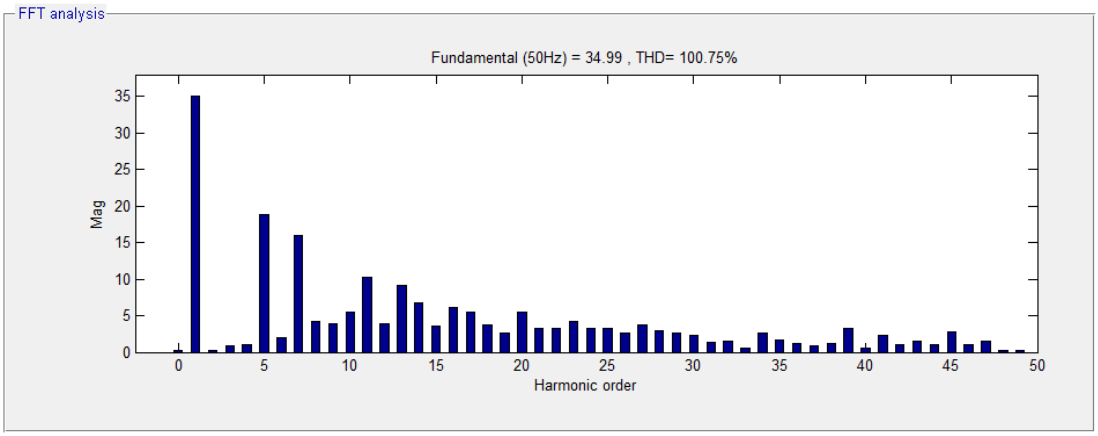


Figure IV.28 Le spectre harmonique du courant de charge

Le courant de source est représenté dans la figure IV.29

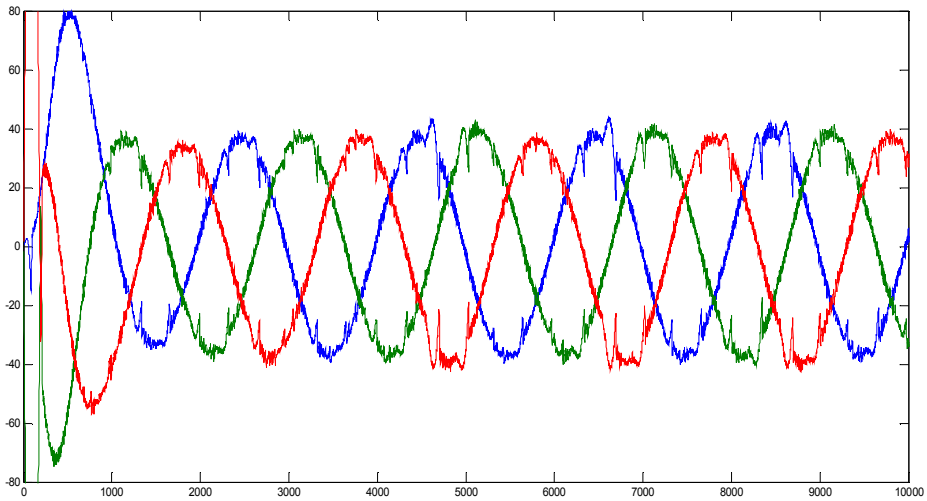


Figure IV.29 Le courant de source is

L'analyse spectrale du courant de source est représentée dans la figure

IV.30 Le taux de distorsion (THD) est de 6.32 %

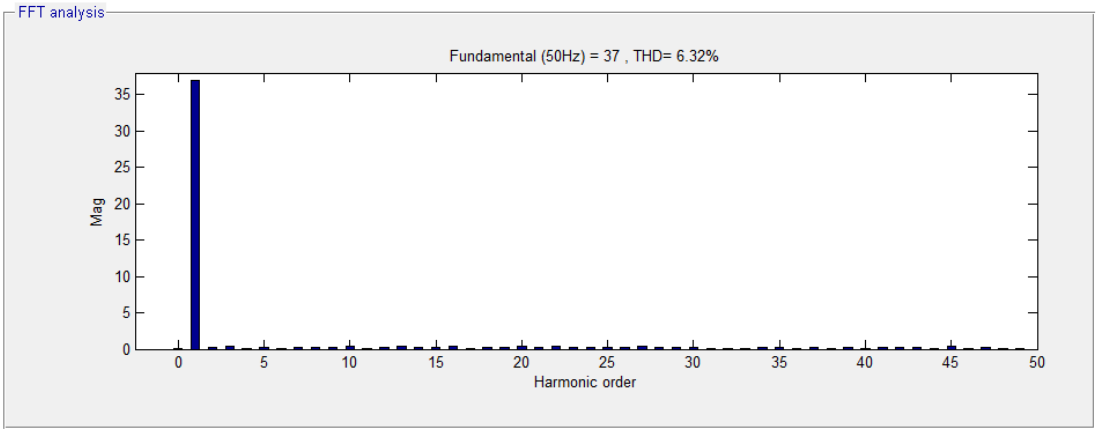


Figure IV.30 spectre harmonique de is

IV.10.4 Interprétation des résultats :

D'après les résultats obtenus en simulation il est évident que le courant de source est amélioré (de coté des harmonique) C.à.d. il est dépollué et le TDH est diminué de 42% à 6.32% aussi le courant de filtre suive le courant de référence dons la régulation fonctionne correctement et le filtre génère les harmoniques d'ordre 5,7,11,13... qui ont été polluées le réseau.

Mais le courant de charge s'augmente à cause de la sommation du courant de filtre et de la source.

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté le système de compensation des harmoniques en utilisant filtre actif parallèle comme une solution de dépollution des réseaux électriques (courants perturbateurs comme le courant harmonique).

La méthode d'identification des puissances instantanées à été choisie pour offrir la possibilité d'identifier les courants harmonique.

Les résultats obtenus dans ce chapitre montrent l'analyse temporelle et spectrale du courant de la charge. Ils donnent également les courants de référence des trois phases identifiées ainsi que ceux injectés au réseau et le courant circulant au réseau. Le courant de la ligne après compensation est un courant sinusoïdal presque dépourvu des harmoniques (THD=6.32%).

Finalement, l'étude du filtre actif parallèle nous a permis d'atteindre de très bonnes performances de compensation des harmoniques et perturbations en courant par rapport à un filtre passif.

Conclusion générale :

Ce travail consacré à l'étude du filtrage actif parallèle de puissance, après avoir abordé les points suivants :

- Définition et notion sur les problèmes d'harmoniques et les effets dommageables qu'ils génèrent ;
- Etude de la structure d'un pont redresseur à diodes comme étant une charge non linéaire ;
- Etude de la méthode des puissances instantanées pour l'identification des courants harmoniques ;
- La synthèse d'un filtre actif parallèle commandé par hystérésis ;
- Etude de simulation.

L'étude de simulation nous a permet du conclure que les perturbations harmoniques des courants sont liées aux :

- Système d'alimentation « tension du réseau »
- Impédance du réseau,
- Système de commande « Génération des signaux de commande »,

L'étape d'identification des harmoniques nous a permis de mettre au point un outil nécessaire à la détermination quantitative du dimensionnement de filtre de sortie et des semi-conducteurs du filtre actif.

Les calcules passent par la résolution d'un système relativement simple d'équation différentielle.

Cependant, le modèle du filtre est validé selon une stratégie de commande basée sur la théorie de calcule des puissances active et réactive instantané.

Cette stratégie a permis de mettre au point le principe de fonctionnement du filtre actif ainsi que la loi de commande par hystérésis.

REFERANCES BIBLIOGRAPHIES

[1] M.A.E. Allali, « Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électrique basse tension » , Thèse de Doctorat, ULP Strasbourg I. 12 sept 2002.

[2] Mohamed**.** Maghraoui, « VALIDATION DE TECHNIQUES DE COMMANDE D'UN FILTRE ACTIF PARALLELE », Thèse de Doctorat, MONTREAL, LE 17 SEPTEMBRE 2007

[3] Éric Félice , Philippe Révilla «Qualité des réseaux électriques et efficacité énergétique », Dunod, Paris, 2009
ISBN 978-2-10-054618-3

[4] Abdelhamid hamadi « Amélioration des performances du filtre active : application du régulateur proportitionnel intégral et du régulateur flou », mémoire de maitrise en génie électrique, Montréal, LE 30NOVEMBRE 2004

[5] Duverger Laurent « Étude de stratégie de commande d'un filtre actif de type parallèle en vue d'assurer la compensation des harmoniques et du déséquilibre », mémoire du projet de fin d'études, université catholique Louvain ,20 juillet 2006.

[6] ABIDI Mohamed. RAKH Laid, « Dépollution des réseaux BT des harmoniques générés par lampe à basse consommation (L.B.C) ».mémoire du fin d'étude(Master) Université Dr yahia farès de médéa.

[7] S. Rechka, « ÉTUDE DE MÉTHODES DE FILTRAGE DES ONIQUES DANS LES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES DE DITRIBUTION». Thèse de Doctorat, Université du Québec à Trois-Rivières, avril 2002.

[8] Mohamed Muftah ABDUSALAM « Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales » Thèse de Doctorat ,l'Université Henri Poincaré, Nancy

[9] sid-ahmed tadjer « étude d'un système de compensation d'harmonique en utilisant un générateur photovoltaïque GPV» magister en génie électrique ,
Université M'hamed bougara boumerdes.