

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Réseaux Electriques

THÈME

Contribution à l'Etude par Simulation des Effets des
Harmoniques et de la Compensation de l'Energie Réactive sur
le Réseau Electrique

Préparé par :

Mr. AISSA Aimene
Mr. MOUSSAOUI Moussa

Devant le Jury :

Nom et prénom	Grade	Qualité
B.BEKKI	MAA	Président
K.BELHACEL	MAA	Examineur
M.BEDOUI	MAA	Encadreur



Remerciements

*Avant tout nous tenons nos remerciements à notre ALLAH de nos avoir
Donné la force et le courage.*

*A la suite Nous tenons à remercier vivement Mme Bedoui notre promoteur
qui a fourni des efforts énormes, par ses Informations ses conseils et ses
encouragements.*

*Nous tenons également à remercier messieurs les membres de jury pour
L'honneur qu'ils nos ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance, Et
tous les professeurs de département de Génie électrique.*

*Nos plus chaleureux remerciements pour tous ceux qui de près et de loin ont
contribué à la réalisation de cette mémoire.*



Dédicace

Je dédie ce travail à Allah

Le tout puissant que nous a amené

Jusqu'à la fin de notre travail

Ce qui sont les plus chers au monde

Mes parents

Pour n'avoir soutenu moralement

Matériellement et financier jusqu'à ce jour

Ce travail est le tien

A ma mère

*Voici l'aboutissement de tes nombreuses nuits de prières et ta
sagesse*

Chère mère ce travail est le fruit de tes efforts

A mes chers frères et ma sœur

A mes amis

AISSA Aimene

Dédicace

Je dédie ce travail à Allah

Le tout puissant que nous a amené

Jusqu'à la fin de notre travail

Ce qui dans les plus chers au monde

Mes parents

Pour n'avoir soutenu moralement

Matériellement et financier jusqu'à ce jour

Ce travail est le tien

A ma mère

*Voici l'aboutissement de tes nombreuses nuits de prières et ta
sagesse*

Chère mère ce travail est le fruit de tes efforts

A mes chers frères et mes chères sœurs

A mes amis

MOUSSAOUI Moussa

Sommaire

Sommaire

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des symboles	
Introduction générale	01
Chapitre I Généralité sur les réseaux d'énergie électrique	
I.1. Introduction	04
I.2. Niveaux de tensions des réseaux	04
I.3. Topologie des réseaux électriques	04
I.4. Description des réseaux électriques	05
I.4.1. Réseau de transport THT	05
I.4.2. Réseau de répartition HT	06
I.4.3. Réseau de distribution MT	06
I.4.4. Réseau de livraison BT	06
I.5. Constitution des réseaux électriques	07
I.5.1. Centrales électriques	07
I.5.2. Les postes électriques	08
I.5.3. Les lignes électriques	08
I.6. Phénomènes électriques dans les réseaux électriques	08
I.6.1. Harmoniques	08
I.6.1.1. Inter-harmoniques	08
I.6.1.2. Infra-harmoniques	08
I.6.2. Tensions harmoniques	08
I.6.2.1 Effets instantanés	09
I.6.2.2 Effets à terme	09
I.6.3. Creux de tension	09
I.6.3.1. Origines de creux de tension	10
I.6.3.2. Effets de creux de tension	10
I.6.4 Fluctuations de Tension (Flicker)	11
I.6.4.1 Effets de Fluctuations de Tension (Flicker)	11
I.6.4.2 Causes de Fluctuations de Tension (Flicker)	12
I.6.5 Déséquilibre du système triphasé	12
I.6.5.1 Origines de déséquilibre du système triphasé	12
I.6.5.2 Effets de déséquilibre du système triphasé	13

I.7. Conclusion	15
Chapitre II : Étude de pollution harmoniques et la puissance dans les réseaux électriques	
II.1. Introduction	17
II.2. Qualité de l'énergie électrique	17
II.2.1. Définition des harmoniques	18
II.2.1.1. Source d'harmonique	18
II.2.1.2. Conséquence néfastes des harmoniques	18
II.2.2. Décomposition d'un signal périodique	19
II.3. Grandeurs caractéristiques	19
II.3.1. Grandeur harmonique	19
II.3.1.1. Rang de l'harmonique	19
II.3.1.2 Série de Fourier	20
II.3.2. Valeur efficace d'une grandeur alternative	20
II.3.3. Taux de distorsion d'harmonique	20
II.3.4. Facteur de crête	21
II.3.5. Facteur de puissance	22
II.3.6. Représentations graphiques	23
II.3.7. Facteur de déformation	23
II.3.8. Spectre d'harmonique (de fréquence)	24
II.4. Problématique des harmoniques	24
II.5. Réglementation de perturbation	25
II.6. Notion des Charges	26
II.6.1. Charge linéaire	26
II.6.2. Charges non-linéaires	27
II.6.3. Exemples de Charges Non-linéaires	28
II.7. Harmoniques et les grandeurs électriques	28
II.7.1. Principales sources de courants harmoniques	29
II.8. Tension harmonique	30
II.8.1. Appareils générant des tensions harmoniques	31
II.9. Effets des harmoniques sur le Réseau électrique	31
II.10. Conclusion	33

Chapitre III : Dépollutions Harmoniques et Compensation de la Puissance Réactive

III .1. Introduction	35
III.2. Solutions de dépollution des réseaux électriques	35
III.2.1. Solutions de dépollution traditionnelles	35
III.2.1.1. Solutions de dépollution des courants harmoniques	35
III.2.1.1.1 Compensation de la puissance réactive	35
III.2.1.1.2 Rééquilibrage des courants du réseau	36
III.2.1.1.3 Compensation des courants harmoniques	36
III.2.1.1.3.a). Transformateur à secondaire zigzag	37
III.2.1.1.3.b). Transformateur à plusieurs secondaires	37
III.2.1.1.3.c). Pont dodécaphasé	37
III.2.1.1.4. Solutions de dépollution des tensions harmoniques	38
III.2.1.1.4.a). Diminution de l'impédance de la source	38
III.2.1.1.5. Les filtres passifs	38
III.2.1.1.5.a). Classification des filtres passifs	38
III.2.1.1.5.b). Filtre passif série	38
III.2.1.1.5.c). Filtre passif parallèle	39
III.2.1.1.5.d). Différents types de filtres parallèles	40
III.2.2. Solutions modernes de dépollution	41
III.2.2.1. Principe de fonctionnement	42
III.2.2.2. Classification des filtres actifs	42
III.2.2.3. Comparaison des différents filtres	44
III.3. Compensation de la puissance réactive	45
III.3.1. Intérêts de la compensation d'énergie réactive	45
III.3.2. Type de compensation	46
III.3.3 Composantes active et réactive du courant et de la puissance	47
III.3.3.1 Composantes active et réactive du courant	47
III.3.3.2 Composantes active et réactive de la puissance	48
III.3.4. Compensation d'énergie réactive en présence d'harmoniques	49
III.5. CONCLUSION	50

Chapitre IV : Modélisation du Filtre Actif Parallèle et Résultats de Simulation

IV.1. Introduction	52
IV.2. Modélisation de l'association réseau- filtre actif- charge polluante	52
IV.2.1. Description du système	52
IV.2.2. Modélisation du réseau	53

IV.2.2. Modélisation de la charge polluante (Redresseur triphasé)	53
IV.2.3. Modélisation du filtre actif (l'onduleur)	53
IV.3. Modélisation des méthodes d'identification des harmoniques	54
IV.3.1. Méthode de puissance instantanée	54
IV.3.2. Méthode du référentiel synchrone (dq) (SRF)	55
IV.4. Modélisation de la commande de l'onduleur	56
IV.4.1. Commande par hystérésis	56
IV.4.2. Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)	57
IV.5. Simulation numérique sous Matlab Simulink	58
IV.5.1. Résultat de Simulation du FAP avant le filtrage	60
IV.5.1.1. Résultat de simulation avant le filtrage	60
IV.5.1.2. Résultat de simulation après le FAP	62
IV.5.1.2.1. Charge linéaire 01	62
IV.5.1.2.1.1. Méthode de puissance instantanée	62
IV.5.1.2.1.1.a). Commande par hystérésis	62
IV.5.1.2.1.1.b). Commande par MLI	65
IV.5.1.2.1.2. Méthode du référentiel synchrone (dq)	68
IV.5.1.2.1.2.a). Commande par MLI	68
IV.5.1.2.1.2.b). Commande par hystérésis	70
IV.5.1.2.2. Changement de la charge (Charge linéaire 02)	73
IV.5.1.2.2.1. Méthode de puissance instantanée	73
IV.5.1.2.2.1.a). Commande par MLI	73
IV.5.1.2.2.1.b). Commande par hystérésis	76
IV.5.1.2.2.2. Méthode du référentiel synchrone (dq)	78
IV.5.1.2.2.2.a). commande par MLI	78
IV.5.1.2.2.2.b). Commande par hystérésis	81
IV.5.2. Comparaison des résultats	83
IV.6. Conclusion	85
Conclusion générale	87
Bibliographiques	

Liste des figures

Figure	Titre	N°
Figure I.1	Topologie des réseaux électriques	05
Figure I.2	Description des réseaux électriques	07
Figure I.3	Creux de tension	10
Figure I.4	Fluctuations de Tension (Flicker)	11
Figure I.5	Déséquilibre du Système Triphasé	12
Figure II.1	Décomposition d'un signal périodique	19
Figure II.2	Représentations graphiques	23
Figure II.3	Diagramme de Fresnel des puissances	23
Figure II.4	Le spectre des harmoniques du courant de charge polluante	24
Figure II.5	Schéma de connexion du réseau avec une charge linéaire	26
Figure II.6	Formes du courant et de tension pour charge linéaire	27
Figure II.7	Formes du courant et de tension pour charge linéaire et non linéaire	28
Figure II.8	Le four à arc alimenté en courant Alternatif et (b). Le four à arc alimenté en courant continu	30
Figure III.1	Montage de steinmtz pour rééquilibrage	36
Figure III.2	Transformateur YZ	37
Figure III.3	filtre passif série	39
Figure III.4	filtre passif parallèle	39
Figure III.5	Raccordement d'une inductance anti-harmonique	40
Figure III.6	Installations de filtres résonants	40
Figure.III.7	Filtre amorti	41
Figure III.8	Filtre actif série	42
Figure III.9	Filtre hybride série	43
Figure III.10	Filtre actif parallèle	43
Figure III.11	Filtre hybride parallèle	43
Figure III.12	Conditionneur universel de puissance	44
Figure III.13	compensation globale	46
Figure III.14	Principe de la compensation automatique d'une installation	47
Figure III.15	Composantes vectorielles des courants actif, réactif et apparent	47
Figure III.16	Composantes vectorielles des puissances actif, réactif et apparente	48
Figure IV.1	Schéma global du système de compensation	52
Figure IV.2	Schéma synoptique d'un réseau triphasé.	53

Liste des figures

Figure IV.3	charge polluante	53
Figure IV.4	Présentations d'un onduleur triphasé.	54
Figure IV.5	Principe de la méthode (pq)	54
Figure IV.6	Model Simulink de la méthode (pq)	55
Figure IV.7	Principe de la méthode (dq)	55
Figure IV.8	model simulink de la méthode (dq)	56
Figure IV.9	Principe de commande par hystérésis	56
Figure IV.10	Model Simulink de la commande hystérésis	57
Figure IV.11	Principe de la commande des courants par MLI.	57
Figure IV.12	Modalisation de commande des courants par MLI	58
Figure IV.13	Modèle de simulation établi sous Simulink	59
Figure IV.14	Courant de source avant filtrage	60
Figure IV.15	Tension de source avant filtrage	60
Figure IV.16	Spectre harmonique de courant de source avant filtrage	60
Figure IV.17	Spectre harmonique de tension de source avant filtrage	61
Figure IV.18	les graphes la puissance active (P) et la puissance réactive(Q)	61
Figure IV.19	Courant de source après filtrage	62
Figure IV.20	Tension de source après filtrage	63
Figure IV.21	Spectre harmonique de courant de source après filtrage	63
Figure IV.22	Spectre harmonique de tension de source après filtrage	63
Figure IV.23	Courant injecter par le filtre actif	64
Figure IV.24	Tension Vdc aux bornes du condensateur	64
Figure IV.25	Puissance active (P) et la puissance réactive(Q)en monophasé	65
Figure IV.26	Courant de source après filtrage	65
Figure IV.27	Tension de source après filtrage	65
Figure IV.28	Spectre harmonique de courant de source après filtrage	66
Figure IV.29	Spectre harmonique de tension de source après filtrage	66
Figure IV.30	Courant injecter par le filtre actif	66
Figure IV.31	Tension Vdc aux bornes du condensateur	67
Figure IV.32	Puissance active (P) et la puissance réactive(Q) en monophasé	67
Figure IV.33	Courant de source après filtrage	68
Figure IV.34	Tension de source après filtrage	68
Figure IV.35	Spectre harmonique de courant de source après filtrage	68

Liste des figures

Figure IV.36	Spectre harmonique de tension de source après filtrage	69
Figure IV.37	courant injecter par le filtre actif	69
Figure IV.38	Tension Vdc aux bornes du condensateur	69
Figure IV.39	Puissance active (P) et la puissance réactive(Q) en monophasé.	70
Figure IV.40	Courant de source après filtrage	70
Figure IV.41	Tension de source après filtrage	71
Figure IV.42	Spectre harmonique de courant de source après filtrage	71
Figure IV.43	Spectre harmonique de tension de source après filtrage	71
Figure IV.44	Courant injecter par le filtre actif	72
Figure IV.45	Tension Vdc aux bornes du condensateur	72
Figure IV.46	Puissance active (P) et la puissance réactive(Q) en monophasé	73
Figure IV.47	Courant de source après filtrage	73
Figure IV.48	Tension de source après filtrage	73
Figure IV.49	Spectre harmonique de courant de source après filtrage	74
Figure IV.50	Spectre harmonique de la tension de source après filtrage	74
Figure IV.51	Courant injecter par le filtre actif	74
Figure IV.52	Tension Vdc aux bornes du condensateur	75
Figure IV.53	Puissance active (P) et la puissance réactive(Q) en monophasé	75
Figure IV.54	Courant de source après filtrage	76
Figure IV.55	Tension de source après filtrage	76
Figure IV.56	Spectre harmonique de courant de source après filtrage	76
Figure IV.57	Spectre harmonique de la tension de source après filtrage	77
Figure IV.58	Tension Vdc aux bornes du condensateur	77
Figure IV.59	Puissance active (P) et la puissance réactive (Q) en monophasé	78
Figure IV.60	Courant de source après filtrage	78
Figure IV.61	Tension de source après filtrage	78
Figure IV.62	Spectre harmonique de la tension de source après filtrage	79
Figure IV.63	tension de condensateur	79
Figure IV.64	Courant injecter par le filtre actif	79
Figure IV.65	Tension aux bornes du condensateur	80
Figure IV.66	Puissance active (P) et la puissance réactive(Q) en monophasé	80
Figure IV.67	Courant de source après filtrage	81
Figure IV.68	Tension de source après filtrage.	81

Liste des figures

Figure IV.69	Spectre harmonique de courant de source après filtrage.	81
Figure IV.70	Spectre harmonique de la tension de source après filtrage	82
Figure IV.71	Tension aux bornes du condensateur	82
Figure IV.72	Puissance active (P) et la puissance réactive(Q) en monophasé	83

Liste des tableaux

Tableaux	Titre	N°
Tableau I.1	Conséquences des creux de tension sur quelques équipements électriques Sensibles	11
Tableau I.2	Vue d'ensemble sur les principaux phénomènes perturbateurs	14
Tableau II.1	THDi pour diverses charges non linéaires	21
Tableau II.2	Engagement EMERAUDE sur les harmoniques de tension (réseaux HTA)	25
Tableau II.3	Engagement EMERAUDE sur les harmoniques de tension (réseaux HTB)	25
Tableau II.4	Spectres de courant harmonique émis par les équipements perturbateurs	28
Tableau II.5	Limite des composants harmoniques en courant	29
Tableau II.6	Niveaux de compatibilité des harmoniques en tension	31
Tableau III.1	Avantages et inconvénients des différents filtrages	44
Tableau III.2	comparaison entre le filtre actif et le filtre passif	45
Tableau IV.1	Paramètres du système	59
Tableau IV.2	Comparaison des résultats pour la charge 01	83
Tableau IV.3	Comparaison des résultats pour la charge 02	83

Liste des symboles

Nous donnons dans cette table la liste des principaux symboles utilisés ainsi que la définition des paramètres qu'ils désignent.

THD : Taux de distorsion harmonique.

THDi : Taux de Distorsion Harmonique Courant.

THDv : Taux de Distorsion Harmonique Tension.

CEI : Commission Électrotechnique Internationale.

Fp : Facteur de puissance.

F_{dis} : Facteur de distorsion.

FAP : filtre actif parallèle.

FAS : Filtre actif série.

MLI : Modulation en largeur d'impulsions.

GTO : Thyristor à extinction par la gâchette, en anglais **Gâte Turne-Off Thyristor**.

IGBT : Transistor bipolaire à grille isolée, en anglais **Insulated Gate Bipolar Transistor**.

THT : Très Haute Tension.

HT : Haute Tension.

MT : Moyenne Tension

BT : Basse Tension

FAH : Filtre Actif Hybride

FU : Filtre Universel

UPQC : Unified power Quality Conditioner

f₁ : Fréquence Fondamentale

f_c : Facteur de crête

f_d : Facteur de déformation

i : Courant

D : Effets de la distorsion harmonique

h : Rang harmonique

Liste des symboles

T_i : Taux individuel

G_c Valeur crête

G_{eff} : Valeur efficace

P : Puissance Active

Q : Puissance Réactive

S : Puissance Apparente

V₁ : Valeur efficace de la tension du rang h

Introduction générale

Introduction générale :

Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures énergétiques plus ou moins disponibles permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production vers les consommateurs d'électricité. Il est constitué de lignes électriques exploitées à différents niveaux de tension, connectées entre elles dans des postes électriques. Les postes électriques permettent de répartir l'électricité et de la faire passer d'une tension à l'autre grâce aux transformateurs. Un réseau électrique doit aussi assurer la gestion dynamique de l'ensemble (production - transport - consommation) mettant en œuvre des réglages ayant pour but d'assurer la stabilité de l'ensemble. L'énergie électrique, principalement distribuée sous forme de trois tensions formant un système triphasé sinusoïdal, permet aux producteurs et distributeurs de ce type d'énergie de fournir la puissance au consommateur ; c'est particulièrement l'aspect sinusoïdal de la tension d'origine qui est nécessaire de conserver la source de production jusqu'à l'utilisateur.

Les perturbations de courant et de tension dans les réseaux de distribution électrique sont causées par la prolifération des charges non linéaires, telles que les convertisseurs statiques (les redresseurs, les gradateurs, etc.), le matériel informatique, les appareils de climatisation ou encore les éclairages à base de tubes fluorescents.

Ces appareils absorbent des courants non sinusoïdaux et introduisent de ce fait des pollutions harmoniques. Les harmoniques engendrées par ces charges circulent dans les réseaux électriques et perturbent sérieusement le fonctionnement normal de certains équipements électriques pouvant même engendrer leur destruction. Ces effets néfastes peuvent apparaître instantanément, mais peuvent également se produire en différé tant pour le distributeur que pour les exploitants.

C'est pour ces raisons que le filtrage des distorsions en courant et en tension est au centre des préoccupations actuelles à la fois des fournisseurs et des utilisateurs d'énergie électrique. Pour des installations électriques existantes, les filtres actifs parallèles (FAP) sont à ce jour les solutions avancées de dépollution les plus adéquates. Actuellement, les solutions actives sont celles qui répondent au mieux aux contraintes de la production et de la distribution. Leur réponse est instantanée et elles s'adaptent automatiquement aux évolutions des perturbations introduites par les charges du réseau électrique. Que ce soit dans le secteur industriel ou dans le secteur domestique, les FAP s'insèrent facilement dans un réseau de distribution électrique sans imposer un aménagement des installations du fournisseur d'énergie ou du consommateur.

Introduction générale

Les FAP sont constitués de convertisseurs à base d'interrupteurs de puissance, de type onduleur, associés à un dispositif de contrôle et de commande adapté. Ils peuvent être assimilés à des sources de courant ou de tension qui compensent directement les perturbations harmoniques en injectant sur le réseau des courants ou des tensions en opposition de phase par rapport aux perturbations mesurées.

L'énergie consommée est composée d'une partie "active", transformée en chaleur ou mouvement, et d'une partie "réactive" transformée par les actionneurs électriques pour créer leurs propres champs électromagnétiques. L'utilisateur ne bénéficie que de l'apport énergétique de la partie "active"; la partie "réactive" ne peut pas être éliminée, mais doit être compensée par des dispositifs appropriés. L'énergie totale soutirée au réseau de distribution sera ainsi globalement réduite. Dans ce mémoire le travail est réalisé sur l'ensemble réseau, charge non linéaire (pont triphasé non commandé), filtre actif.

Ce mémoire comporte quatre chapitres, structurés comme suit :

Dans le premier chapitre nous allons donner un aperçu général sur les réseaux électriques depuis la production jusqu'à la consommation et sur les différents phénomènes et les perturbations affectant les réseaux électriques.

Dans le deuxième chapitre nous allons étudier les problématiques et la pollution d'harmonique.

Dans le troisième chapitre, on présente les différentes solutions pour la dépollution harmonique (traditionnelles et modernes) et la compensation de la puissance réactive.

Dans le dernier chapitre, nous allons présenter les schémas du système simulé et le résultat de simulation de la compensation de puissance réactive et la dépollution harmonique par un filtre actif parallèle.

Enfin, nous terminons notre projet par une conclusion générale relative aux résultats de simulation avec quelques perspectives.

Chapitre I :

Généralités sur les réseaux
d'énergie électrique

I.1. Introduction :

L'énergie électrique est la forme d'énergie la plus largement répandue car elle est facilement transportable à un rendement élevé et un coût raisonnable. [1]

Les réseaux électriques sont un ensemble d'infrastructure énergétique permettent d'acheminer l'énergie électrique des centres de production vers les consommateurs.

Les entreprises chargées de la production et de la livraison de l'énergie électrique se fixent Comme objectifs principaux :

- Assurer au client la puissance dont il a besoin.
- Fournir une tension stable.
- Fournir une fréquence stable.
- Fournir l'énergie à un prix acceptable.
- Maintenir des normes de sécurité.
- Veiller à la protection de l'environnement.
- Assurer la livraison des puissances actives et réactives demandées par les utilisateurs.
- Éviter que les perturbations générées par un utilisateur ne se répercutent sur les autres, en choisissant des dispositifs de protection convenables. Ces critères sont indispensables tant pour le bon fonctionnement du réseau que pour le maintien de la qualité de service. [1]

I.2. Niveaux de tensions des réseaux :

La nouvelle norme en vigueur en France UTE C 18-510 définit les niveaux de tension alternative comme suit : [2]

- HTB pour une tension composée supérieure à 50 kV
- HTA pour une tension composée comprise entre 1 kV et 50 kV
- BTB pour une tension composée comprise entre 500 V et 1 kV
- BTA pour une tension composée comprise entre 50 V et 500 V
- TBT pour une tension composée inférieure ou égale à 50 V

I.3. Topologie des réseaux électriques :

Les réseaux de transport d'énergie et d'interconnexion sont ,par nature, constitués d'ouvrages capables de forts transits et maillés. Les liaisons forment des boucles, réalisant ainsi une structure semblable aux mailles d'un filet. (fig. I.1a).

Les réseaux de répartition qu'ils alimentent ont fréquemment une structure bouclée (fig. I.1b) et peuvent alors être exploités soit en boucle fermée, le réseau est dit bouclé, soit en boucle ouverte.

Le réseau est alors dit débouclé. Certaines alimentations se font aussi en antenne (poste G, fig. I.1b) ou encore en piquage en prélevant une partie de l'énergie circulant sur une ligne reliant deux postes (poste H, fig. I.1b).

Ces réseaux de répartition à caractère régional fournissent l'énergie aux réseaux de distribution qui sont des réseaux à moyenne tension assurant l'alimentation d'un grand nombre d'utilisateurs soit directement, soit après transformation en basse tension. Leur configuration et leur mode d'exploitation sont variables. On peut trouver, selon les pays, des réseaux maillés exploités débouclés, des réseaux à structure radiale (fig. I.1d) ou des réseaux à structure arborescente (fig. I.1c).

D'une façon générale, ce sont les caractéristiques des sources de production, les besoins des utilisateurs et l'expérience d'exploitation qui, ajoutés à des considérations économiques, conduisent à choisir la structure topologique des réseaux. [3]

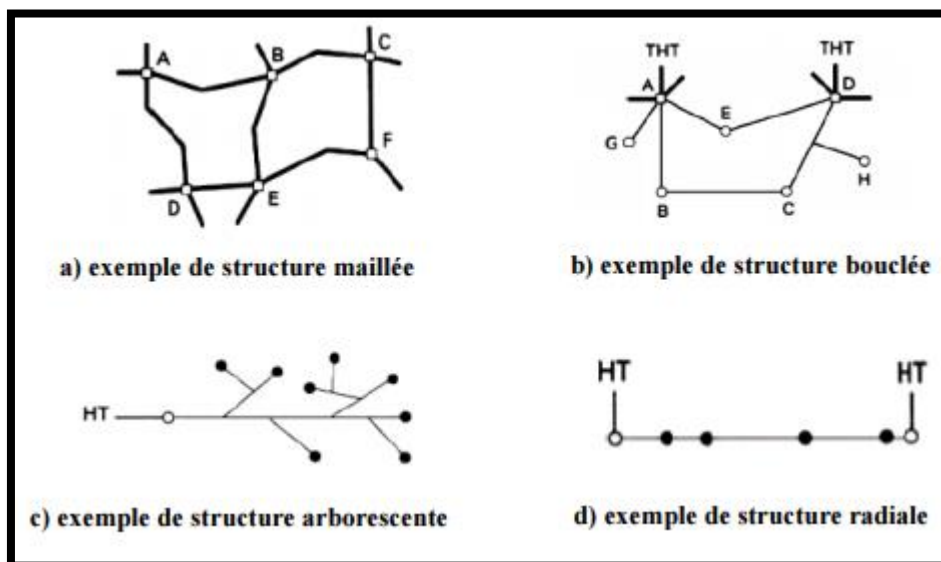


Figure I.1 : Topologie des réseaux électriques

I.4. Description des réseaux électriques :

I.4.1. Réseau de transport THT :

C'est généralement le réseau qui permet le transport de l'énergie depuis les centres éloignés de production vers les centres de consommation.

C'est sur le réseau THT que sont en principe branchées les centrales de grandes puissances (> 300 MW).

Les réseaux de transport constituent une vaste grille couvrant le territoire, à laquelle sont raccordées les sources et les utilisations (groupes, transformateurs). Chaque nœud constitue un « poste d'interconnexion ». Ce poste est en général constitué par un collecteur principal appelé « jeu de barres » sur lequel se raccordent les lignes, au moyen d'appareils.

Les protections de ces réseaux doivent être très performantes. Quant à leur exploitation, elle est assurée au niveau national par un centre de conduite ou dispatching à partir duquel l'énergie électrique est surveillée et gérée en permanence. [3]

I.4.2. Réseau de répartition HT :

La finalité de ce réseau est avant tout d'acheminer l'électricité du réseau de transport vers les grands centres de consommation qui sont :

- Soit du domaine public avec l'accès au réseau de distribution MT.
- Soit du domaine privé avec l'accès aux abonnés à grande consommation (supérieure à 10 MVA) livrés directement en HT. Il s'agit essentiellement d'industriels tels la sidérurgie, la cimenterie, la chimie, le transport ferroviaire,...

Les protections sont de même nature que celles utilisées sur les réseaux de transport, les centres de conduite étant régionaux. [3]

I.4.3. Réseau de distribution MT :

Le réseau de distribution est la partie de réseau reliant les postes sources de distribution aux postes de consommateurs. Les lignes du réseau primaire de distribution sont d'un niveau de tension compris entre 5.5 kV et 36 kV et alimentent les charges d'une zone géographique bien précise. Certaines petites unités industrielles sont directement alimentées par le réseau primaire moyen tension (MT). Le réseau secondaire de distribution est généralement à basse tension pour un usage commercial et résidentiel. [3]

I.4.4. Réseau de livraison BT :

C'est le réseau qui nous est en principe familier puisqu'il s'agit de la tension 400/230 V (380/220 en Algérie). Nous le rencontrons dans nos maisons via la chaîne : compteur, disjoncteur, fusibles (micro disjoncteurs).

La finalité de ce réseau est d'acheminer l'électricité du réseau de distribution MT aux points de faible consommation dans le domaine public avec l'accès aux abonnés BT. Il représente le dernier niveau dans une structure électrique.

Ce réseau permet d'alimenter un nombre très élevé de consommateurs correspondant au domaine domestique. [3]

Le réseau BT permet de distribuer au consommateur :

- le 230 V (1 phase + neutre) - 2 fils
- le 400 V (3 phases + neutre) - 4 fils

La figure ci-dessous (fig.I.2) explique la description de réseaux électrique.

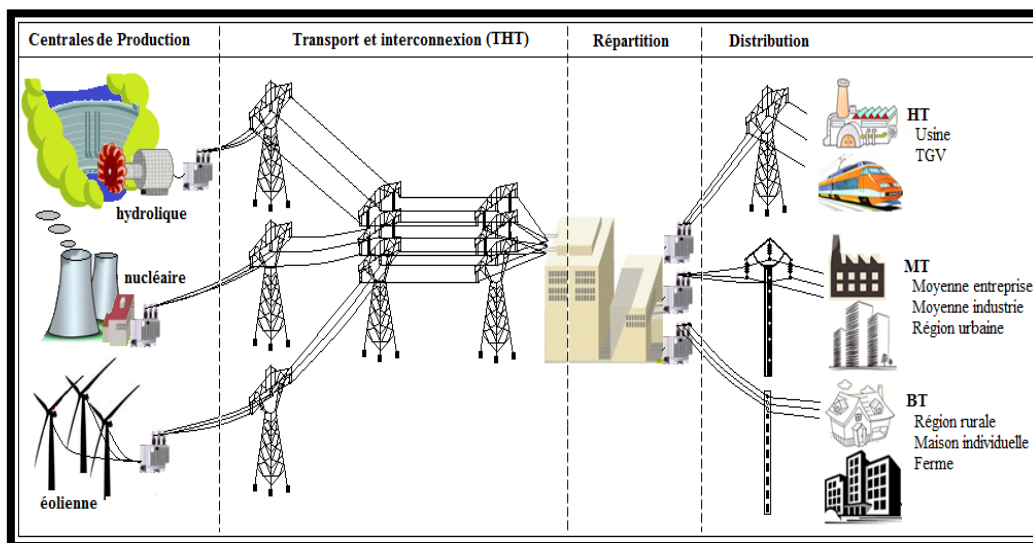


Figure I.2 : Description des réseaux électriques [3]

I.5. Constitution des réseaux électriques :

I.5.1. Les centrales électriques :

Il existe trois principaux types de centrales électriques (en France) :

- Les centrales à combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel) dites centrales thermiques classiques.
- Les centrales nucléaires qui sont également des centrales que l'on peut qualifier de thermiques.
- Les centrales hydroélectriques.

I.5.2. Les postes électriques :

On distingue, suivant les fonctions qu'ils assurent, plusieurs types des postes :

- Postes à fonction d'interconnexion.
- Postes de transformation.
- Postes mixtes.

I.5.3. Les lignes électriques :

Nous distinguons quatre types de lignes :

- Ligne de distribution à basse tension.
- Ligne de transport à haute tension.
- ligne de distribution à moyenne tension.
- Ligne de transport à très haute tension.

I.6. Phénomènes électriques dans les réseaux électriques :**I.6.1. Harmoniques :**

Les harmoniques sont des tensions ou des courants sinusoïdaux dont la fréquence est un multiple entier de la fréquence fondamentale du réseau. En général, les harmoniques pairs sont négligeables et seuls les harmoniques impaires existent. Les principaux harmoniques présents sont le troisième, le cinquième, le septième et le neuvième [4].

I.6.1.1. Inter-harmoniques :

Ce sont des composantes sinusoïdales d'une grandeur qui ne sont pas à des fréquences multiples entières de celle du fondamental : 130 Hz, 170 Hz, 220 Hz.[4]

I.6.1.2. Infra-harmoniques :

Ce sont des composantes sinusoïdales qui sont à des fréquences Inférieures à celle du fondamental : 10 Hz, 20 Hz.[4]

I.6.2. Tensions harmoniques :

Un harmonique est une composante sinusoïdale d'une onde périodique ou d'une quantité possédant une fréquence qui est multiple entier de la fréquence fondamentale.

Les courants harmoniques, qui se propagent dans les réseaux électriques, déforment l'allure du courant de la source et polluent les consommateurs alimentés par les mêmes réseaux. On peut classer les effets engendrés par les harmoniques en deux types :

- les effets instantanés.
- les effets à terme.

I.6.2.1 Effets instantanés :

- Dysfonctionnement des dispositifs d'acquisition
- Phénomène de résonance
- Bruits et vibrations
- Dégradation de la classe de précision et erreurs de lecture de certains appareils de mesure et compteurs d'énergie.
- Dysfonctionnement des récepteurs de télécommande centralisée et un déclenchement intempestif des relais de protection.
- Réduction du facteur de puissance.

I.6.2.2 Effets à terme :

Les effets à terme sont essentiellement de nature thermique, en effet, les harmoniques génèrent des pertes supplémentaires (pertes par effets joules dans les enroulements accentuées par l'effet de peau, et les pertes par hystérésis et courants de Foucault dans les circuits magnétiques) qui sont à l'origine de l'échauffement des conducteurs et de tous les composants traversés par les courants harmoniques, la dégradation du rendement des équipements tel que les transformateurs et les machines tournantes et le vieillissement prématuré des isolants et donc la diminution de la durée de vie des équipements. Dans ce cas le surdimensionnement des équipements est nécessaire, en particulier le conducteur du neutre. [4]

I.6.3. Creux de tension :

Un creux de tension est une diminution de la tension à une valeur située entre 1 et 90% de la tension nominale et d'une durée allant de 10 ms jusqu'à 1 minute. Une coupure brève est un cas particulier du creux de tension voir la figure I.3. Sa profondeur est supérieure à 99%; elle est caractérisée Uniquement par sa durée (inférieure à 3 minutes). Les coupures longues sont supérieure sa 3 minutes. Les creux de tension sont dus à l'apparition de défauts sur l'installation ou sur le réseau

de distribution. Les coupures brèves sont généralement la cause de manœuvres des automatismes des réseaux de distribution (réenclencher, isolations de défaut). [5]

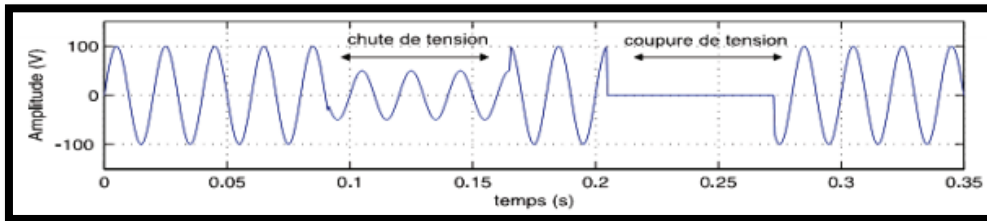


Figure I.3 : Creux de tension[5]

I.6.3.1. Origines de creux de tension :

La plupart des appareils électriques admettent une coupure totale d'alimentation d'une durée inférieure à 10 ms [06].

Il y a deux types de phénomène à l'origine des creux de tension :

- Les creux provenant du fonctionnement d'appareils à charge fluctuante ou de la mise en service d'appareils appelant un courant élevé au démarrage (moteurs, transformateurs...etc.).
- Les creux liés aux phénomènes aléatoires, comme la foudre ou tous les courts circuits accidentels sur les réseaux de distribution ou les réseaux internes des clients (défaut d'isolation, protection de branches sur les lignes aériennes...etc.).

Les creux de tension sont caractérisés par leur amplitude et par leur durée. Ils sont monophasés, biphasés ou triphasés suivant le nombre de phases concernées.

I.6.3.2. Effets de creux de tension :

Les creux de tension sont susceptibles de perturber le fonctionnement de certaines installations industrielles et tertiaires. En effet, ce type de perturbation peut causer des dégradations de fonctionnement des équipements électriques qui peuvent aller jusqu'à la destruction totale de ces équipements. Le tableau (I.1) résume les conséquences néfastes causées par les creux de tension sur quelques matériels industriels et tertiaires sensibles [06-07]

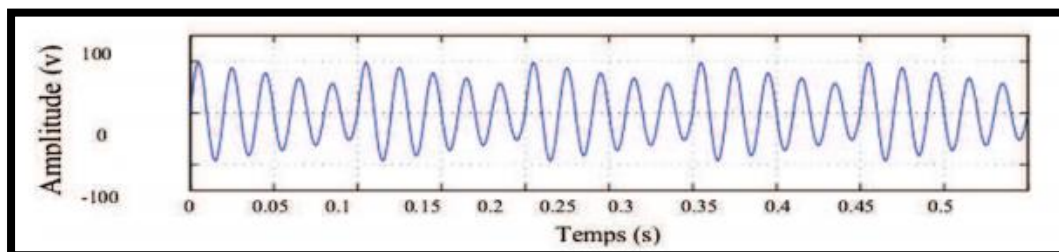
Tableau I.1. Conséquences des creux de tension sur quelques équipements électriques Sensibles [06]

Types d'appareils	Conséquences néfastes
Eclairage	Moins de luminosité, extinction et réallumage (lampes à arc)
Systèmes à base d'électronique de puissance	Arrêt du dispositif
Dispositifs de protection	Ouverture des contacteurs
Moteurs asynchrones	Ralentissements, blocage, surintensité au retour de la Tension
Moteurs synchrones	Perte de synchronisme, décrochage et arrêt du moteur
Variateurs de vitesse pour un moteur à courant continu	<ul style="list-style-type: none"> ▪ En mode onduleur : destruction des protections ▪ En mode redresseur : ralentissement de la machine
Variateurs de vitesse pour un moteur asynchrone	Ralentissement, blocage, surintensité au retour de la tension, destruction éventuelle de matériel au niveau du convertisseur

I.6.4 Fluctuations de Tension (Flicker) :

Les variations de tension sont des variations de la valeur efficace ou de la valeur crête d'amplitude inférieure à 10 % de la tension nominale et les fluctuations de tension sont une suite de variations de tension ou des variations cycliques ou aléatoires de l'enveloppe d'une tension dont les caractéristiques sont la fréquence de la variation et l'amplitude. Le terme Flicker est dérivé de l'impact visible sur les lampes (papillotement de la lumière) dû à la fluctuation de la tension. Parmi

Les causes les plus fréquentes de la fluctuation de la tension dans les réseaux de transmission et distribution sont les fours à arc.[8]

**Figure I. 4 :** Fluctuations de Tension (Flicker) [8]

I.6.4.1. Effets de Fluctuations de Tension (Flicker) :

➤ Le principal effet des fluctuations de tension est la fluctuation de la luminosité des lampes (papillotement ou flicker) . Cahier Technique n°176). La gêne physiologique (fatigue visuelle et

nerveuse) dépend de l'amplitude des fluctuations, de la cadence de répétition des variations, de la composition spectrale et de la durée de la perturbation. Il existe toutefois un seuil de perceptibilité (amplitude en fonction de la fréquence de variation) défini par la CEI en dessous duquel le flicker n'est pas visible.[9]

➤ Fluctuation de la luminosité des lampes (papillotement ou flicker) [10]

I.6.4.2. Causes de Fluctuations de Tension (Flicker) :

Les fluctuations de tension sont une suite de variations de tension ou des variations cycliques ou aléatoires de l'enveloppe d'une tension dont les caractéristiques sont la fréquence de la variation et l'amplitude.[11]

➤ Les variations lentes de tension sont causées par la variation lente des charges connectées au réseau.

➤ Les fluctuations de tension sont principalement dues à des charges industrielles rapidement variables comme les machines à souder, les fours à arc, les laminoirs.

I.6.5. Déséquilibre du système triphasé :

Trois grandeurs de même nature et de même pulsation forment un système triphasé équilibré lorsqu'elles ont la même amplitude et lorsqu'elles sont déphasées de $\pm 120^\circ$. Lorsque les grandeurs ne vérifient pas ces conditions de phase et d'amplitude, on parle d'un système triphasé déséquilibré ce qui est bien démontré dans la figure .I.5.[4] Le degré de déséquilibre est défini en utilisant la méthode des composantes de Fortescue par le rapport de la composante inverse (U_{1i}) (ou homopolaire (U_{1o})) du fondamental à celui de la composante directe (U_{1d}) du fondamental [4].

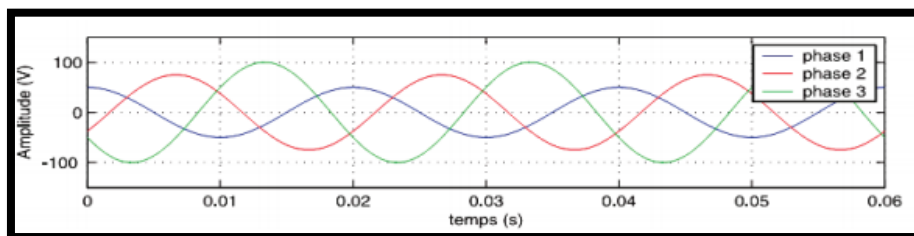


Figure I. 5 : Déséquilibre du Système Triphasé [4]

I.6.5.1 Origines de déséquilibre du système triphasé

Un récepteur triphasé électrique qui n'est pas équilibré et que l'on alimente par un réseau triphasé équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau. Ceci est fréquent pour les réceptrices monophasées basses

tensions. Mais cela peut également être engendré, à des tensions plus élevées, par des machines à souder, des fours à arc ou par la traction ferroviaire [06].

I.6.5.2. Effets de déséquilibre du système triphasé :

En général le déséquilibre engendre des dégradations des performances des machines électriques, un vieillissement accéléré des isolants, la production de courants de ligne ayant des fréquences non caractéristiques [06].

Il est plus intéressant d'aborder le problème du déséquilibre par type d'équipement. Le déséquilibre d'une installation triphasée peut entraîner un dysfonctionnement des appareils de basses tensions connectés [06]:

- Mauvais fonctionnement d'un appareil monophasé alimenté par une tension très faible (lampe à incandescence qui fournit un mauvais éclairage),
- Destruction d'un appareil monophasé alimenté par une tension trop élevée, il peut être détruit (claquage d'un filament de lampe par surtension).

Concernant les dispositifs triphasés d'électronique de puissance, principalement les ponts redresseurs, le fonctionnement en présence de déséquilibre entraîne l'apparition de composantes harmoniques non caractéristiques, notamment des harmoniques de rang multiple de 3. L'apparition de ces courants harmoniques peut poser des problèmes, comme la génération d'une anti résonance lors du filtrage de l'harmonique de rang 5. Outre les effets classiques des harmoniques, ces fréquences non caractéristiques peuvent conduire, dans certains cas, au blocage de la commande [06].

La conséquence des composantes inverses sur les machines tournantes est la création d'un champ tournant en sens inverse du sens de rotation normal, d'où un couple de freinage parasite et des pertes supplémentaires qui provoquent l'échauffement de la machine.

Concernant l'effet du déséquilibre homopolaire, il faut signaler le risque d'échauffement du conducteur neutre dans un réseau BT qui, lorsque le conducteur est d'un diamètre trop faible, peut provoquer une rupture du conducteur ou un incendie [06].

Le tableau I.2 résume les principales causes et effets des perturbations.

Tableau I.2. Vue d'ensemble sur les principaux phénomènes perturbateurs [12]

Perturbations	Origines	Conséquences	Dégâts
Coupure longue	Court-circuit, surcharge, déclenchement intempestif, (maintenance)	Arrêts d'équipements, pertes de production, dégâts	Destruction d'équipements industriels.
Creux de tension et coupure brève	Court-circuit, (enclenchement de gros moteur)	Arrêts d'équipements, pertes de production, dégâts	Pertes de données informatiques.
Fluctuations rapides (Flicker)	Installations fluctuantes (four à arc, soudeuse, moteur à démarrage fréquent, éolienne..)	Papillotement de l'éclairage, moins de luminosité	Extinction et réallumage des équipements
Harmonique	Installations non linéaires (électronique de puissance, arcs électriques ...)	Effets thermiques (moteurs, condensateurs, conducteurs de neutre ...), diélectriques (vieillessement d'isolant) ou quasi instantanés (automatismes)	Mise en péril du processus de production et ralentissement de la machine
Inter harmonique	Installations non linéaires et fluctuantes (four à arc, soudeuse, éolienne), changeurs de fréquence, télécommande centralisée	Papillotement de l'éclairage fluorescent, dysfonctionnement d'automatismes, dégâts mécaniques sur machines tournantes	Mise en péril du processus de production et ralentissement de la machine
Déséquilibre	Installations déséquilibrées (traction ferroviaire ...)	Echauffement de machines tournantes, vibrations, dysfonctionnement de protections	Ouverture des contacteurs
Surtension	Court-circuit, commutations, foudre	Déclenchements, danger pour les personnes et pour les matériels	Claquage d'un filament de lampe et destruction des protections

I.7. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons d'abord présenté les différentes structures des réseaux électriques leur topologie et la description de réseaux électrique. Nous avons, également expliqué les différents types de perturbations affectant la forme d'onde des tensions du réseau électrique ainsi leurs effets néfastes sur les équipements électriques qui y sont connectés. Ces effets sont à l'origine d'échauffements et de dégradations du fonctionnement de ces équipements pour la pollution harmonique.

Nous allons étudier dans le chapitre suivant, la qualité de l'énergie électrique et les puissances dans les réseaux électriques.

Chapitre II :

Étude de pollution
harmoniques et la
puissance dans les réseaux
électriques

II.1. Introduction :

L'utilisation croissante dans les appareils industriels ou domestiques de systèmes commandés à base d'électronique de puissance entraîne de plus en plus de problèmes de perturbation au niveau des réseaux électriques. Ces convertisseurs statiques apportent une souplesse d'utilisation, des fonctionnalités supplémentaires, une augmentation de la fiabilité, le tout avec un rendement élevé. De plus, avec la généralisation de leur utilisation les coûts de ces modules d'électronique de puissance ne cessent de baisser. L'inconvénient de ces dispositifs c'est qu'ils se comportent comme des charges non linéaires et absorbent des courants avec des formes d'ondes différentes des tensions d'alimentation. Dans ce cas, l'évolution des courants n'est pas liée directement aux variations sinusoïdales des tensions. Ces courants périodiques mais non sinusoïdaux circulent au travers des impédances des réseaux et donnent naissance à des tensions non sinusoïdales et des déséquilibres qui viennent se superposer à la tension initiale au point de raccordement. Ils peuvent générer aussi une consommation de puissance réactive. Ces perturbations périodiques régulières sont désignées comme des perturbations harmoniques. Ces perturbations ont des conséquences préjudiciables sur le bon fonctionnement des appareils électriques et ont des effets à la fois instantanés et à long terme. Il est donc important pour une installation donnée de savoir définir, analyser et quantifier les harmoniques.[13]

II.2. Qualité de l'énergie électrique :

La qualité de l'énergie est une notion assez large qui recouvre à la fois la qualité de la fourniture électrique, la qualité de l'onde de tension et la qualité des courants. Lorsque la tension est présente, les principaux phénomènes pouvant l'affecter sont d'une part les variations lentes : creux de tension, sursensions, coupures, déséquilibres et d'autre part des variations rapides : sursensions transitoires, Flickers ainsi que les harmoniques. La qualité des courants reflète par contre la possibilité des charges à fonctionner sans perturber ni réduire l'efficacité du système de puissance. C'est pourquoi certains considèrent que la qualité de l'électricité se réduit à la qualité de la tension [14].

La qualité de l'alimentation électrique ou qualité de l'onde fait référence à la mesure du degré de conformité d'une source d'alimentation électrique par rapport à un certain nombre de critères ou de normes à caractère quantitatif et absolu. L'énergie électrique est délivrée sous forme d'un système triphasé de tensions sinusoïdales. Les paramètres caractéristiques de ce système sont les suivants :

- la fréquence,
- L'amplitude.

- la forme d'onde qui doit être sinusoïdale.
- la symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leurs déphasages relatifs.

II.2.1. Définition des harmoniques :

Les harmoniques sont des tensions ou des courants sinusoïdaux dont la fréquence est un multiple entier de la fréquence fondamentale du réseau. En général, les harmoniques pairs sont négligeables et seuls les harmoniques impaires existent. Les principaux harmoniques présents sont le troisième, le cinquième, le septième et le neuvième [15].

Ils sont produits dans de faibles proportions par les appareils de production et de distribution d'électricité. La grande majorité des sources d'harmoniques sont constituées :

De charges industrielles [16].

- Équipements d'électronique de puissance : redresseurs, onduleurs.
- Charges utilisant l'arc électrique : machine à souder, éclairage (tube fluorescents), four à arc.
- Muni de convertisseurs ou d'alimentation à découpage : four à micro-onde, ordinateur, imprimante, téléviseur, plaque à induction.

II.2.1.1. Source d'harmonique :

La cause principale de l'existence des harmoniques de tension est l'injection des courants non sinusoïdaux par des charges non linéaires, ou des charges déséquilibrées branchées au réseau.[17]

II.2.1.2. Conséquence néfastes des harmoniques :

Les tensions et les courants harmoniques ont des effets indésirables et néfastes sur le fonctionnement, la rentabilité et la durée de vie de certains équipements électriques [18]:

- Alternateurs : pertes supplémentaires dans les enroulements statoriques et dans les amortisseurs liés à la circulation des courants harmoniques.
- Lignes: pertes ohmiques supplémentaires
- Transformateurs : pertes supplémentaires dans les enroulements par effet Joule et dans le noyau par courant de Foucault.
- Moteur à courant alternatif : pertes supplémentaires dans le fer et dans les enroulements plus réchauffement du moteur.

- Condensateur de puissance : pertes diélectriques supplémentaires conduisant au vieillissement rapide du condensateur
- Équipement de l'électronique de puissance : dysfonctionnement lié à la déformation de la tension.

II.2.2. Décomposition d'un signal périodique :

Un signal déformé se compose généralement de plusieurs harmoniques. Les courbes de la figure (II.1) nous montrent la décomposition d'un signal périodique en série de Fourier.

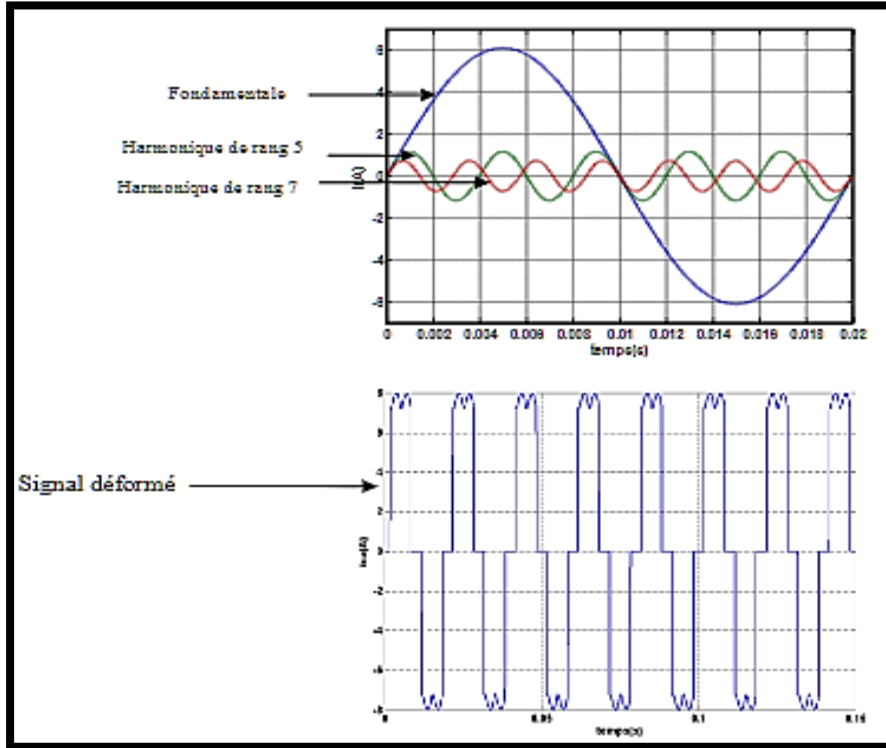


Figure II.1 : Décomposition d'un signal périodique [17]

II.3. Grandeurs caractéristiques :

II.3.1. Grandeur harmonique :

C'est l'une des composantes sinusoïdales de la variation de la grandeur physique possédant une fréquence multiple de celle de la composante fondamentale. L'amplitude de l'harmonique est généralement de quelques pour cent de celle du fondamental. [19]

II.3.1.1. Rang de l'harmonique :

C'est le rapport de sa fréquence f_n à celle de la fondamentale (généralement la fréquence Industrielle, 50 ou 60 Hz) :

$$n = \frac{f_n}{f_1} \quad (\text{II.1})$$

Par principe, le fondamental f_1 a le rang un. [20]

II.3.1.2 Série de Fourier :

Ceci revient à dire que : « tout signal périodiques de période $T= 1/f$, peut se décomposer en une somme infinie des termes sinus et cosinus de fréquences multiples de f ». Mathématiquement, cela s'écrit :

$$s(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (\text{II.2})$$

La valeur a_0 représente la valeur moyenne de $s(t)$. On calcul les coefficients a_n et b_n avec les formules suivantes :

$$a_n = \left(\frac{2}{T}\right) \cdot \int_0^T S(t) \cdot \cos(n\omega t) dt \quad \text{et} \quad b_n = \left(\frac{2}{T}\right) \cdot \int_0^T S(t) \cdot \sin(n\omega t) dt \quad (\text{II.3})$$

De plus, il existe quelques pré requis qui permettent de ne pas faire de calculs inutiles [20] :

- si la fonction est symétrique par glissement, la valeur a_0 est nulle.
- si la fonction est paire, les coefficients b_n sont nuls.
- si la fonction est impaire, les coefficients a_n sont nuls.
- si la fonction possède une symétrie sur ses deux demi-périodes, les termes d'indice pairs sont nuls.

II.3.2. Valeur efficace d'une grandeur alternative :

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

$$y_{eff} = \sqrt{\int_0^T \frac{1}{T} \cdot y^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=\infty} y_n^2} \quad (\text{II.4})$$

Notons qu'en présence d'harmoniques, les appareils de mesure doivent avoir une bande passante élevée (> 1 kHz) .[21]

II.3.3. Taux de distorsion d'harmonique :

Le taux de distorsion est un paramètre qui définit globalement la déformation de la grandeur alternative.

$$\text{THD} (\%) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^n y_n^2}}{y_1} \quad (\text{II.5})$$

y_1 : La valeur efficace de la composante fondamentale (du courant ou de la tension).

y_n : Les valeurs efficaces exactes des différentes composantes harmoniques (du courant ou de la tension).

➤ Taux de distorsion harmonique en courant TDHi

$$\text{THDi} (\%) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^n i_h^2}}{i_1} \quad (\text{II.6})$$

i_h : Courant harmonique de rang h .

i_1 : Fondamental du courant.

Différents taux de distorsion en courant sont proposés dans le tableau suivant [22]

Tableau II.1. THDi pour diverses charges non linéaires

<i>Charges Non linéaires</i>	<i>THDi (%)</i>
Variateurs de vitesse	80
Alimentation de micro-ordinateur	70
Tubes fluorescents	>100

➤ Taux de distorsion harmonique en tension TDHv

$$\text{THDv} (\%) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^n v_h^2}}{v_1} \quad (\text{II.7})$$

v_h : Tension harmonique de rang h .

v_1 : Tension fondamentale.

II.3.4. Facteur de crête [23] :

Il est défini par le rapport entre la valeur de crête d'un signal et sa valeur efficace. Il caractérise la surtension ou la surintensité instantanée maximale subie par un appareil.

$$F_c = \frac{G_C}{G_{eff}} \quad (\text{II.8})$$

G_c : Valeur crête.

G_{eff} : Valeur efficace

Pour une onde sinusoïdale, le facteur de crête est égale à $\sqrt{2} = 1.41$ une onde ayant un facteur de crête inférieur à cette valeur $\sqrt{2}$ sera plutôt aplatie, par contre, si le facteur est supérieur à $\sqrt{2}$ l'onde sera plutôt pointue.

II.3.5. Facteur de puissance :

La présence des harmoniques dans le réseau électrique incluse la notion de puissance déformante D , d'où la puissance apparente S sera exprimée sous la formule suivante :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (\text{II.9})$$

P : Puissance active.

Q : Puissance réactive.

Le facteur de puissance F_p est exprimé à l'aide de l'expression suivante :

$$F_p = \frac{P}{S} \quad (\text{II.10})$$

Le facteur de puissance sera toujours inférieur à 1.

C'est le quotient de la puissance active consommée et de la puissance apparente fournie.

Le $\cos \varphi$ est le facteur de puissance qui est fondamental et ne prend pas en compte la puissance véhiculée par les harmoniques.

- Un facteur de puissance proche de 1 indique une faible consommation d'énergie réactive et optimise le fonctionnement d'une installation. Il permet d'identifier facilement les appareils plus ou moins consommateur de puissance réactive.
- Un facteur de puissance égale à 1 ne conduira à aucune consommation de la puissance réactive (résistive pure).
- Un facteur de puissance inférieur à 1 conduira à une consommation de la puissance réactive d'autant plus importante qu'il se rapproche de 0 (inductive pure).

Dans une installation électrique, le facteur de puissance pourra être différent d'un atelier à un autre, selon les appareils installés.[24]

II.3.6. Représentations graphiques :

Les puissances active et réactive sans déformation sont :

$$\begin{aligned}
 &\text{➤ } P = S \cos (\varphi) \\
 &\text{➤ } Q = S \sin (\varphi) \\
 &\text{➤ } S = \sqrt{P^2 + Q^2}
 \end{aligned}
 \tag{II.11}$$

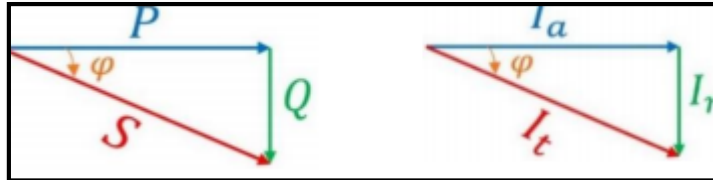


Figure II.2 : Représentations graphiques [24]

On définit la notion de puissance D permettant de rendre compte des harmoniques :

$$D = V I_1 \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} i_n^2}
 \tag{II.12}$$

L'expression du facteur de puissance peut alors se mettre sous la forme suivante :

$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \cos \varphi_1 \cos \gamma
 \tag{II.13}$$

On voit bien que les harmoniques affectent aussi le facteur de puissance.

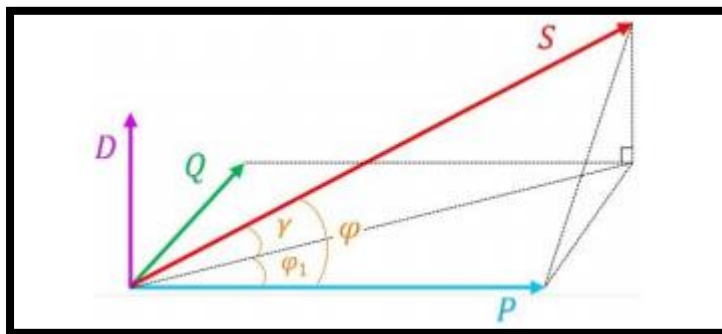


Figure II.3 : Diagramme de Fresnel des puissances [25]

Ainsi, les harmoniques de courant créent une puissance dite déformante qui dégrade le facteur de puissance. [25]

II.3.7. Facteur de déformation :

Il caractérise le lien entre le facteur de puissance et le facteur de déphasage [26].

$$F_d = \frac{F_p}{\cos(\varphi_1)} = \frac{\cos \theta}{\cos(\varphi_1)}
 \tag{II.14}$$

II.3.8. Spectre d'harmonique (de fréquence) :

C'est la représentation de l'amplitude des harmoniques en fonction de leur rang, la valeur des harmoniques étant généralement exprimée en pourcentage du fondamental par un histogramme (figure (II.4)). [20]

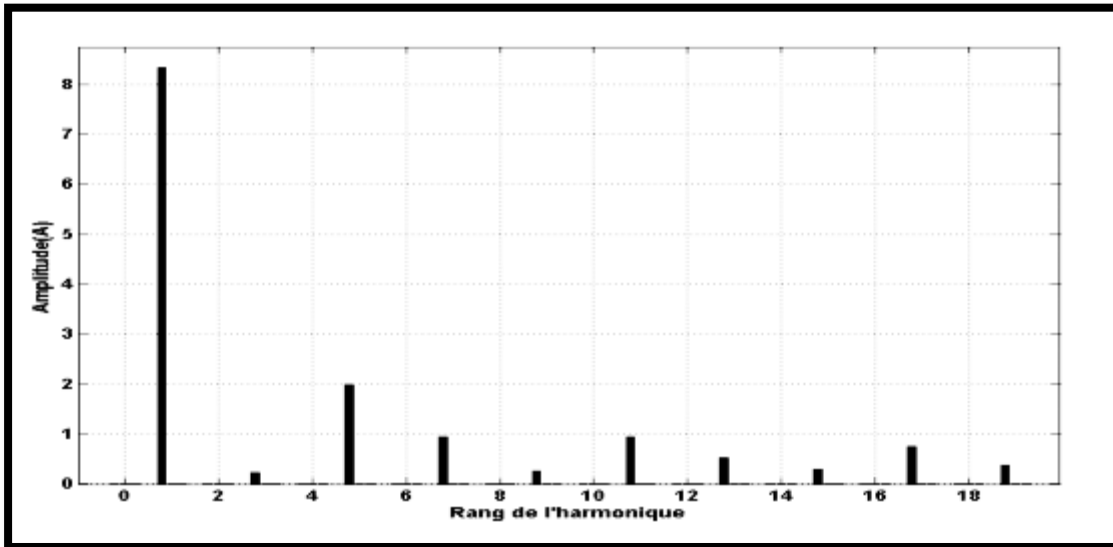


Figure II.4 : Le spectre des harmoniques du courant de charge polluante

II.4. Problématique des harmoniques :

La problématique des harmoniques, également appelée pollution harmonique, n'est pas un phénomène nouveau. Néanmoins, du fait que de plus en plus de charges non-linéaires se connectent au réseau, la problématique des harmoniques est devenue très répandue.

Les charges non-linéaires provoquent une distorsion dans le courant, et donc dans la tension, ce qui peut entraîner un mauvais fonctionnement des dispositifs raccordés au réseau. D'où, l'intérêt d'éliminer ou repousser ces harmoniques vers les fréquences les plus élevées [14].

Un récepteur d'énergie est considéré par le réseau électrique comme une charge perturbatrice s'il absorbe des courants non sinusoïdaux ou des courants déséquilibrés ou s'il consomme de la puissance réactive. Les deux premiers types de perturbations peuvent déformer ou déséquilibrer les tensions du réseau lorsque l'impédance de celui-ci n'est pas négligeable.

le troisième réduit la capacité de production ou de transmission de la puissance active des générateurs, des transformateurs et des lignes électriques [14].

Les harmoniques de courant, une fois injecté par des charges non-linéaires, se propagent à travers le réseau électrique en affectant la forme d'onde des tensions aux différents points du réseau. Cette propagation n'est limitée que par les bifurcations (points de division des courants) et les impédances du réseau qui dépendent généralement de la fréquence des courants harmoniques.

La présence des harmoniques de courant se révèle essentiellement à travers leurs effets sur la tension du réseau.[14]

II.5. Réglementation de perturbation :

D’après le contrat EMERAUDE d’EDF, les deux parties (fournisseur et récepteur) doivent s’engager à respecter les normes limitant les perturbations harmoniques.

De son côté, EDF s’engage à ce que les taux individuels de tension harmonique, exprimés en pourcentage de la tension fondamentale $V(t)$ pour les réseaux HTA (1 à 50 kV), ne dépassent pas les seuils donnés dans le tableau ci-dessous:[17]

Tableau II.2. Engagement EMERAUDE sur les harmoniques de tension (réseaux HTA)[17]

Harmoniques pairs		Harmoniques impairs			
		multiple de 3		non multiple de 3	
$V_h/V_1(\%)$	Rang	$V_h/V_1(\%)$	Rang	$V_h/V_1(\%)$	Rang
2	2	5	3	6	5
1	4	1,5	9	5	7
0,5	6 à 24	0,5	15 et 21	3,5	11
<i>le THD global de tension ne dépassant</i>				3	13
				2	17
				1,5	19,23 et 25

Concernant les réseaux HTB (plus de 50 kV), EDF s’engage à ne pas dépasser les

Tableau II.3. Engagement EMERAUDE sur les harmoniques de tension (réseaux HTB).[17]

seuils donnés dans le suivant :[17]

Harmoniques pairs		Harmoniques impairs			
		multiple de 3		non multiple de 3	
$V_h/V_1(\%)$	Rang	$V_h/V_1(\%)$	Rang	$V_h/V_1(\%)$	Rang
1,5	2	2	3	2	5 et 7
1	4	1	9	1,5	11 et 13
0,5	6 à 24	0,5	15 et 21	1	17 et 19
le THD global de tension ne dépassant pas 3 %.				0,7	23 et 25

II.6. Notion des Charges : [17]

Les récepteurs peuvent être classés en deux familles principales :

- les récepteurs linéaires (ou charges linéaires).
- les récepteurs non-linéaires (ou charges non-linéaires).

II.6.1. Charge linéaire :

Le courant circulant dans cette charge linéaire alimenté par une tension sinusoïdale figure (II.5) est lui aussi sinusoïdal. Cependant, le courant peut être déphasé par rapport à la tension d'un angle φ [29].

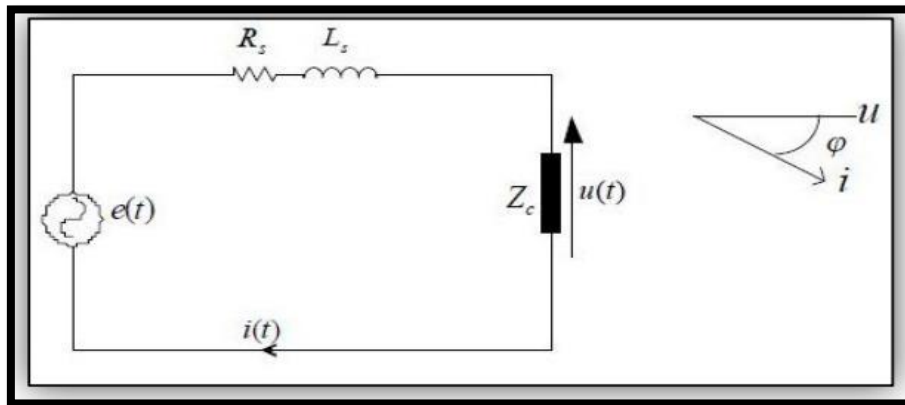


Figure II.5 : Schéma de connexion du réseau avec une charge linéaire [29]

Ou

- R_s : Résistance de la source.
- L_s : Inductance de la source.
- Z_c : Impédance de la charge.

$$e(t) = v\sqrt{2} \sin(\omega t) \tag{II.15}$$

$$i(t) = I\sqrt{2} \sin(\omega t) \tag{II.16}$$

En représentation complexe, on a

$$U = Z * I \tag{II.17}$$

U et I sont la tension et le courant efficaces

$$I = \frac{U}{Z} \tag{II.18}$$

Où, Z:Impédance du circuit

La puissance active fournie à la charge est :

$$P = UI \cos(\varphi) \tag{II.19}$$

La puissance réactive fournie à la charge est :

$$Q = UI \sin(\varphi) \tag{II.20}$$

La puissance apparente de la charge est :

$$S = UI \tag{II.21}$$

Le facteur de puissance de la charge est :

$$\cos(\varphi) = \frac{P}{S} \tag{II.22}$$

Le facteur de crête du courant est :

$$F_c = \frac{I_{max}}{I} = \sqrt{2} \tag{II.23}$$

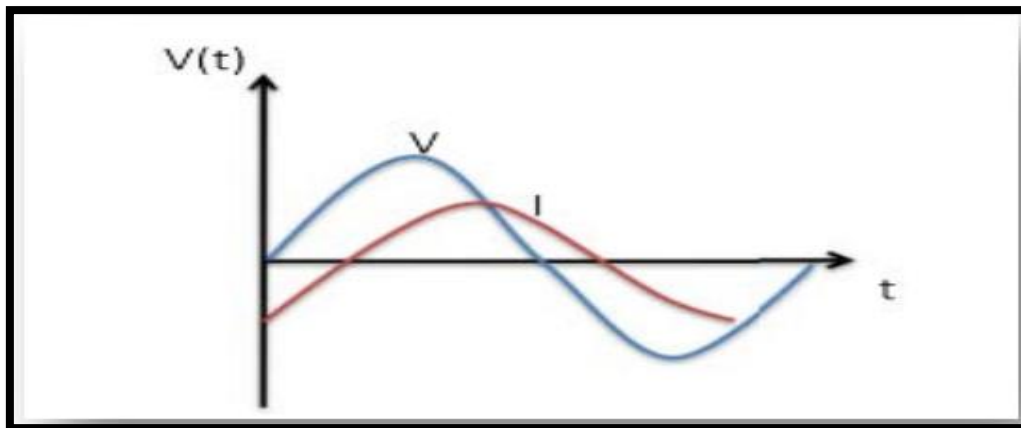


Figure II.6 : Formes du courant et de tension pour charge linéaire [29]

II.6. 2. Charges non-linéaires :

On dit que la charge non –linéaire lorsque la forme du courant n’a pas même forme que la tension qui l’alimente. Ce courant est riche en composantes harmonique dont le spectre sera fonction de la nature de la charge.

Les courant générées par ces charges circulent à partir de la charge vers la source en empruntant le chemin de la moindre impédance parmi les charges non-linaire on trouve les convertisseurs statiques, l’alimentation à découpage...etc. [28].

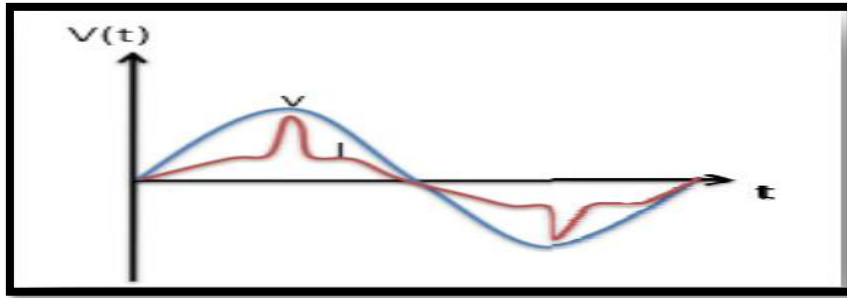


Figure II.7 : Formes du courant et de tension pour charge non linéaire.[28]

II.6.3. Exemples de Charges Non-linéaires :

Les principales sources des harmoniques sont :

- Les équipements industriels (machines à souder, fours à arc, fours à induction..).
- Les variateurs de vitesse pour moteurs asynchrones ou moteurs à courant continu
- Les appareils de bureautique (ordinateurs, photocopieurs, fax, ...).
- Les appareils domestiques (TV, fours micro-onde, éclairage néon, ...).

Tableau II.4. Spectres de courant harmonique émis par les équipements perturbateurs [30]

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.		

II.7. Harmoniques et les grandeurs électriques :

Les courants harmoniques présents sur le réseau électrique proviennent de l'utilisation des charges non linéaires. Ces charges se comportent approximativement comme des sources harmoniques. L'amplitude de ces courant ne dépend que de la charge, elle est d'autant plus élevée

que la charge est importante. Le (Tableau II.5) illustre les limites des composantes harmoniques en courant [24].

Tableau II.5. Limite des composants harmoniques en courant. [26]

<i>Harmoniques impairs</i>		<i>Harmoniques pairs</i>	
Rang (k)	Courant harmonique admissible maximal (A)	Rang (k)	Courant harmonique admissible maximal (A)
3	2.30	2	1.08
5	1.14	4	0.43
7	0.77	6	0.33
9	0.44	$8 \leq k \leq 40$	$0.23 \times \frac{8}{k}$
11	0.33		
13	0.21		
$15 \leq k \leq 39$	$0.15 \times \frac{15}{k}$		

II.7.1. Principales sources de courants harmoniques :

a. Moteurs asynchrones :

En théorie, ces moteurs génèrent des ondes sinusoïdales, mais en particulier ils génèrent certains harmoniques. Les harmoniques rencontrés s’expliquent par le fait que pour des raisons économiques, les moteurs ne sont pas optimisés par rapport au contenu harmonique en courant.

Dans le secteur domestique et tertiaire plusieurs appareils fonctionnent avec des moteurs asynchrones, ces derniers, étant connectés aux réseaux monophasés 220V, nécessitent des condensateurs pour le démarrage. Certains moteurs gardent les condensateurs connectés en fonctionnement, ce qui a une répercussion sur l’impédance harmonique.[24]

Les moteurs de grandes puissances produisent moins d’harmoniques que les moteurs de faibles puissances.

b. Eclairage (public ou domestique) :

L’éclairage par lampes à décharge et tubes fluorescents, est générateur de courants harmoniques. Le taux individuel d’harmonique 3 peut même dépasser 100% pour certaines lampes fluo-compactes modernes [24].

Une attention particulière est à porter pour la détermination de la section du conducteur neutre, qui en véhiculant la somme des courants d’harmoniques 3 dans trois phases risque un échauffement important [24].

c. Fours à arc :

Les fours à arc utilisés en sidérurgie peuvent être à courant alternatif ou à courant continu comme illustré dans les Figures (II.8.a et II.8.b) respectivement



Figure II.8.(a). : Le four à arc alimenté en courant Alternatif et **(b).** Le four à arc alimenté en courant continu [24]

d. Convertisseurs statiques de forte puissance :

Le pont redresseur et en général les convertisseurs statiques (à diodes et à thyristors) sont générateurs de courants harmoniques. Ainsi avec le pont de Graëtz, le courant continu parfait débité, impose un courant alternatif non sinusoïdal, composé de créneaux lorsque la charge est fortement inductive, ou de pointes lorsque le pont de diodes est suivi d'un condensateur comme c'est souvent le cas. Malgré leur forme différente, les deux courants ont les mêmes composantes harmoniques caractéristiques.

II.8.Tension harmonique :

Les normes CEI-1000-2-2 et CEI-1000-2-4 précisent le niveau des harmoniques en tension à respecter au point de raccordement sur les réseaux de distribution respectivement basse tension, public et industriel (**Tableau II.6**).

Tableau II.6. Niveaux de compatibilité des harmoniques en tension. [26]

Harmoniques impairs non Multiple de 3		Harmoniques impairs Multiple de 3		Harmonique pairs	
Rang	V _k (%)	Rang	V _k (%)	Rang	V _k (%)
5	6	3	5	2	2
7	6	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	>21	0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			>12	0.2
25	1.5				
>25	$0.2 + 0.5 \times \frac{25}{k}$				

II.8.1.Appareils générant des tensions harmoniques

a. Alternateurs

Les alternateurs des centrales de production émettent des tensions à moins de 0.5% d’harmoniques. Ces harmoniques sont liés à la qualité des bobinages et des pièces polaires qui assurent la forme sinusoïdale de l’onde. Pour un groupe électrogène, le taux de distorsion harmonique en tension est de 5% à vide et de 1% s’il est en pleine charge [24].

b. Transformateurs

Les transformateurs peuvent être générateurs de tension harmonique lorsqu’ils fonctionnent en régime saturé. Sur les réseaux, le taux de distorsion harmonique en tension dû à ces appareils reste toujours inférieur à 1% [24].

c. Charges électrodomestiques

Ce terme englobe tous les appareils domestiques de faible puissance tels que les récepteurs de télévision, les magnétoscopes, les gradateurs de lumière,...etc. Ces charges sont raccordées en grand nombre sur le réseau et, bien que de puissance unitaire réduite, elles sont responsables d’une part importante de la pollution harmonique.

II.9. Effets des harmoniques sur le Réseau électrique

La présence d’harmoniques de courant ou de tension conduit à des effets néfastes sur le réseau de distribution, comme par exemple :

- L’échauffement des conducteurs, des câbles, des condensateurs et des machines est dû aux

pertes en cuivre et en fer.

- L'interférence avec les réseaux de télécommunication, causée par le couplage électromagnétique entre les réseaux électriques et les réseaux de télécommunication qui peut induire dans ces derniers des bruits importants.
- Le dysfonctionnement de certains équipements électriques comme les dispositifs de commande et de régulation. En présence d'harmoniques, le courant et la tension peuvent changer plusieurs fois de signe au cours d'une demi-période. Par conséquent, les équipements sensibles au passage par zéro de ces grandeurs électriques sont perturbés.
- Des phénomènes de résonance. Les fréquences de résonance des circuits forment par les Inductances du transformateur et les capacités des câbles sont normalement assez élevées, mais celles peuvent coïncider avec la fréquence d'un harmonique. Dans ce cas, il y aura une amplification importante qui peut détruire les équipements raccordés au réseau.
- La dégradation de la précision des appareils de mesure .Des perturbations induites sur les lignes de communication, rayonnement électromagnétique Notamment. [24]

II.10. Conclusion :

Nous avons exposé le problème des harmoniques et des perturbations affectant la tension du réseau et dégradant ainsi la qualité de l'énergie électrique. Après avoir recensé les origines et les conséquences néfastes des harmoniques sur les différents éléments constitutifs du réseau et sur les récepteurs raccordés à un réseau pollué, nous avons mis l'accent sur les harmoniques produits par les convertisseurs statiques, Ensuite, nous avons présenté les différentes charges (linéaire et non linéaire) et les différentes caractéristiques des harmoniques.

Les charges dites non-linéaire, engendrent dans le réseau de distribution, des courants non-sinusoïdaux provoquant des perturbations envahissant ce dernier. Ces perturbations se répercutent sur la qualité de l'énergie électrique et sur le bon fonctionnement des installations électriques.

Dans le chapitre suivant seront données des solutions pour éviter ces problèmes de pollution harmoniques et pour la compensation de la puissance réactive.

Chapitre III :

Dépollutions Harmoniques
et Compensation de la
Puissance Réactive

III.1. Introduction :

L'utilisation des appareils électriques est de plus en plus intense que ce soit pour des applications industrielles ou domestiques. Cependant la plupart de ces appareils tels que les redresseurs, les gradateurs, le matériel informatique, les appareils de climatisation ou encore les éclairages à base de tubes fluorescents absorbent des courants non sinusoïdaux, ce qui provoque des distorsions harmoniques dans l'ensemble du réseau électrique. Ces harmoniques peuvent perturber le fonctionnement normal de certains équipements électriques voir même les endommager.

Toutefois, le rôle des réseaux électriques est de fournir aux consommateurs de l'énergie électrique avec une parfaite continuité, sous forme de tension parfaitement sinusoïdale ayant des valeurs d'amplitude et de fréquence préétablies en fonction du point de raccordement. Afin d'atteindre cet objectif, plusieurs méthodes de dépollution harmonique sont étudiées, parmi elles les filtres actifs qui sont une alternative très intéressante du point de vue rendement, fiabilité et coût.[31]

Dans ce chapitre, nous présentons les différentes stratégies de dépollution de ces harmoniques.

III.2. Solutions de dépollution des réseaux électriques :

La minimisation des perturbations harmoniques au sein des dispositifs électriques évite un surdimensionnement, réduit la fatigue mécanique, permet une discrétion acoustique...etc.

Pour dépolluer les courants et tensions harmoniques et diminuer ainsi le taux de distorsion harmonique THD, on peut agir à deux niveaux :

- Du côté distributeur en filtrant la tension source.
- Du côté client en compensant les courants harmoniques absorbés par la charge non linéaire.

Il existe deux types de solutions de dépollution de ces harmoniques, les solutions traditionnelles et les solutions modernes.[31]

III.2.1. Solutions de dépollution traditionnelles :

On présente les solutions de dépollution traditionnelles selon le type de perturbation considéré.

III.2.1.1. Solutions de dépollution des courants harmoniques :

III.2.1.1.1 Compensation de la puissance réactive :

La consommation d'énergie réactive entraîne des surcharges des équipements de

transport et de conversion d'énergie ainsi qu'une augmentation des chutes de tension en ligne [32].

La méthode la plus utilisée pour compenser la puissance réactive consommée surtout par les dispositifs à base d'électronique de puissance et les machines asynchrones, consiste à raccorder en parallèle avec le réseau des batteries de condensateurs.

L'inconvénient de cette méthode est le fait que ces condensateurs fournissent une puissance réactive constante, donc qui ne s'adapte pas à l'évolution des besoins.

III.2.1.1.2. Rééquilibrage des courants du réseau :

Les méthodes les plus connues pour le rééquilibrage des courants du réseau sont :

- La répartition égale des charges monophasées et biphasées sur trois phases du réseau.
- L'installation de compensateur passif appelé montage de Steinmetz qui permet d'équilibrer l'impédance du réseau mais uniquement à la fréquence 50Hz, car à des fréquences différentes de 50 Hz ce montage provoque un fort déséquilibre avec des résonances qu'il faut éviter d'exciter à proximité d'un générateur d'harmoniques [33].

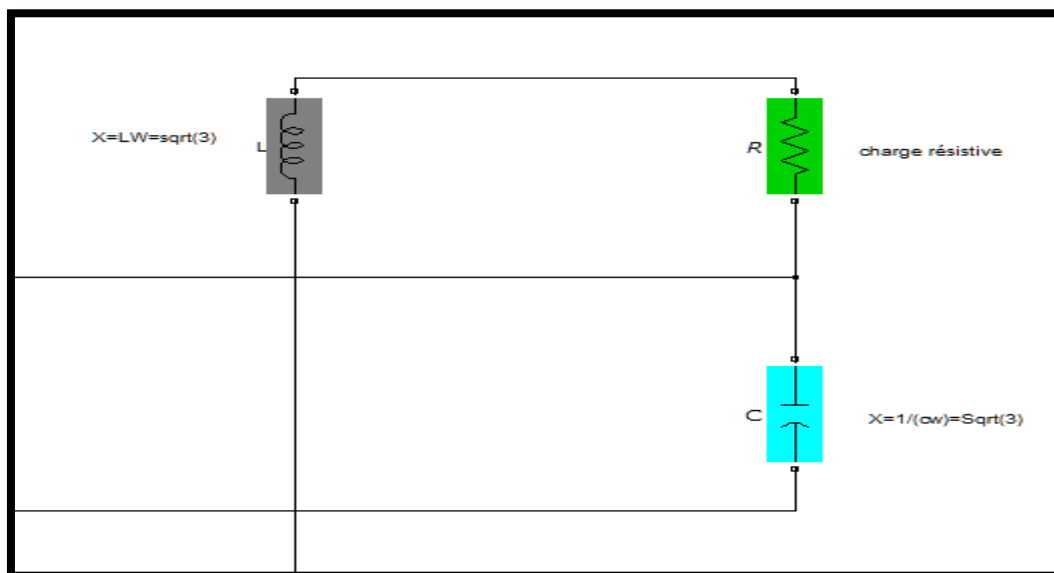


Figure III.1 : Montage de Steinmetz pour rééquilibrage

III.2.1.1.3. Compensation des courants harmoniques :

Plusieurs solutions ont été envisagées afin d'immuniser les équipements électriques des courants harmoniques, parmi elles on distingue celle qui est appelée confinement des harmoniques.

Cette méthode consiste à diminuer ou arrêter la propagation des courants harmoniques dans le réseau en utilisant des transformateurs à couplages appropriés :[33]

III.2.1.1.3.a). Transformateur à secondaire zigzag :

On utilise le couplage zigzag au secondaire d’un transformateur lorsque la charge non linéaire est du type redresseur ou gradateur qui est riche en harmonique homopolaire, car il empêche le passage de cette harmonique au primaire.

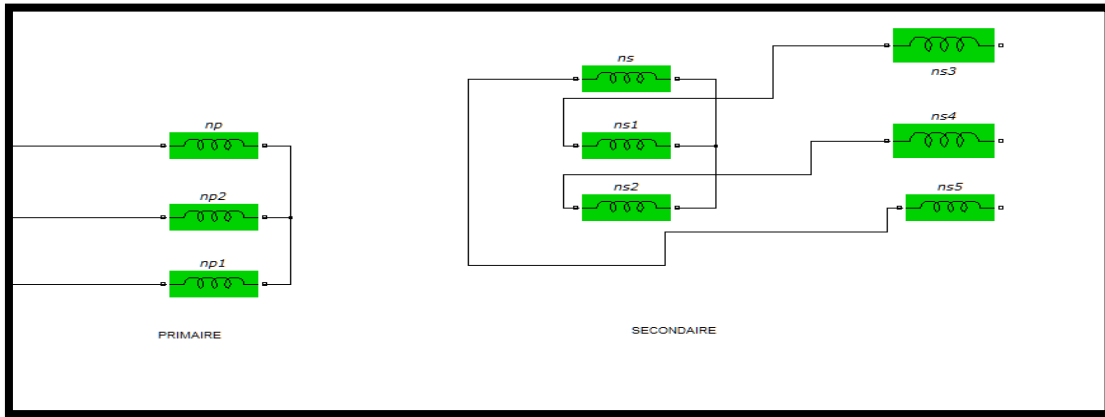


Figure III.2: Transformateur YZ

III.2.1.1.3 .b). Transformateur à plusieurs secondaires :

Cette méthode permet de réduire le contenu spectral des courants harmoniques, plus le nombre de secondaires et le nombre de redresseurs associés, avec des déphasages relatifs appropriés, augmente plus le taux de distorsion harmonique en tension et en courant est faible et plus le montage est complexe et onéreux.[33]

III.2.1.1.3.c). Pont dodécaphasé :

Le principe consiste à utiliser un transformateur à deux secondaires délivrant des tensions décalées de 30° entre elles, chacun de ces secondaires alimentant un redresseur en pont de Graëtz qui réalise un redressement hexaphasé. Les redresseurs doivent fournir des courants continus identiques afin que les courants alternatifs qu’ils prélèvent sur les secondaires des transformateurs aient les mêmes valeurs.

Dans ces conditions, il y a une recombinaison des courants harmoniques, générés par chacun des redresseurs au primaire du transformateur et le calcul montrent que les harmoniques de rang $6k \pm 1$ avec k impair sont éliminés. C’est le cas en particulier pour les harmoniques 5 et 7 dont les amplitudes théoriques sont les plus importantes. Les harmoniques 11 et 13 sont conservés tandis que les harmoniques 17 et 19 sont éliminés. Les harmoniques restants sont donc de rang $12k \pm 1$ avec k entier naturel [34].

III.2.1.1.4. Solutions de dépollution des tensions harmoniques :**III.2.1.1.4 .a). Diminution de l'impédance de la source :**

L'une des solutions naturelles à la dépollution harmonique est d'abaisser l'impédance de la source puisque cette dernière, lorsqu'elle est grande, entraîne l'augmentation du taux de distorsion harmonique en tension pour un courant absorbé non sinusoïdal. En pratique cela revient, par exemple, à brancher la charge polluante sur un transformateur surdimensionné en puissance apparente et de tension de court-circuit très faible.[31]

III.2.1.1.5. Les filtres passifs :

Il s'agit des premiers dispositifs utilisés pour l'élimination d'harmoniques. Ils sont composés par des éléments passifs comme des inductances, des capacités et des résistances. En général, les filtres d'harmoniques sont connectés en parallèle avec les charges injectant des courants harmoniques (les redresseurs à diodes ou à thyristors, fours à arcs électrique, etc.). L'association d'éléments capacitifs et inductifs en parallèle avec la charge polluante permet d'obtenir une résonance série accordée sur les rangs harmoniques à éliminer. [35]

III.2.1.1.5.a). Classification des filtres passifs :

Le filtrage passif est la plus simple solution conventionnelle pour atténuer la distorsion harmonique [36]. Les filtres passifs sont des éléments à base d'inductance, capacité et résistance configurés et réglés pour contrôler les harmoniques. On peut classifier les filtres passifs suivant leur fréquence de résonance, leur mode de connexion et leur emplacement sur le réseau.

Cela permet de définir deux grands modes de filtres passifs :

Les filtres "série" utilisés pour les charges génératrices de tensions harmoniques et les filtres "parallèles" utilisés dans le cas des charges génératrices de courants harmoniques et, suivant le modèle choisi, les harmoniques peuvent être précisément bloqués par une grande impédance série entre le convertisseur, déviés par une faible impédance en parallèle ou une combinaison des deux.

III.2.1.1.5.b). Filtre passif série :

Une façon d'atténuer les harmoniques générées par les charges non linéaires est d'introduire un filtre passif série (**figure III.3**) dans l'alimentation à la ligne d'entrée de sorte que le filtre offre une impédance élevée à la circulation des harmoniques à partir de la source à la charge non linéaire. Le filtre passif "série" est raccordé sur une fréquence particulière, il offre une impédance élevée à sa seule fréquence d'accord. Selon la propriété physique de L et C choisie, il existe généralement une bande étroite autour de la fréquence d'accord lorsque l'impédance reste élevée [37].

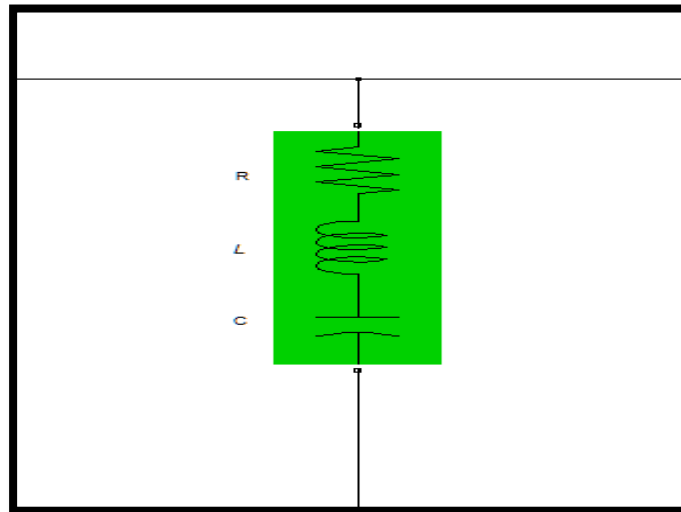


Figure III.3: Filtre passif série]

III.2.1.1.5.c). Filtre passif parallèle :

Le filtre passif parallèle est montré sur la (Figure III.4.).Il est constitué d'une inductance en parallèle avec un condensateur. Il présente une impédance faible pour tous les harmoniques et une impédance suffisamment importante par rapport au fondamental, ce qui empêche les courants harmoniques de se propager vers le réseau.

Le filtre passif parallèle à un comportement inductif pour les fréquences inférieures à la fréquence fondamentale et un comportement capacitif pour les fréquences supérieures à la fréquence fondamentale, ce qui est un avantage majeur pour le contrôle du courant dans l'inductance [38].

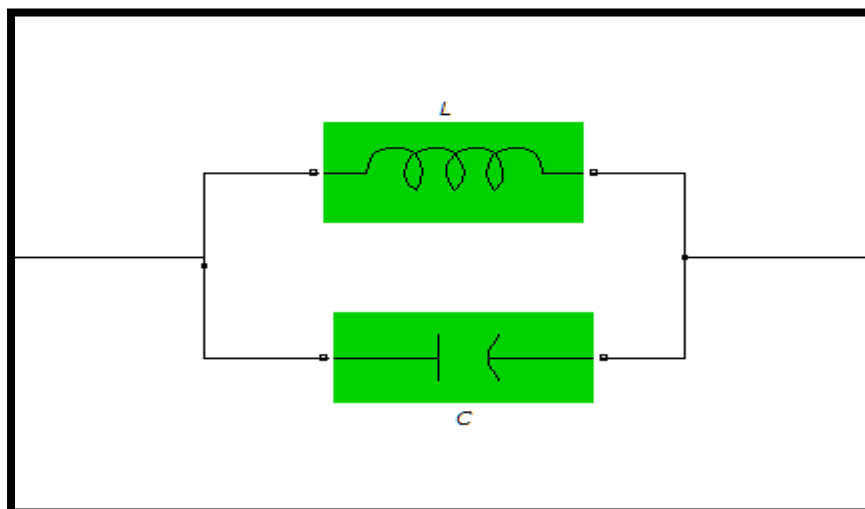


Figure III.4: Filtre passif parallèle

III.2.1.1.5.d). 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.

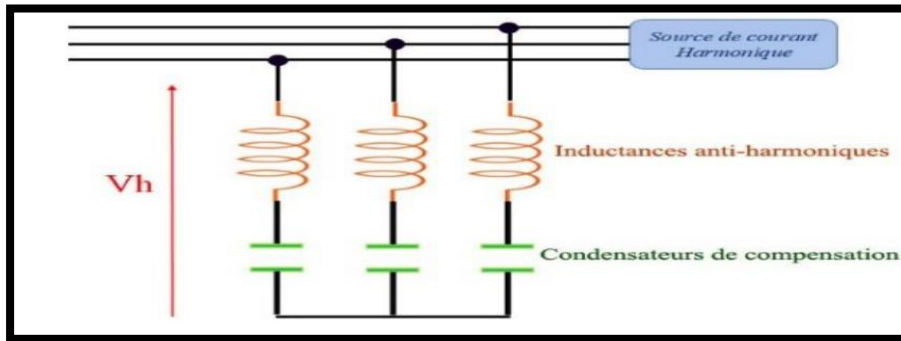


Figure III.5: Raccordement d'une inductance anti-harmonique[38]

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.

✓ 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.

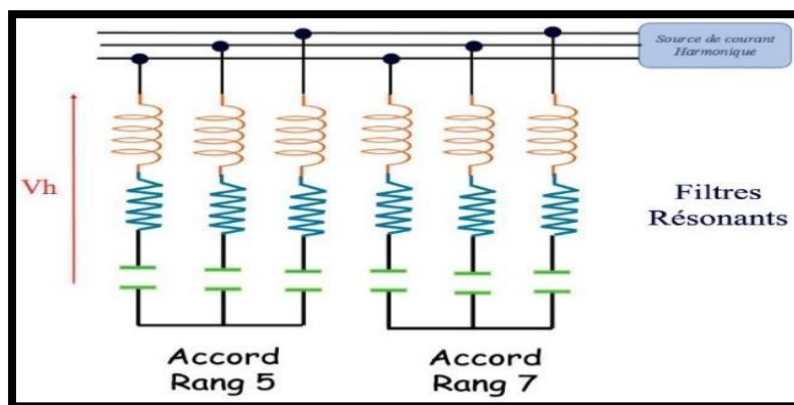


Figure III.6: .Installations de filtres résonants

La puissance réactive nécessaire pour l'installation est répartie entre condensateurs de 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.[38]

✓ **Filtre amorti :**

Le filtre amorti peut réduire le risque de résonance non souhaitée, et permet de réduire considérablement la taille du filtre passif, en fonctionnant sur une large gamme de fréquence. On distingue trois types de filtre amorti (figure II.7): le filtre de premier ordre est très peu utilisé car il exige une grande capacité et provoque des pertes de puissance élevées. Les filtres de deuxième et troisième ordre sont plus performants. [39].

✓ **Quelques avantages du filtre amorti :**

- Performances moins sensibles aux variations de température, aux déviations de fréquence et aux tolérances des composants.
- Faible valeur d'impédance pour une large gamme de fréquence harmonique. [40].

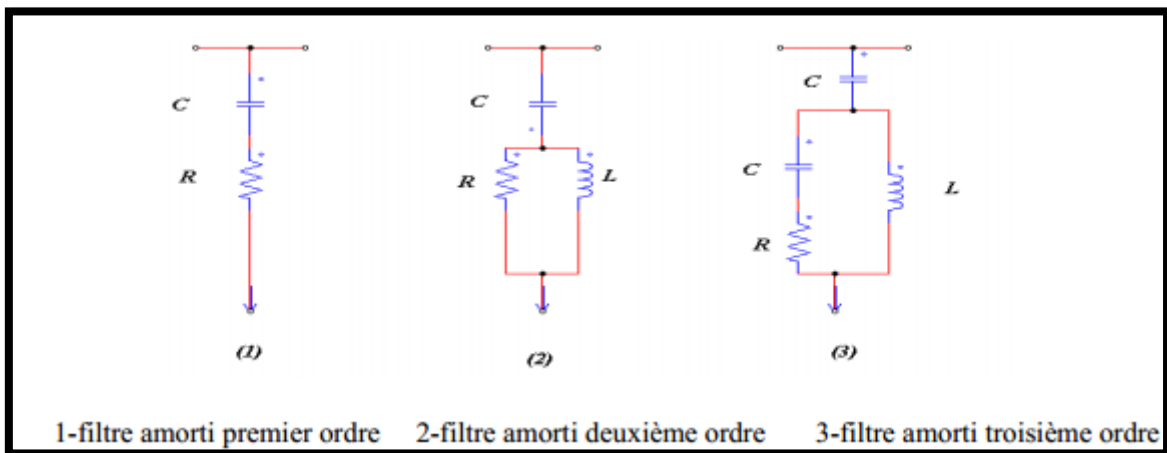


Figure III.7: Filtre amorti. [40].

III.2.2. Solutions modernes de dépollution :

Nouvelle structure de filtrage plus efficace ont été conçu appelé filtre actif de puissance en réponse aux inconvénients des solutions traditionnelles de dépollutions qui ne répondent plus à l'évolution des charges et des réseaux électriques, en plus de l'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors GTO et les transistors IGBT qui offrent de nouvelles possibilités. Le but de ces filtres est de générer des courants ou tensions harmoniques de manière à

compenser les perturbations responsables de la dégradation des performances des équipements et installations électriques.

III.2.2.1. Principe de fonctionnement :

Les filtres actifs sont constitués de convertisseurs statiques à base de semi-conducteurs de puissance commandés par un système de contrôle approprié. Ils peuvent être une source de courant ou de tension qui compensent en temps réel les harmoniques en injectant au niveau du point de raccordement un courant ou une tension en opposition de phase par rapport aux perturbations harmoniques existantes, afin que le courant/tension de ligne reste purement sinusoïdal et égale au fondamental du courant de charge.

Le filtre actif peut être connecté en série ou en parallèle au réseau électrique, selon le type de compensation voulue.[31]

III.2.2.2. Classification des filtres actifs :

On se propose de présenter une classification selon leurs topologies. On peut citer trois topologies. [41]

a/Filtre actif série :

Le filtre actif série est connecté en série sur le réseau. Il se comporte comme une source de tension qui engendre des tensions harmoniques dont la somme avec la tension réseau est une onde sinusoïdale.

Il est destiné à protéger les installations sensibles aux tensions perturbatrices (harmoniques, creux, déséquilibres) provenant de la source et également celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau.

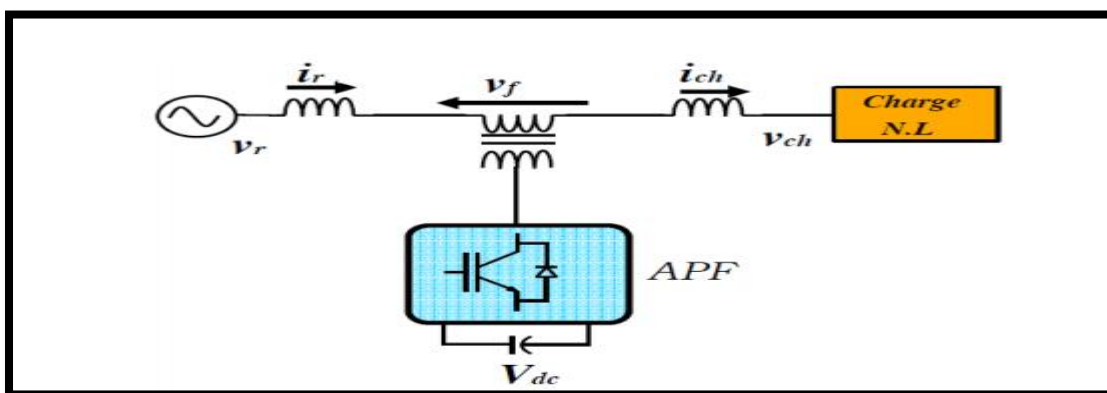


Figure III.8: Filtre actif série[31]

Il peut y avoir une autre topologie de filtre actif série en l'associant avec un filtre passif parallèle que l'on appelle filtre hybride série. On utilise cette association afin d'améliorer les performances de compensation.

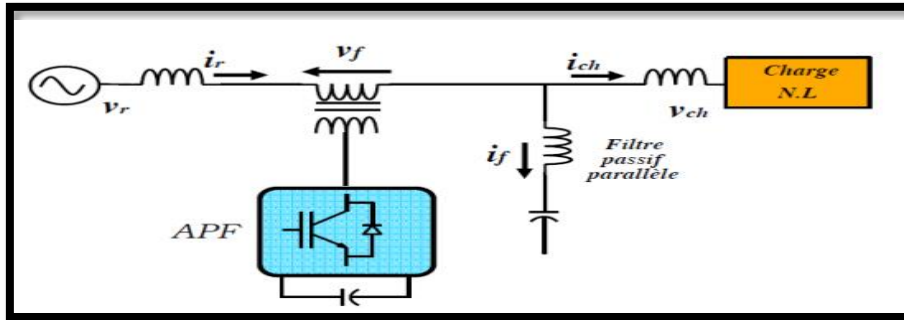


Figure III.9: Filtre hybride série[31]

b/-Filtre actif parallèle :

Le filtre actif parallèle ou compensateur shunt, est connecté en parallèle sur le réseau électrique entre la source de tension et la charge non-linéaire. Il injecte dans le réseau le courant nécessaire afin de compenser les harmoniques de la charge polluante.

Il est souvent commandé comme générateur de courant réglable [42]

Ainsi, l'objectif du filtre actif parallèle est conçu pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive engendrés par la charge non linéaire, tout en s'adaptant aux évolutions du récepteur.

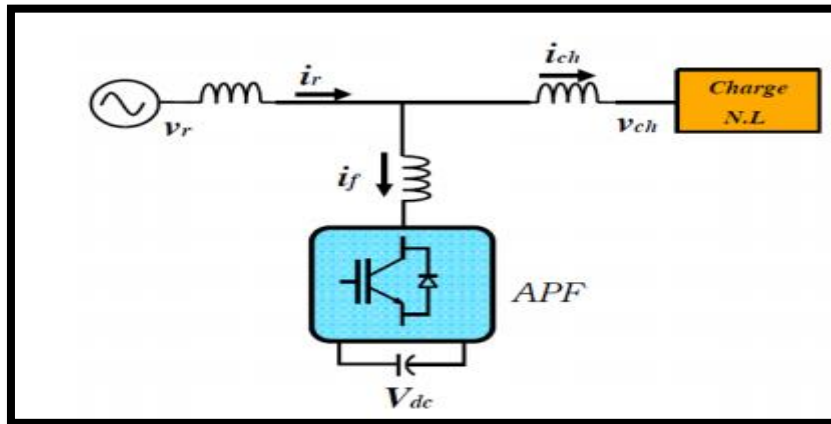


Figure III.10: Filtre actif parallèle[31]

Il se trouve une autre topologie de FAP, en associant un FAP et un filtre passif série.

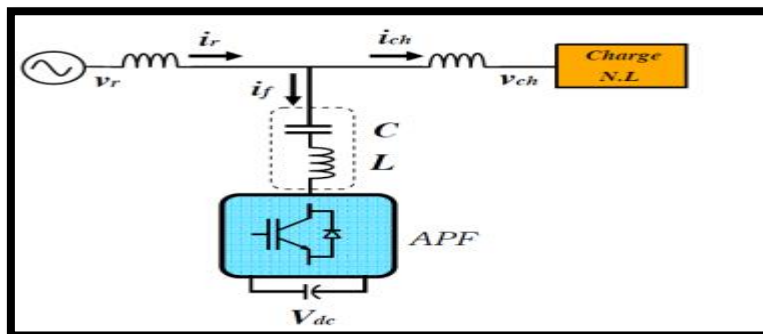


Figure III.11: Filtre hybride parallèle[31]

C/- Combinaison parallèle-série actifs :

C'est une solution de compensation universelle basée sur le fonctionnement simultané des filtres actifs parallèle et série et possède leurs avantages cumulés.

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 [43].

Les filtres hybrides les plus étudiés sont :

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

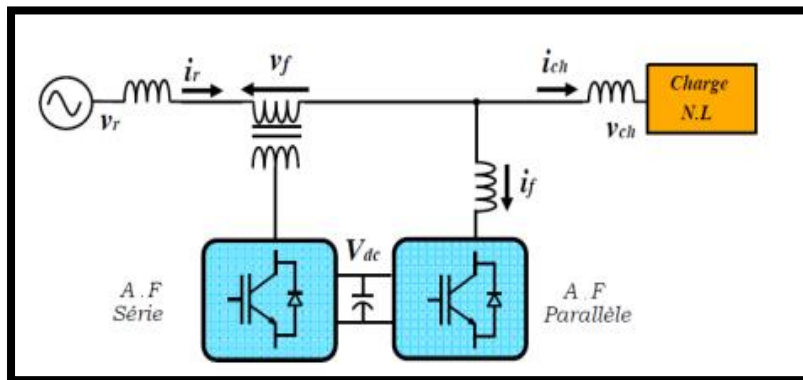


Figure III.12: Conditionneur universel de puissance [31]

III.2.2.3. Comparaison des différents filtres :

Tableau III.1. Avantages et inconvénients des différents filtrages [40]

Principes	Avantages	Inconvénients
Filtrage passif	Amélioration de la forme du courant	Risque de résonance, pas d'adaptabilité, encombrant
Filtrage actif parallèle	Amélioration de la forme du courant, adaptabilité aux variations de la charge du réseau	Amélioration de la forme de tension n'est pas toujours évidente
Filtrage actif série	Amélioration de la forme de tension, adaptabilité aux variations de la charge du réseau	Pas Amélioration de la forme du courant
Combinaison parallèles série actif	Amélioration de la forme du courant, Amélioration de la forme de tension, adaptabilité aux variations de la charge du réseau	Réalisation difficile

Tableau III.2. Comparaison entre le filtre actif et le filtre passif [40]

caractéristiques	Filtre actif	Filtre passif
Adaptation à l'évolution de la charge du réseau	Oui, automatiquement	Non
Limite de compensation du rang harmonique	Compense dans la limite de sa bande passante qui est déterminée par la fréquence de commutation maximale des semi-conducteurs de son onduleur	Le filtre résonant ne compense qu'un rang harmonique à la fois Le filtre amorti compense dans la limite de sa bande passante
Risque de la résonance entre le filtre et réseau	Non	Oui
Compensation de la puissance réactive	Oui, le cout est plus élève que celui du filtre passif	Oui
Possibilité de surcharge lorsque le courant harmonique dépasse le dimensionnement du filtre	non	Oui
Compensation dans les réseaux haute puissance	Oui, mais le cout est très élevé	Oui

III.3. Compensation de la puissance réactive :

Le bilan global de la puissance réactive produite et consommée dans l'ensemble du système électrique doit être équilibré. Toutefois, l'équilibre local n'est pas naturel. Il en résulte des transits de la puissance réactive. Or, ces transits provoquent des chutes de tension et des pertes. Il faut, donc, éviter ces transits par la production de la puissance réactive, autant que possible, à l'endroit où elle est consommée.

Les variations de tension du réseau sont étroitement liées aux fluctuations de la puissance réactive dans le système de production et de transport. Ceci tient au fait que la puissance réactive intervient de manière importante dans l'expression de la chute de tension.

.L'analyse des variations de la demande de la puissance réactive montre que le problème de l'adaptation offre-demande présente deux aspects qui nécessitent l'emploi de dispositifs aux caractéristiques très différentes [44].

III.3.1 Intérêts de la compensation d'énergie réactive : [45]

- suppression de la facturation des consommations excessives d'énergie réactive.
- réduction de la puissance souscrite en kVA.
- diminution des pertes dans les conducteurs à puissance active constante.
- augmentation de la puissance active transportée à courant apparent constant.
- diminution de la chute de tension.

III.3.2. Type de compensation :[45]

A/- Compensation individuelle :

La batterie est raccordée directement aux bornes du récepteur.

La compensation individuelle est à envisager lorsque la puissance du récepteur est importante par rapport à la puissance du transformateur.

Lorsqu'elle est possible, cette compensation produit l'énergie réactive à l'endroit où elle est consommée et en quantité ajustée aux besoins.

Un complément en tête de l'installation peut être nécessaire au niveau du transformateur.

B/- Compensation globale :

La batterie est raccordée en tête d'installation (voir fig.III.13) et assure une compensation de l'ensemble de l'installation.

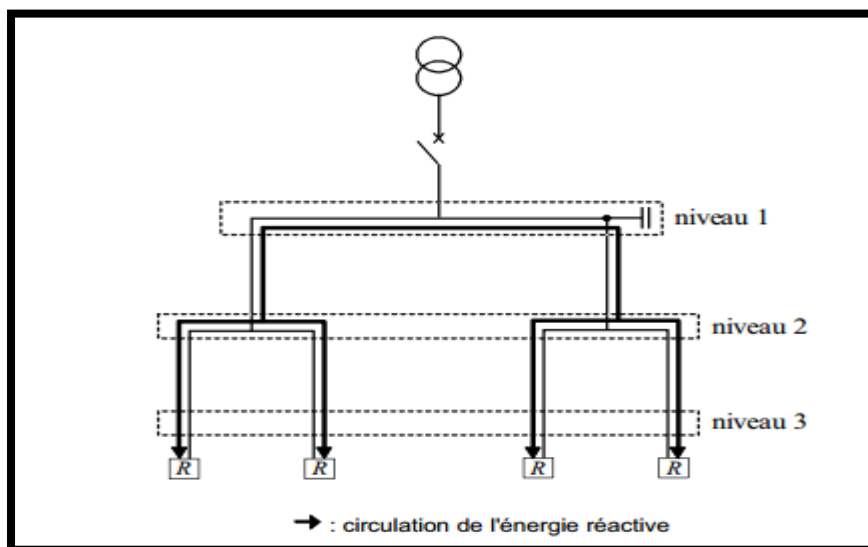


Figure III.13 : Compensation globale [45]

C /- Compensation automatique :

Les batteries de condensateurs sont divisées en gradins (voir figure.III.14). La valeur du $\cos \phi$ est détectée par un relais varométrique qui commande automatiquement l'enclenchement et le déclenchement des gradins en fonction de la charge et du $\cos \phi$ désiré.

Le transformateur de courant doit être placé en amont des récepteurs et des batteries de condensateurs.

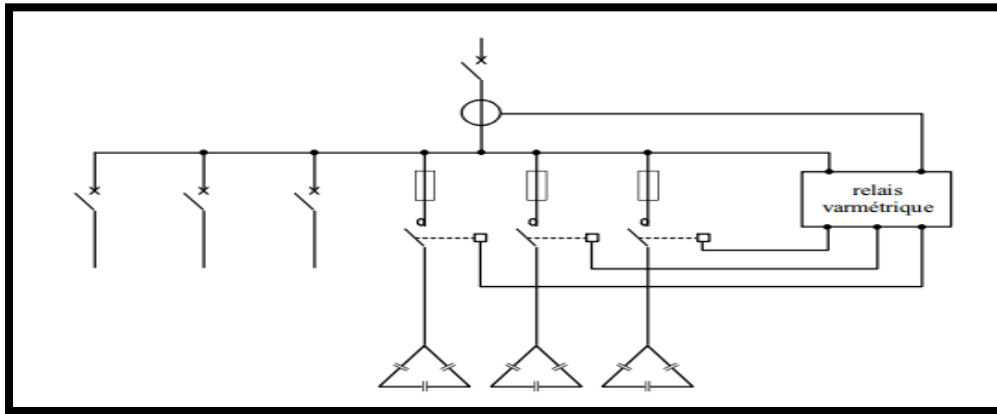


Figure III.14: Principe de la compensation automatique d'une installation[44]

III.3.3. Composantes active et réactive du courant et de la puissance :

III.3.3.1. Composantes active et réactive du courant :

A chacune de ces énergies active et réactive correspond un courant.

Le courant actif (I_a) est en phase avec la tension du réseau.

Le courant réactif (I_r) est déphasé de 90° par rapport au courant actif, en arrière (récepteur inductif) ou en avant (récepteur capacitif).

Le courant apparent (I_t) total est le courant résultant qui parcourt le câble électrique depuis la source jusqu'au récepteur. Ce courant est déphasé d'un angle ϕ par rapport au courant actif (ou par rapport à la tension).

Pour un courant ne comportant pas de composantes harmoniques (voir figure III.15), ces courants se composent vectoriellement en valeurs efficaces comme indiqué sur la figure suivante.

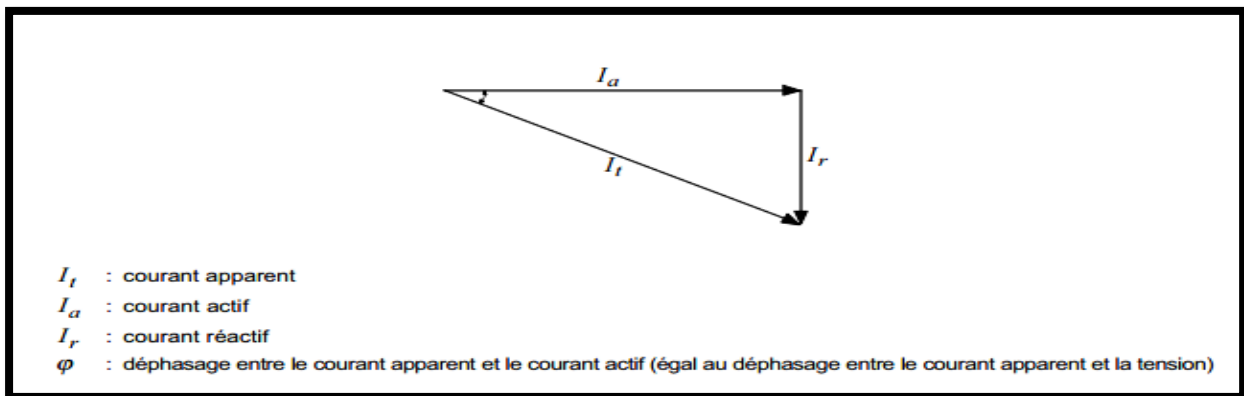


Figure III.15: Composantes vectorielles des courants actif, réactif et apparent

Les courants actifs, réactif, apparent et le déphasage sont liés par les relations suivantes :

$$I_t^2 = \sqrt{I_a^2 + I_r^2} \tag{II-1}$$

$$I_a = I_t \cos(\phi) \tag{II-2}$$

$$I_r = I_t \sin(\phi) \tag{II-3}$$

Dans le cas d'absence d'harmoniques $\cos \phi$ est égal au facteur de puissance.

III.3.3.2. Composantes active et réactive de la puissance :[45]

Pour des courants et des tensions ne comportant pas de composantes harmoniques voir figure (III.16).

le diagramme précédent établi pour les courants est aussi valable pour les puissances ; il suffit de multiplier chaque courant par la tension du réseau.

On définit ainsi, pour un circuit monophasé :

- **La puissance active**

$$P = VI \cos(\varphi) \quad (\text{II-4})$$

- **La puissance réactive :**

$$Q = VI \sin(\varphi) \quad (\text{II-5})$$

- **La puissance apparente :**

$$S = VI \quad (\text{II-6})$$

Ces puissances se composent vectoriellement comme indiqué sur la figure (III.16)

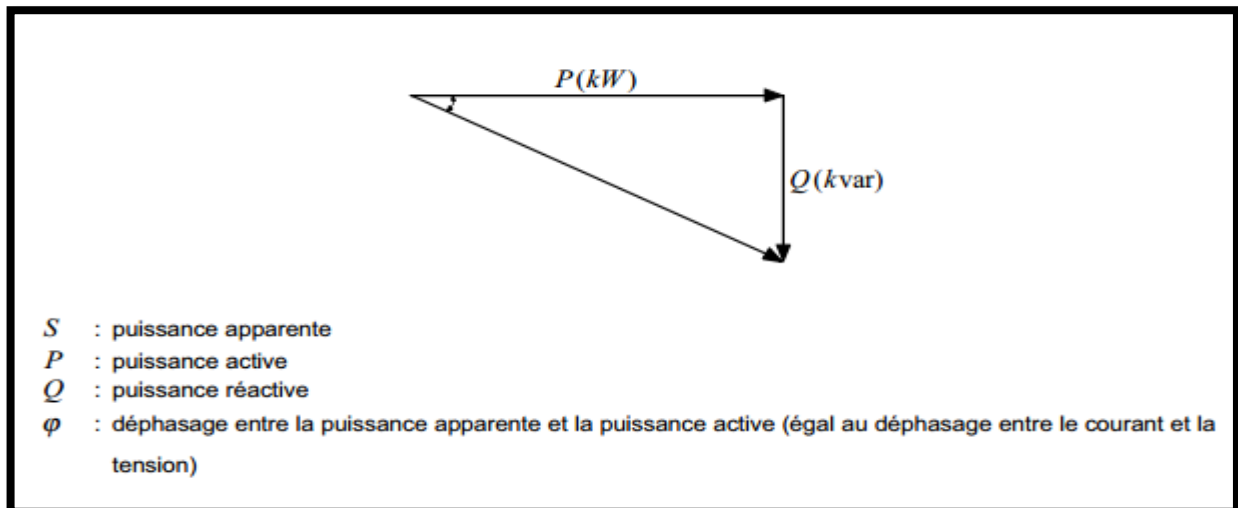


Figure III.16: Composantes vectorielles des puissances active, réactive et apparente.[44]

Dans le cas d'absence d'harmoniques, les expressions des puissances active, réactive et apparente sont les suivantes :

$$P = VI \cos(\varphi) \quad (\text{II-7})$$

$$Q = VI \sin(\varphi) \quad (\text{II-8})$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (\text{II-9})$$

Dans ce cas $\cos(\varphi) = \frac{P}{S}$ est appelé facteur de puissance.

III.3.4. Compensation d'énergie réactive en présence d'harmoniques :

Les équipements faisant appel à l'électronique de puissance (variateurs de vitesse, redresseurs, onduleurs, etc.), de plus en plus utilisés, sont responsables de la circulation de courants harmoniques dans les réseaux. Ces harmoniques perturbent le fonctionnement de nombreux dispositifs. En particulier, les condensateurs y sont extrêmement sensibles du fait que leur impédance décroît proportionnellement au rang des harmoniques présents.

Dans certaines circonstances, des phénomènes de résonance peuvent se produire entraînant une forte distorsion de tension et la surcharge des condensateurs. Selon la puissance des générateurs d'harmoniques présents, différents types de condensateurs doivent être choisis, associés éventuellement à des inductances.

Pour les valeurs élevées de puissance des générateurs d'harmoniques, le traitement des harmoniques est en général nécessaire. Le dispositif approprié (filtre d'harmonique) remplit à la fois les fonctions de compensation d'énergie réactive et de filtrage des harmoniques.[44]

III.5. CONCLUSION :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes solutions traditionnelles et modernes de dépollution. Les solutions classiques ne sont pas très efficaces pour traiter ce problème. Les filtres passifs sont souvent pénalisés en termes d'encombrement et de résonance. Nous avons aussi présenté les différentes topologies des filtre actif série et parallèle.

Le filtre actif parallèle peut être installé pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive et filtre actif série peut être installé pour compenser toutes les perturbations de tension comme les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension.

La combinaison parallèle-série actifs est la solution universelle pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension.

Le chapitre suivant, fera l'objet d'une étude de la simulation d'un filtre actif parallèle.

Chapitre IV :

**Modélisation du Filtre
Actif Parallèle et Résultats
de Simulation**

IV.1. Introduction :

Dans ce chapitre nous avons présenté la simulation de la commande du filtre actif parallèle à base d'un onduleur de tension de deux niveaux, pour différentes méthodes d'identification des harmoniques: la méthode des puissances instantanées (pq) et la théorie de référentiel synchrone (dq). La simulation du système de filtrage actif parallèle avec la technique de commande est réalisée avec le logiciel Matlab.

Le calcul des courants de références se fait par utilisation des techniques d'identification approuvées, cette méthode de détection des harmoniques est la partie la plus importante de FAP.

La méthode d'identification à partir de la détection du courant de la charge polluante, est la plus appropriée au filtre actif parallèle [45], c'est pourquoi cette méthode de détection sera utilisée dans notre étude.

IV.2. Modélisation de l'association réseau- filtre actif- charge polluante :

IV.2.1. Description du système :

Le système utilisé dans cette partie est composé d'une source triphasée, d'une charge non linéaire et d'un filtre actif parallèle formé par un onduleur de tension à trois bras avec des semi-conducteurs (IGBT) et sans neutre raccordé. Le stockage de l'énergie du côté continu est réalisé par un condensateur. Pour raccorder l'onduleur au réseau et le commander en courant il est nécessaire d'utiliser un filtre de raccordement de nature inductive pour filtrer les courants de hautes fréquences. Bien sûr un système de commande s'ajoutera dans le système global pour commander le filtre actif parallèle.[48]

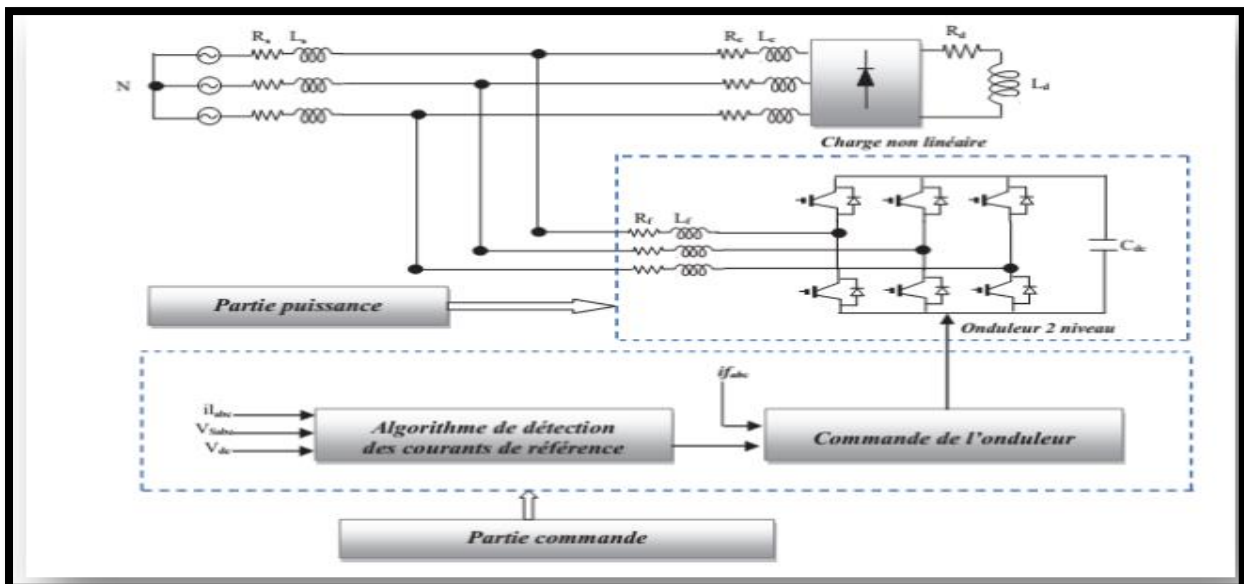


Figure IV.1: Schéma global du système de compensation [29]

IV.2.2. Modélisation du réseau:

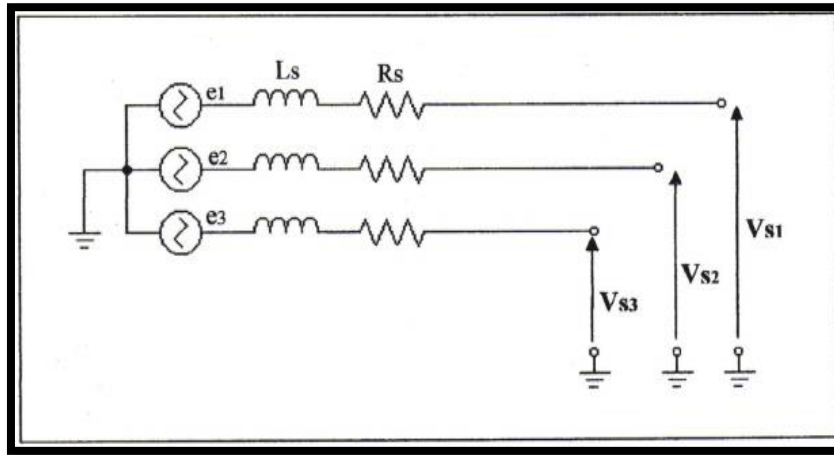


Figure IV.2: Schéma synoptique d'un réseau triphasé [29]

Le réseau est assimilable à une source de tension sinusoïdale en série avec une impédance, dite de court-circuit, d'où la représentation du réseau par un système de F.E.M triphasées équilibrées en série avec une impédance (figure IV.2) [50].

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \sqrt{2} \cdot E \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \tag{IV.1}$$

IV.2.2. Modélisation de la charge polluante (Redresseur triphasé) :

Pour tester le filtre actif on a opté pour une charge polluante qui est un pont redresseur triphasé, représenté par la figure(IV.3).

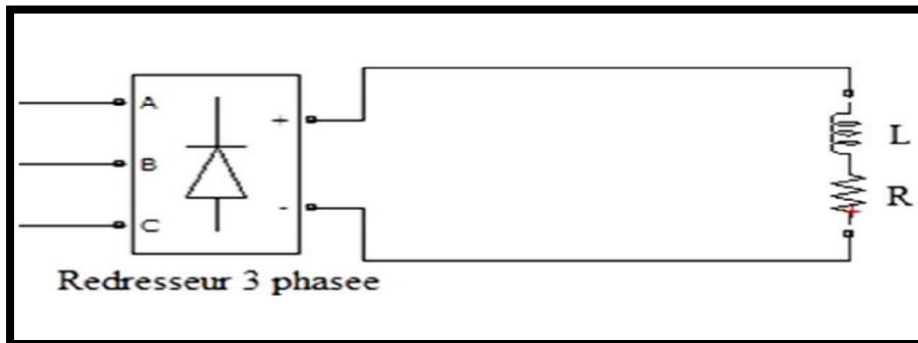


Figure IV.3 charge polluante.

IV.2.3 Modélisation du filtre actif (l'onduleur) :

On peut réaliser un onduleur de tension triphasé en groupant trois demi ponts monophasé la figure(IV.4) représente un onduleur triphasé de tension. Il se compose de trois bras à interrupteurs réversible en courant, commandé à la fermeture et à l'ouverture ,réalisé à partir d'un (GTO ou IGTB) et une diode en antiparallèle.[44]

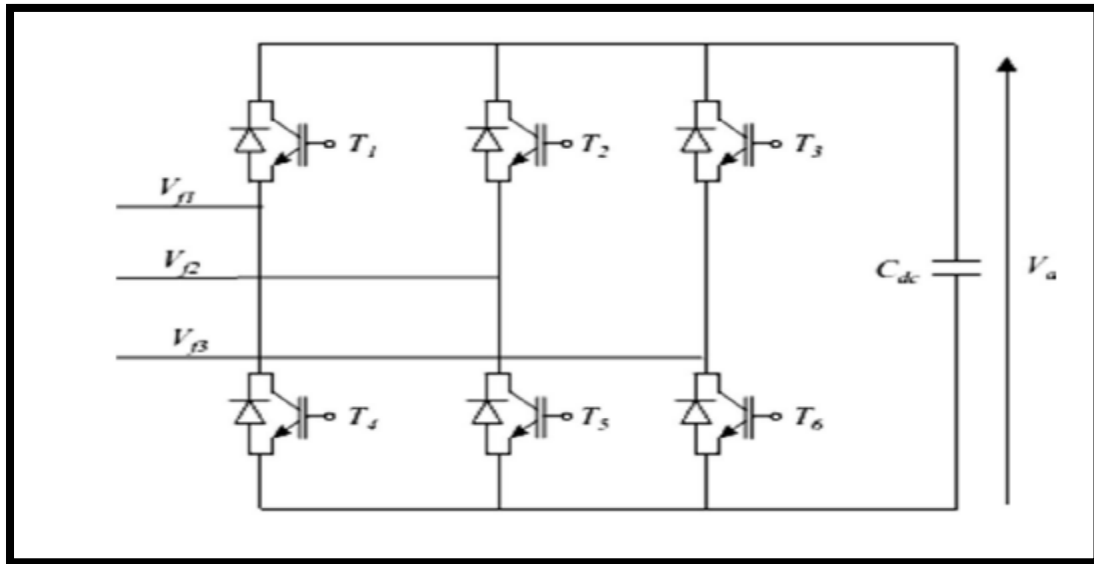


Figure IV.4 : Présentations d'un onduleur triphasé

IV.3. Modélisation des méthodes d'identification des harmoniques :

IV.3.1. Méthode de puissance instantanée :

Elle est basée sur les valeurs instantanées dans les systèmes d'alimentation triphasés avec ou sans neutre, en plus elle est valable pour les opérations en régime permanent ou transitoire.

La théorie (pq) met en œuvre une transformation d'un système de référence stationnaire en coordonnées abc, à un système de coordonnées (α - β). Elle correspond à une transformation algébrique, connu sous le nom de la transformation de Clark, qui produit également un système de référence fixe, où les coordonnées (α - β) sont orthogonales les une saux autres [45].

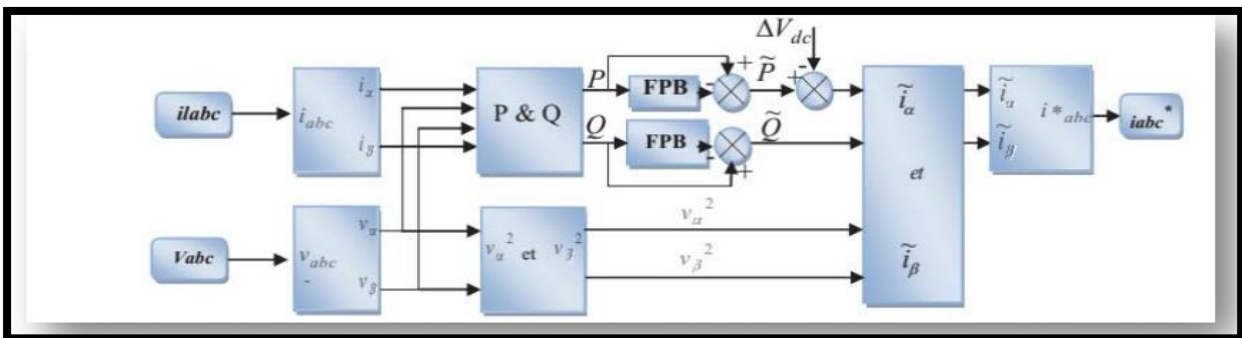


Figure IV.5 : Principe de la méthode (pq). [45]

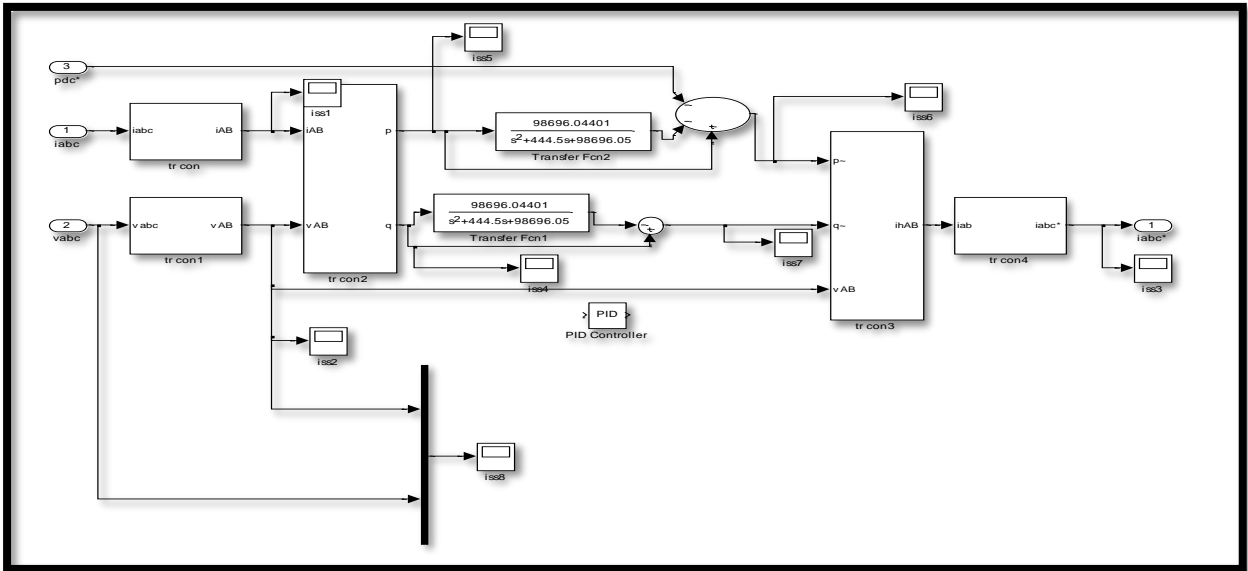


Figure IV.6 : Model Simulink de la méthode (pq)

IV3.2. Méthode du référentiel synchrone (dq) (SRF) :

Les transformations vectorielles des signaux d'entrées (les courants de charge pour notre cas) représentent le terme fondamentale de cette théorie ces dernières sont initialement réalisées dans les coordonnées abc (repère de référence fixe) vers les coordonnées dq (repère tournant avec la fréquence fondamentale) par la transformation de Park, pour calculer les courants de références .[45]

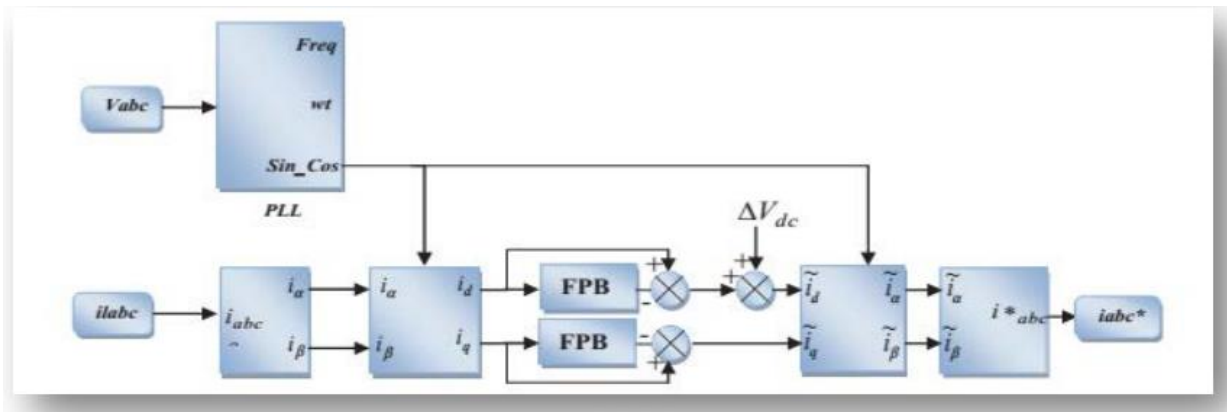


Figure IV.7 : Principe de la méthode (dq).[45]

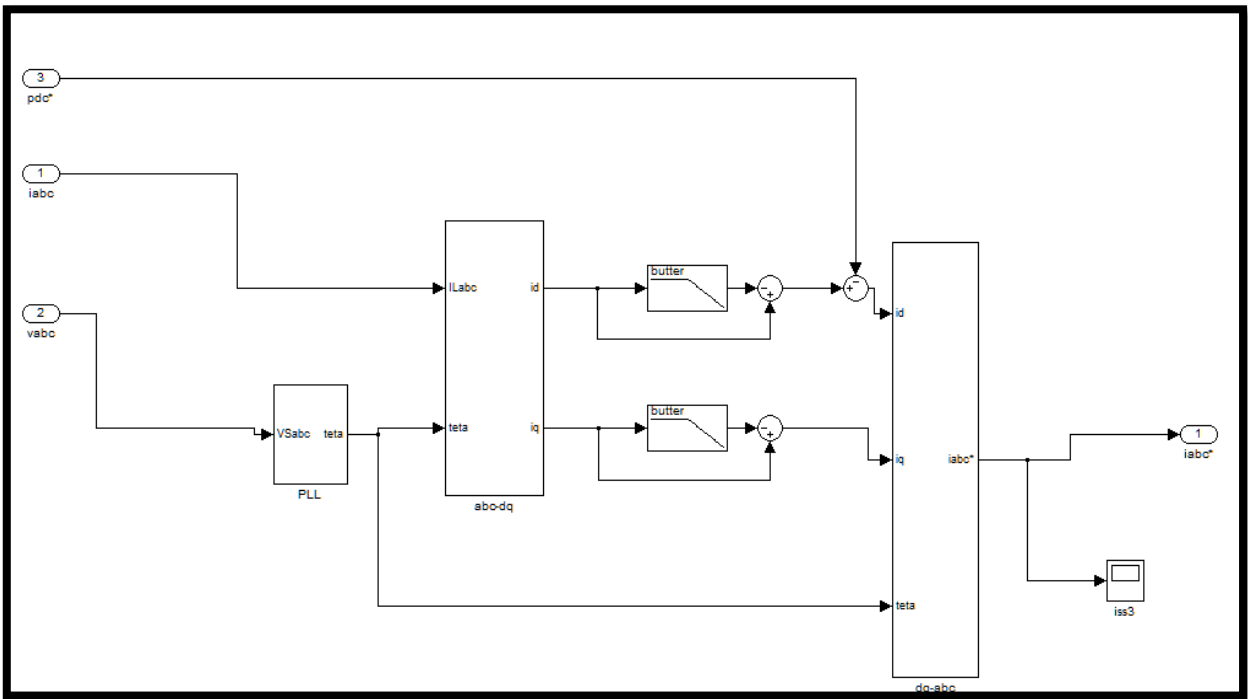


Figure IV.8 : Model Simulink de la méthode (dq)

Le bloc à verrouillage de phase (PLL phase locked loop) est une technique utilisé comme un bloc de synchronisation pour obtenir la phase de la tension instantané du réseau et maintenir l'échange des puissances contrôlées, donc ce travail demande que l'onduleur dise toujours être synchronisé avec le réseau.

IV.4. Modélisation de la commande de l'onduleur :

IV.4.1. Commande par hystérésis :

La commande par hystérésis, contribue à la dénomination de commande en tout ou rien, et à un but de contrôler les courants de compensation en les forçant à suivre ceux de référence.

Un système de base pour le contrôle de la bande d'hystérésis est représenté sur la Figure (IV.9) [52]

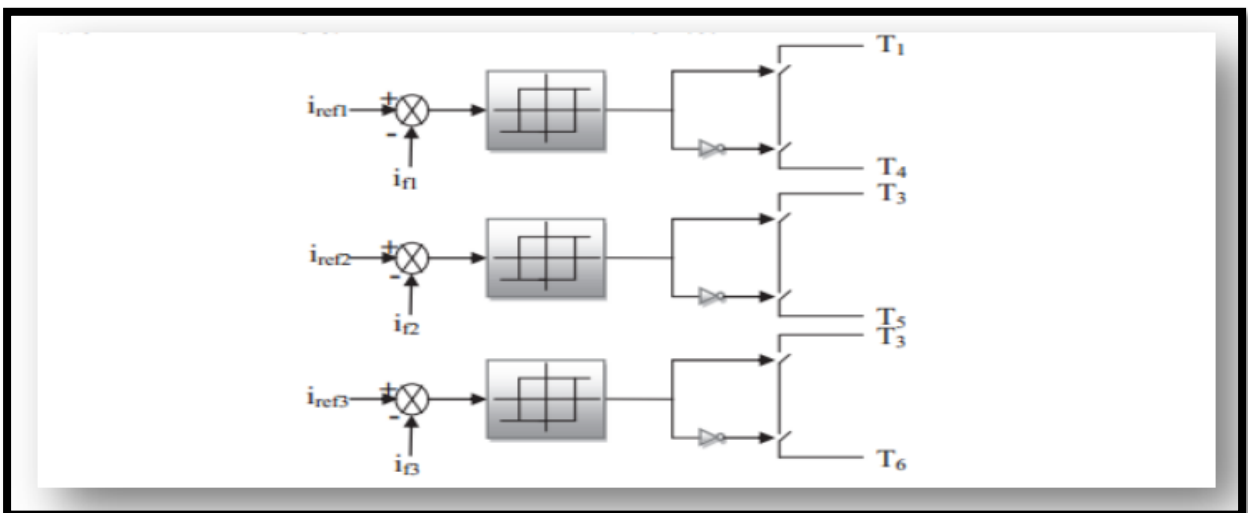


Figure IV.9 : Principe de commande par hystérésis. [46]

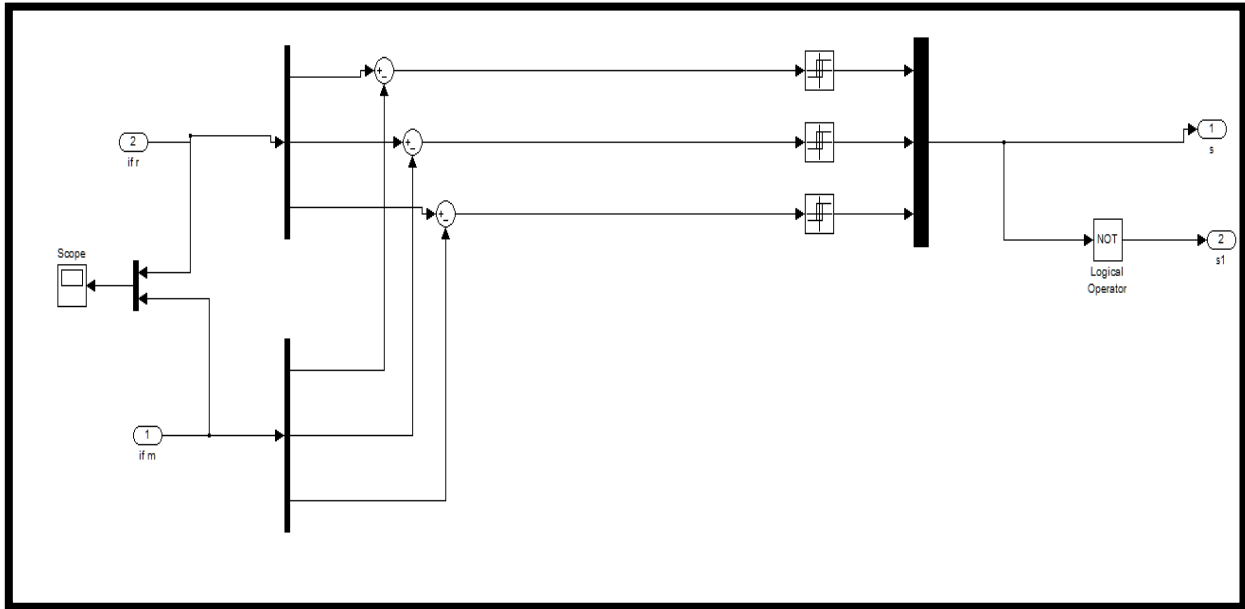


Figure IV.10 : Model Simulink de la commande hystérésis

IV.4.2. Commande par modulation de largeur d’impulsion (MLI) :

La commande par modulation de largeur d’impulsion(MLI) est la technique de commande la plus utilisé, elle résout le problème de la maîtrise 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, 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.[52]

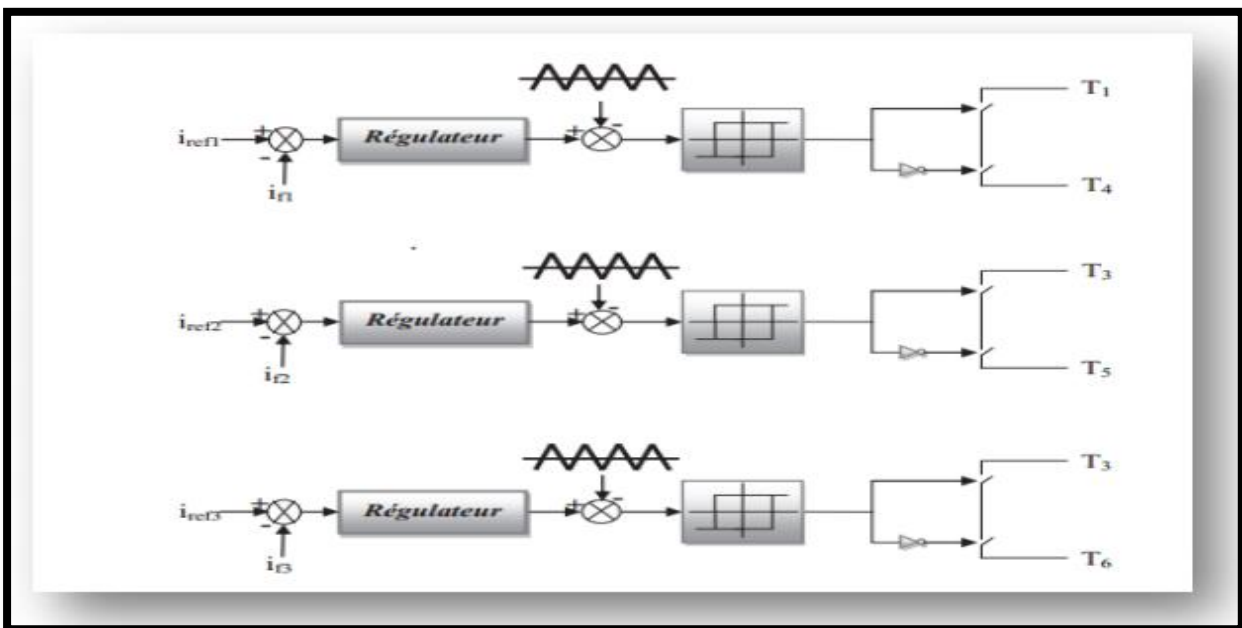


Figure IV.11 : Principe de la commande des courants par MLI. [46]

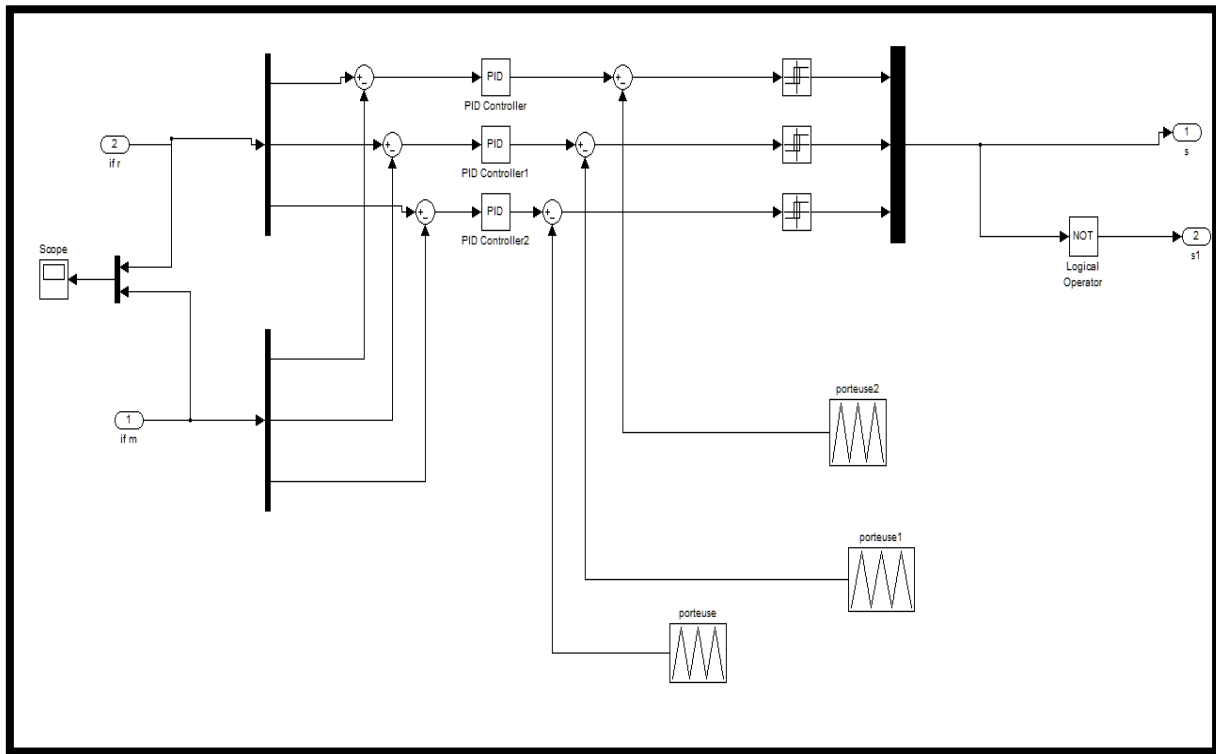


Figure IV.12 : Modalisation de commande des courants par MLI.

IV.5. Simulation numérique sous Matlab Simulink :

Dans cette partie, nous allons présenter les résultats de simulation obtenus pour les deux méthodes d'identification des courants de référence précédemment étudiées, à savoir la théorie pq, la méthode dq et pq, dans les conditions idéales « c'est à dire lorsque les tensions de source sont équilibrées et ne contiennent pas d'harmonique et lorsque la charge est équilibrée », pour les courants de charge et/ou les tensions réseau. La charge polluante est constituée par un pont redresseur triphasé à diodes et le réseau d'alimentation est un réseau triphasé.

Le réseau d'alimentation est modélisé par phase par une f.é.m. sinusoïdale en série avec une inductance (L_s) et une résistance (R_s) caractérisant l'impédance de court-circuit du réseau. Le redresseur débite dans une charge (RL). L'inductance (L_c) et la résistance (R_c) à l'entrée du redresseur modélisent l'impédance de ligne et les éventuelles inductances additionnelles mises en œuvre pour limiter les variations de courant. Un filtre actif parallèle triphasé à structure tension, Pour la commande de l'onduleur du filtre actif parallèle, nous avons utilisé la commande par hystérésis. Les paramètres de simulation sont rassemblés dans le Tableau (IV.1).

Tableau IV.1. Paramètres du système

Réseaux électrique						
Paramètres	v_s (V)	F (Hz)	R_s (Ω)	L_s (H)	R_t (Ω)	L_t (H)
Valeurs	220	50	0.0002	0.000015	0.1	0.0003 Ω
Charge non linéaire01						
Paramètres	R_d (Ω)	L_d (H)				
Valeurs	75	0.07				
Filtre actif parallèle						
Paramètres	L_f (H)	R_f (Ω)	V_{dc} (V)	C_{dc} (μ f)		
Valeurs	0.03	0.3	620	2200		
Charge non linéaire 02						
Paramètres	R_d (Ω)	L_d (H)				
Valeur	60	0.04				

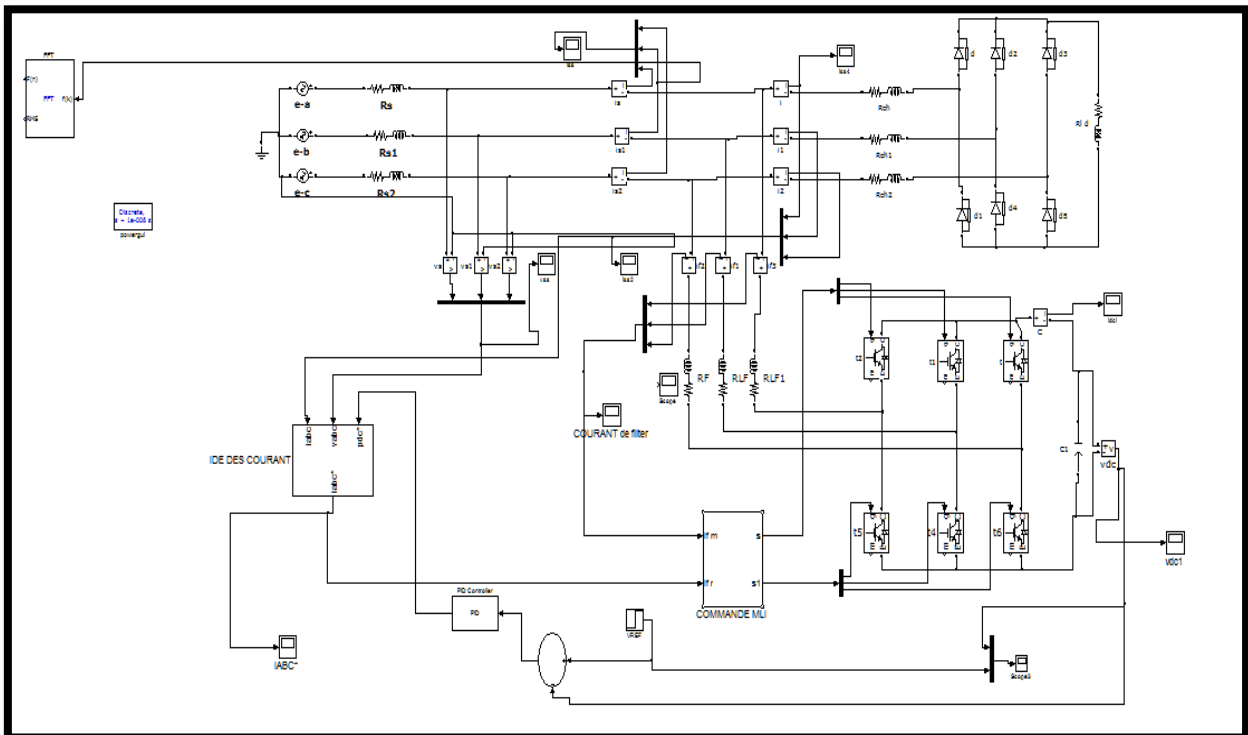


Figure IV.13 : Modèle de simulation établi sous Simulink

IV.5.1. Résultat de simulation :

IV.5.1.1. Résultat de Simulation avant le filtrage :

Les figures (I.V.14I.V.46) montrent respectivement le courant et la tension de la source avant l’insertion du filtre actif parallèle ainsi que les spectres harmoniques.

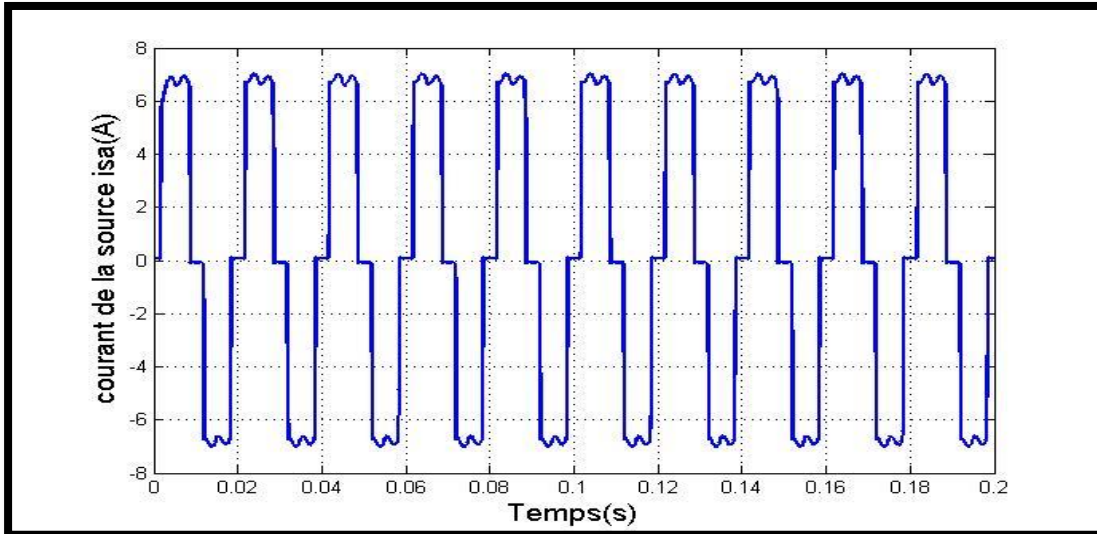


Figure IV.14 : Courant de source avant filtrage

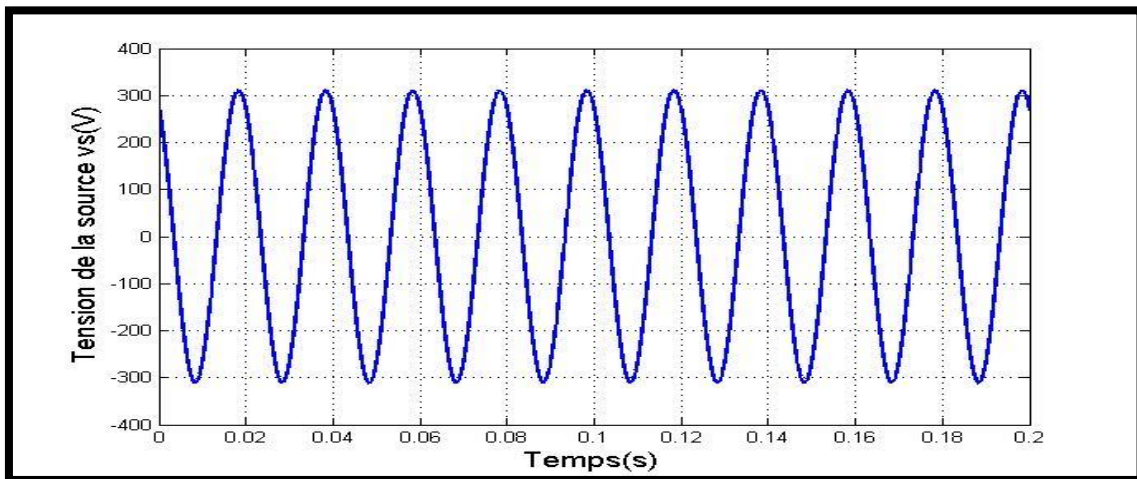


Figure IV.15: Tension de source avant filtrage

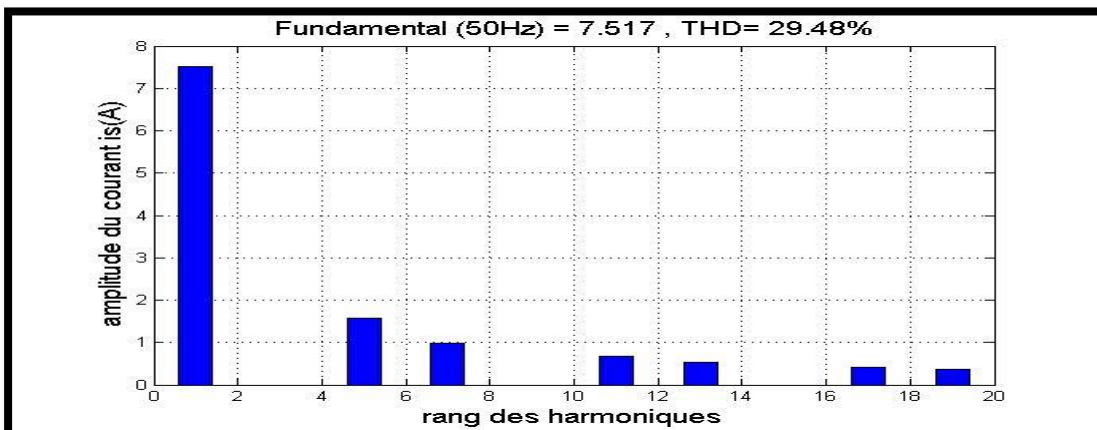


Figure IV.16: Spectre harmonique de courant de source avant filtrage

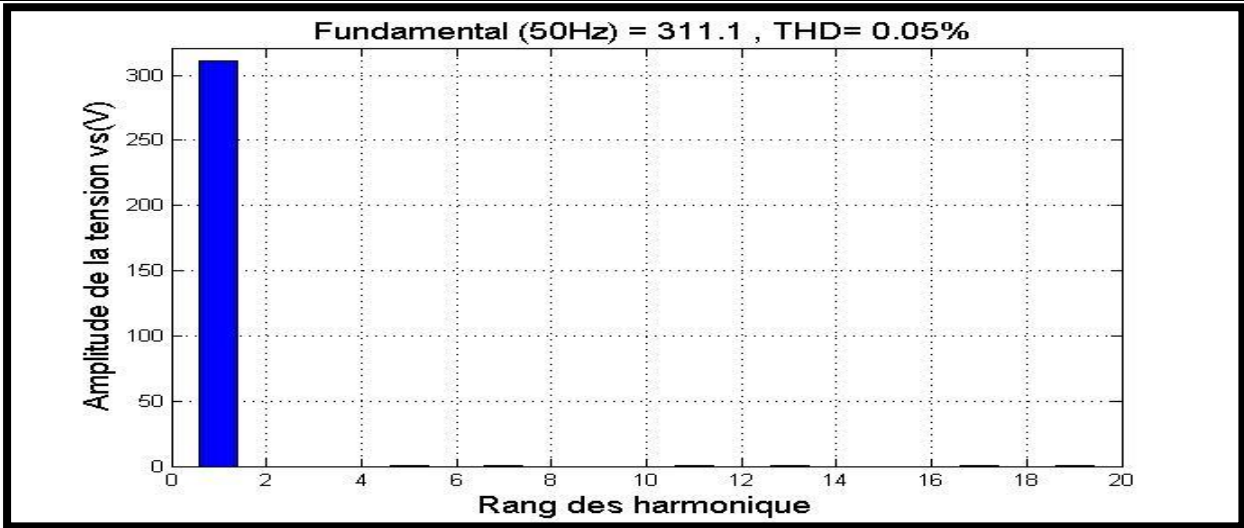


Figure IV.17: Spectre harmonique de tension de source avant filtrage

- Calcul et mesure des puissances :

$$FP = \frac{\cos(\varphi)}{\sqrt{1 + THD^2}}$$

$$P = 3 * V_1 * I_1 * \cos(\varphi_1)$$

$$Q = 3 * V_1 * I_1 * \sin(\varphi_1)$$

$$P = 3 * 220 * 5.315 * \cos(177.7^\circ) = 3505.07 \text{ W}$$

$$Q = 3 * 220 * 5.315 * \sin(177.7^\circ) = 140.77 \text{ VAR}$$

$$FP = \frac{0.99}{\sqrt{1+0.086}} = 0.95$$

$$THD = 29.48 \%$$

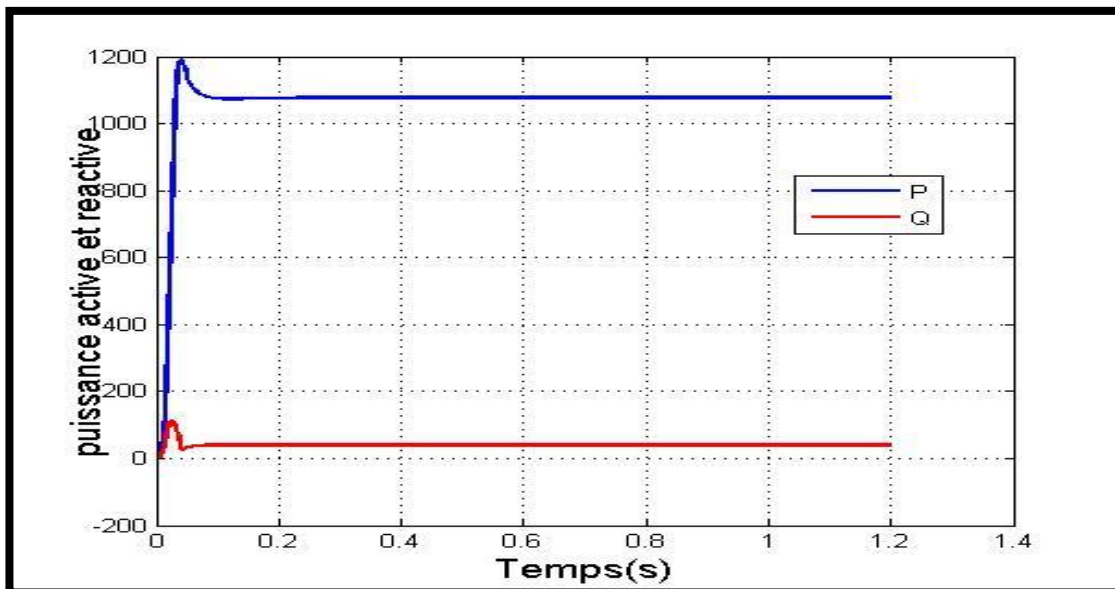


Figure IV.18: Puissance active (P) et la puissance réactive(Q) en monophasé.

À partir de ces résultats on remarque que la charge non linéaire génère des courants non sinusoïdaux qui font déformer le signal fondamental en créant des harmoniques.

L'analyse spectrale du courant absorbé par la charge est représentée dans la figure (IV.14) nous montre que plus la fondamentale (rang 1), il y a des harmoniques de rang. 5,7, 11, 13,17, 19 ...etc. avec le taux de distorsion (THD) est de 29.48%.

En plus on observe que la consommation de la puissance réactive est élevée conduite à un mauvais facteur de puissance (FP=0.46).

D'après les résultats on remarque que le courant de charge est déformé plein des harmoniques ce qui demande toujours d'un filtrage pour améliorer la qualité de l'énergie électrique et assurer un bon fonctionnement des équipements électriques.

IV.5.1.2 résultat de simulation après le FAP:

Les figures (IV. 19, IV.20, IV.21..... et IV.46) montrent respectivement le courant et la tension de source après l'insertion du filtre actif parallèle identifié par les deux méthodes : la méthode de puissance instantanée (pq) et la méthode SRF (dq), l'onduleur est commandé par deux commandes : MLI et hystérésis. Les courant de références injectées sont superposé avec le maintenir de réglage de bus continue.

IV.5.1.2.1. Charge linéaire 01 :

IV.5.1.2.1.1. Méthode de puissance instantanée :

IV.5.1.2.1.1.a). Commande par hystérésis:

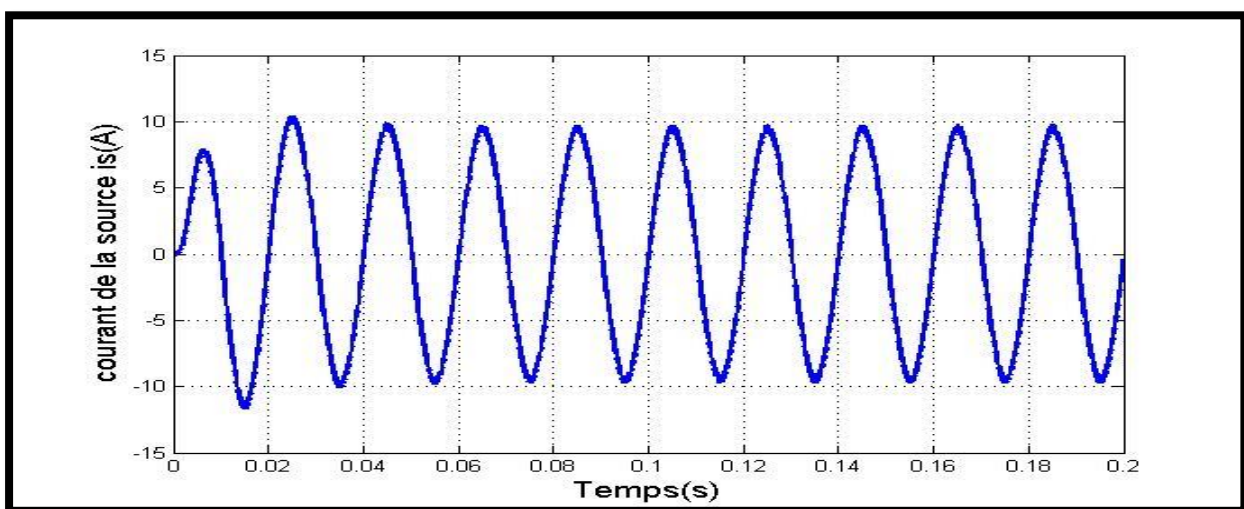


Figure IV.19: Courant de source après filtrage

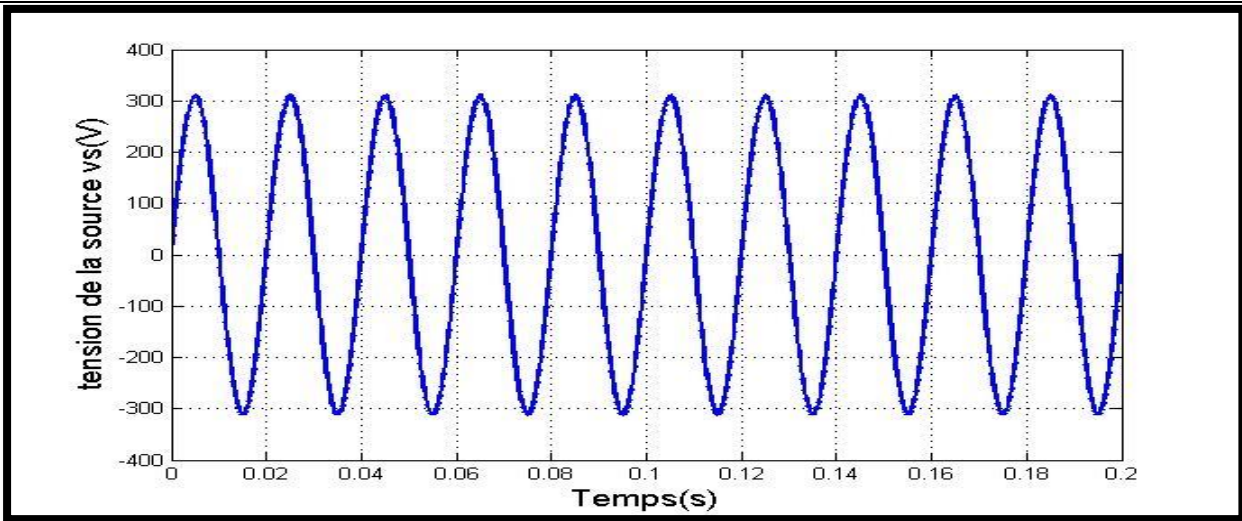


Figure IV.20: Tension de source après filtrage

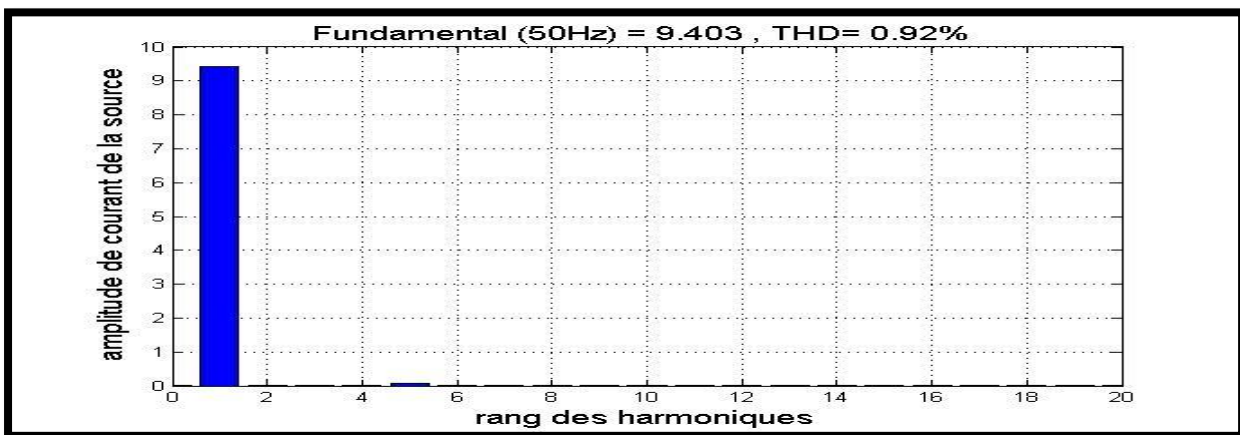


Figure IV.21: Spectre harmonique de courant de source après filtrage

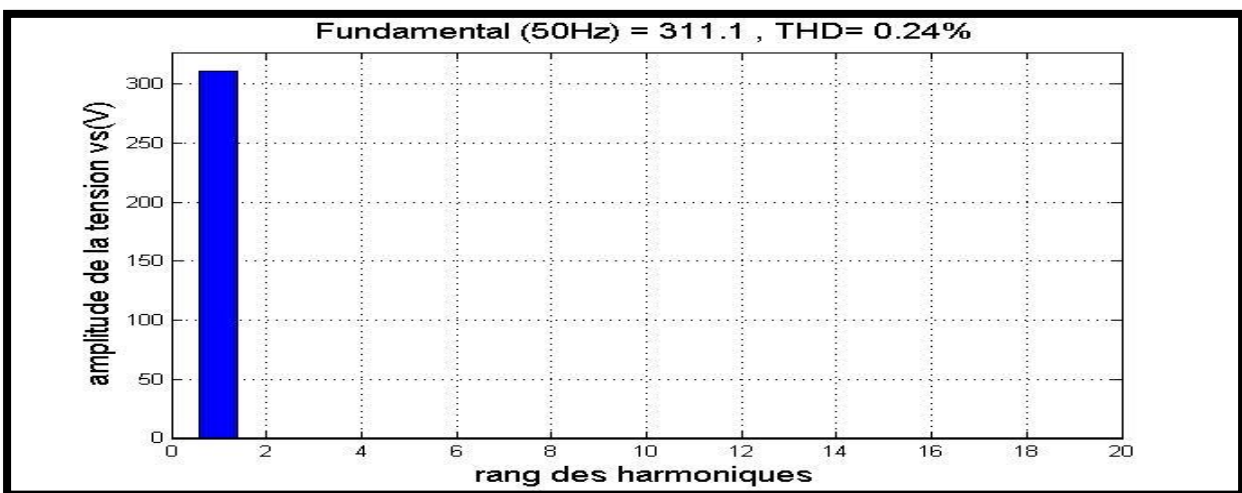


Figure IV.22: Spectre harmonique de tension de source après filtrage

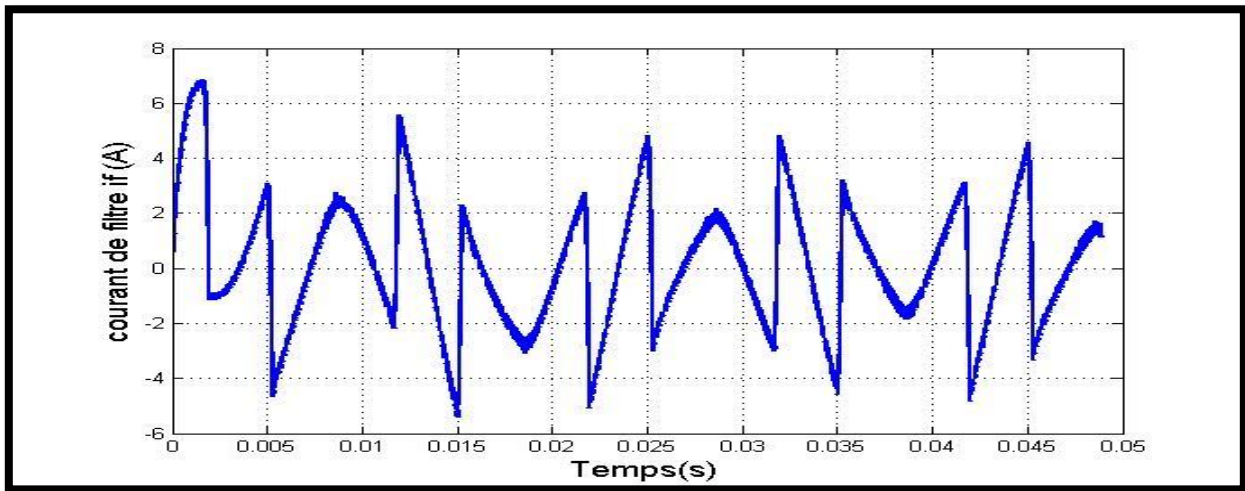


Figure IV.23: Courant injecter par le filtre actif

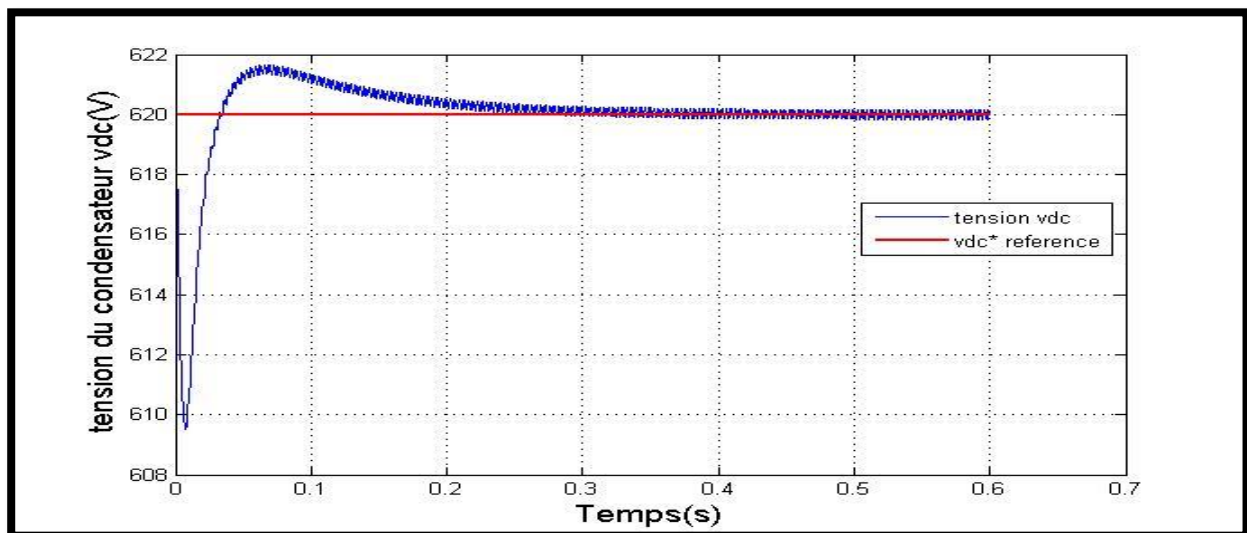


Figure IV.24: Tension V_{dc} aux bornes du condensateur

- Calcul des puissances :

$$FP = \frac{\cos(\varphi)}{\sqrt{1 + THD^2}}$$

$$P = 3 * V_1 * I_1 * \cos(\varphi_1)$$

$$Q = 3 * V_1 * I_1 * \sin(\varphi_1)$$

$$P = 3 * 220 * 5.326 * \cos(0^\circ) = 3515.16W$$

$$Q = 3 * 220 * 5.326 * \sin(0^\circ) = 0 VAR$$

$$FP = \frac{1}{\sqrt{1 + (0.0092^2)}} = 0.99$$

$$THD = 0.92 \%$$

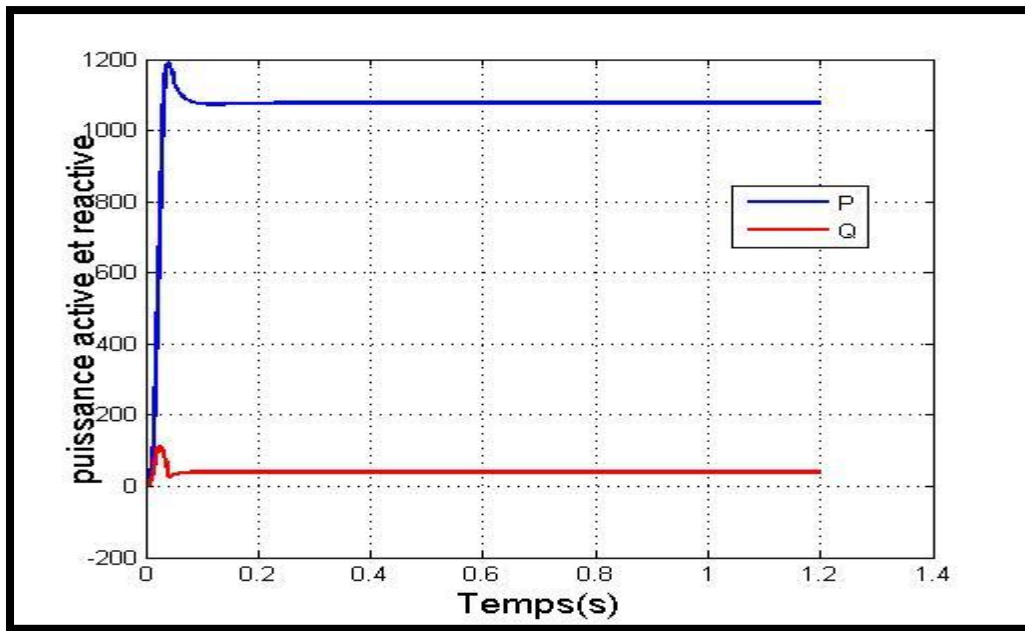


Figure IV.25: Puissance active (P) et la puissance réactive(Q)en monophasé.

IV.5.1.2.1.1.b). Commande par MLI :

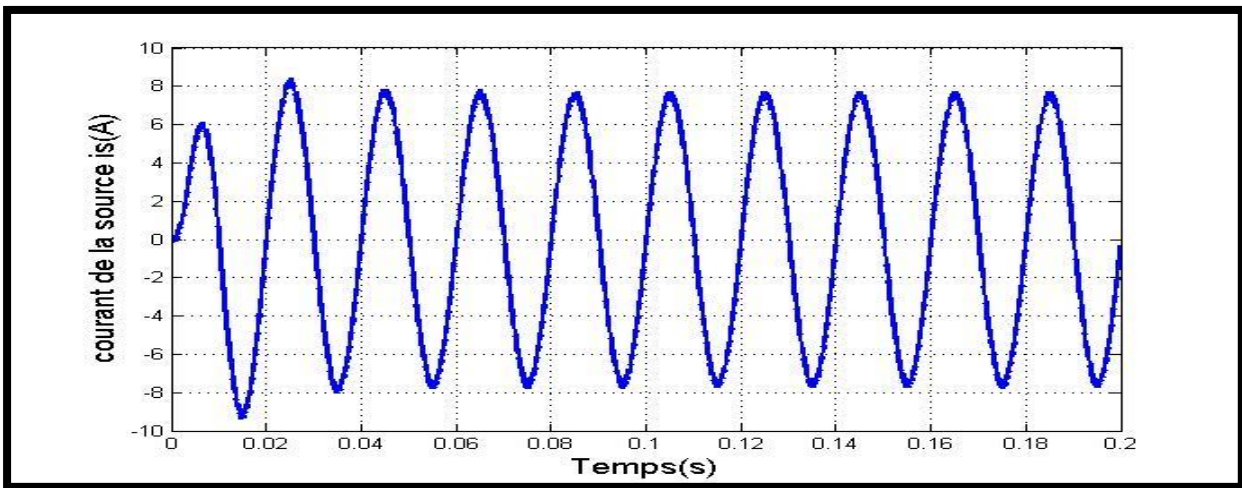


Figure IV.26: Courant de source après filtrage

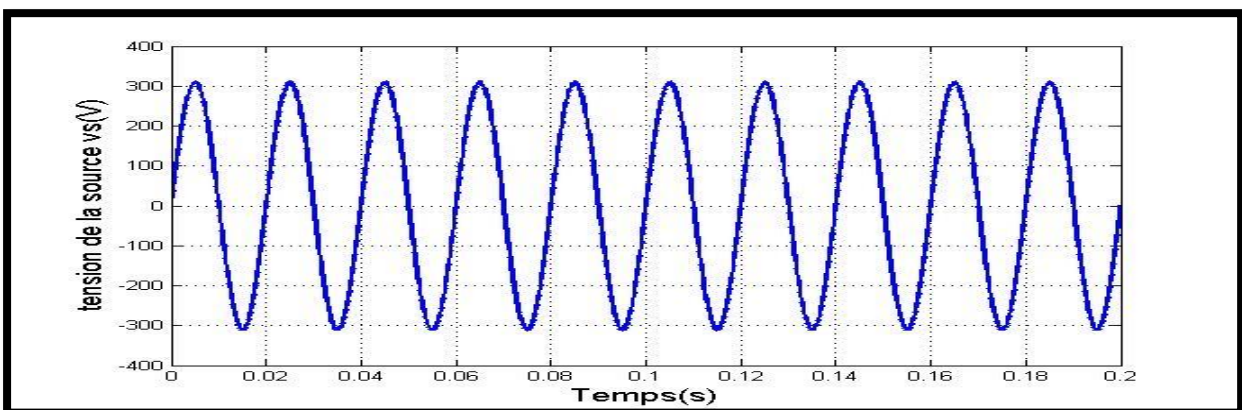


Figure IV.27: Tension de source après filtrage

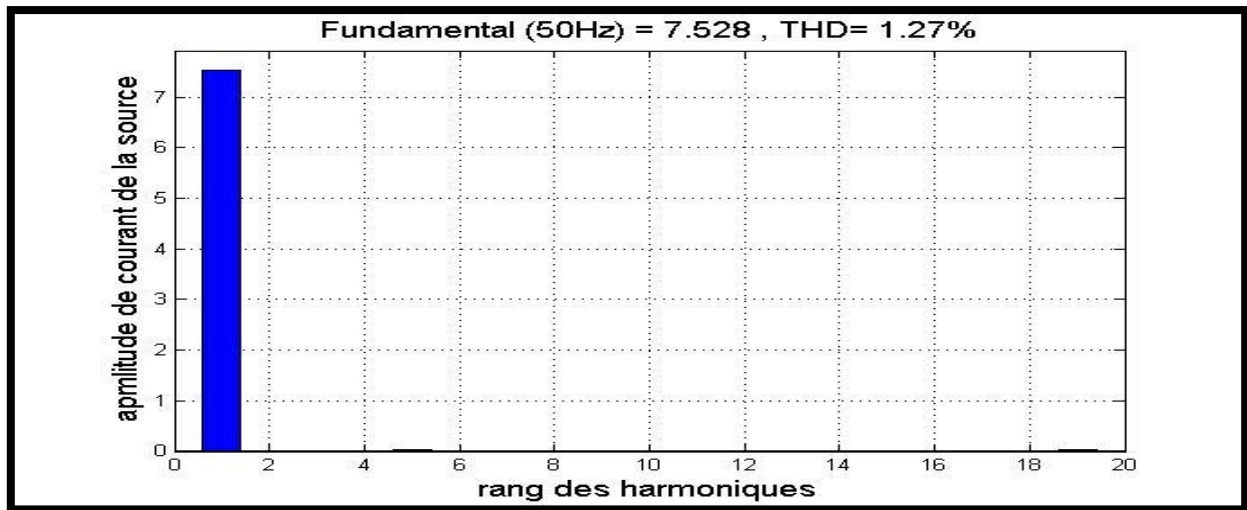


Figure IV.28: Spectre harmonique de courant de source après filtrage

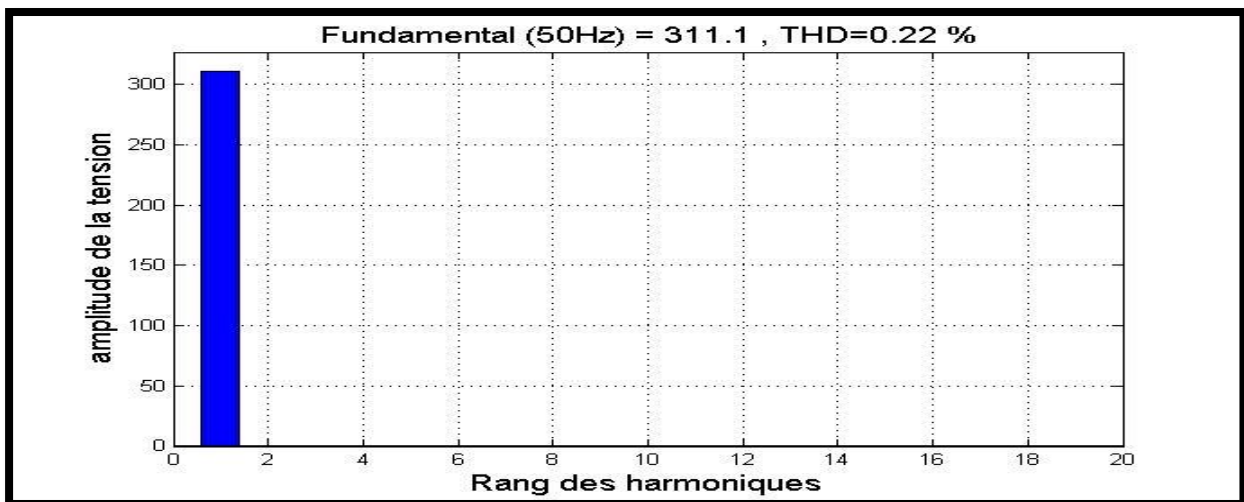


Figure IV.29: Spectre harmonique de tension de source après filtrage

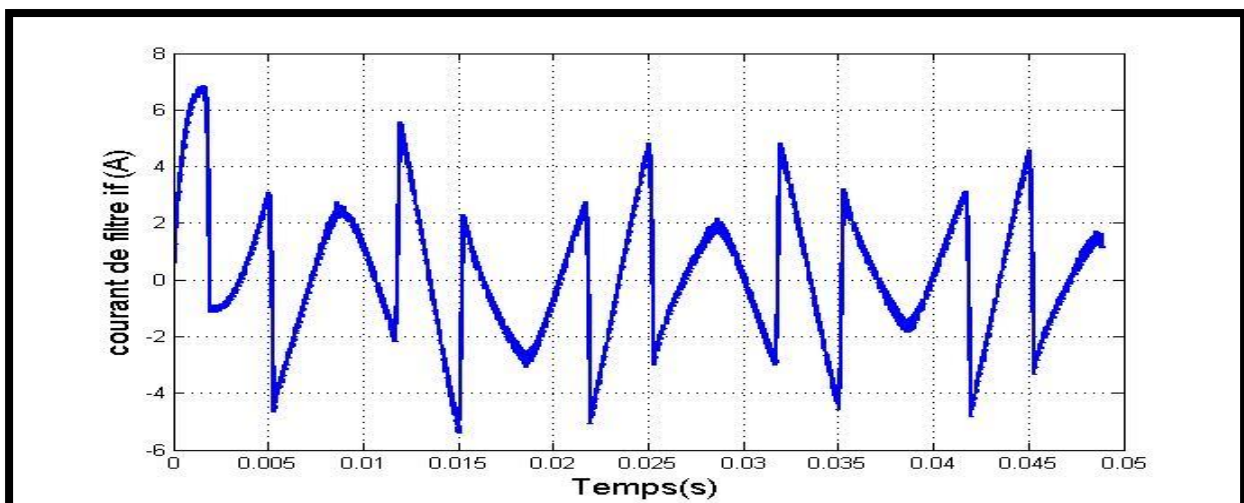


Figure IV.30: Courant injecter par le filtre actif

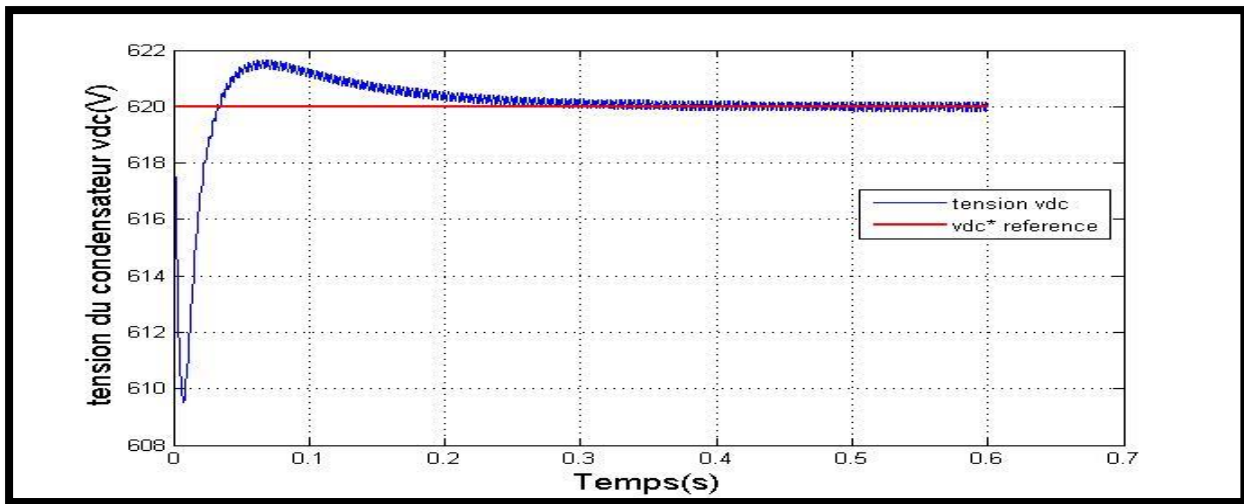


Figure IV.31: Tension V_{dc} aux bornes du condensateur

- Calcul des puissances :

$$FP = \frac{\cos(\varphi)}{\sqrt{1 + THD^2}}$$

$$P = 3 * V_1 * I_1 * \cos(\varphi_1)$$

$$Q = 3 * V_1 * I_1 * \sin(\varphi_1)$$

$$P = 3 * 220 * 5.315 * \cos(0) = 3507.9 \text{ W}$$

$$Q = 3 * 220 * 5.315 * \sin(0^\circ) = 0 \text{ VAR}$$

$$FP = \frac{1}{\sqrt{1 + 0.0016}} = 0.95$$

$$THD = 1.27\%$$

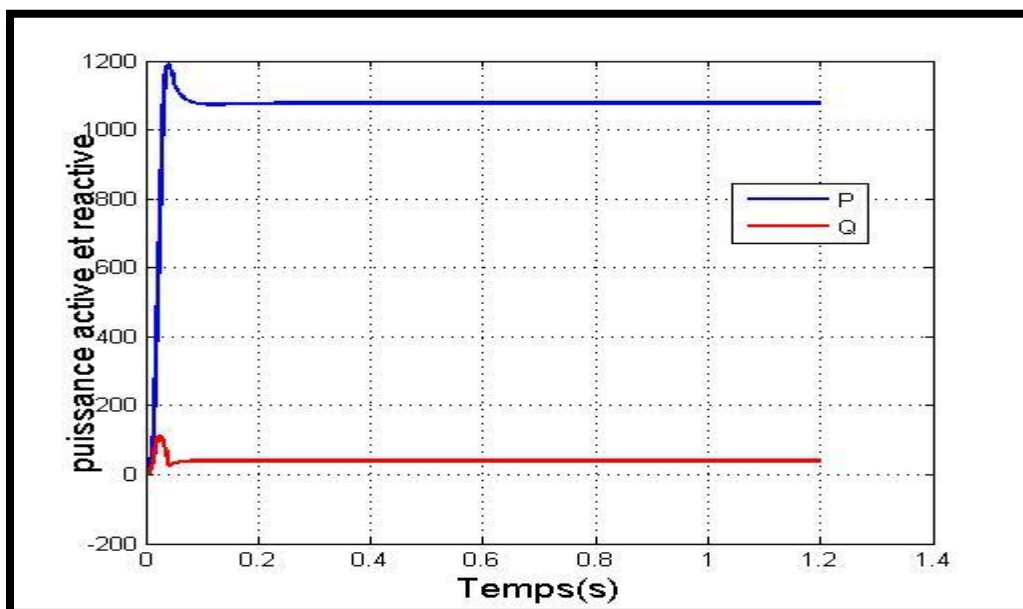


Figure IV.32: Puissance active (P) et la puissance réactive(Q) en monophasé

IV.5.1.2.1.2. Méthode du référentiel synchrone (dq) :

IV.5.1.2.1.2.a). Commande par MLI :

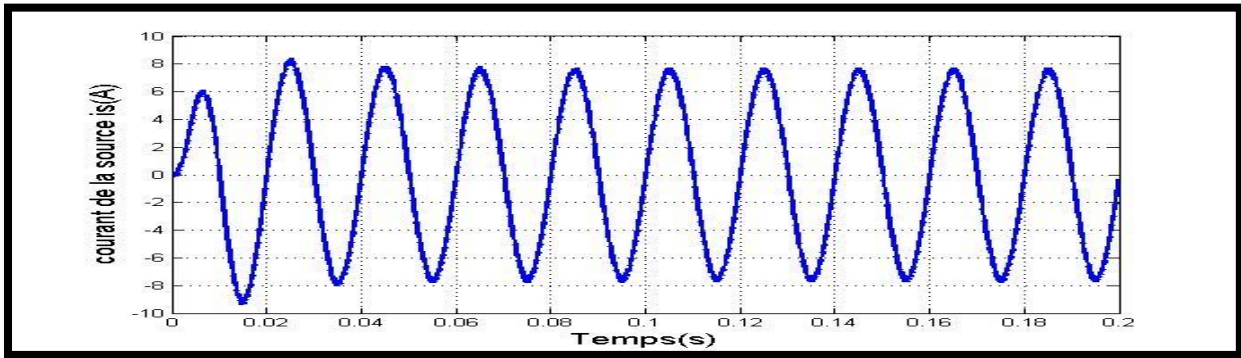


Figure IV.33: Courant de source après filtrage

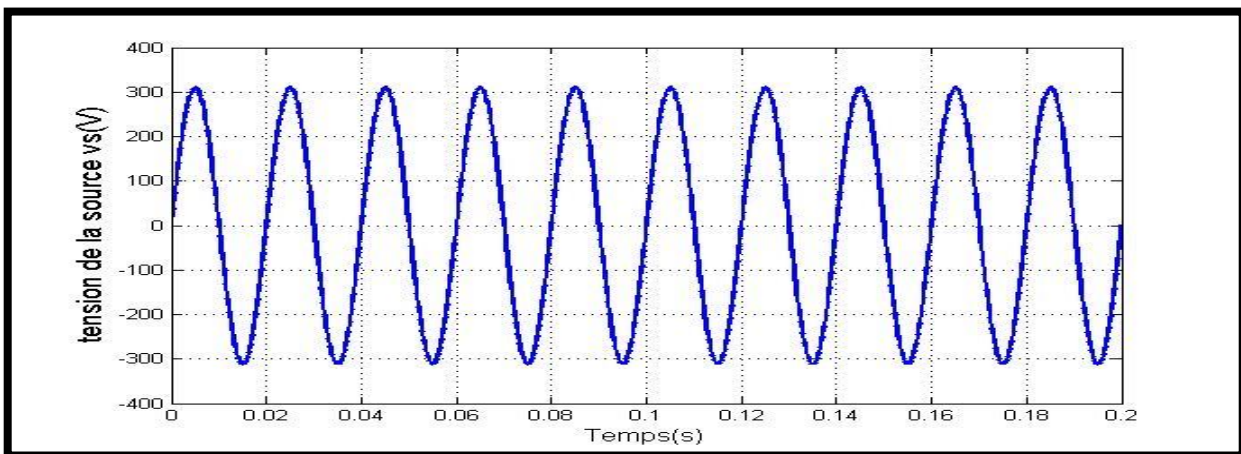


Figure IV.34: Tension de source après filtrage

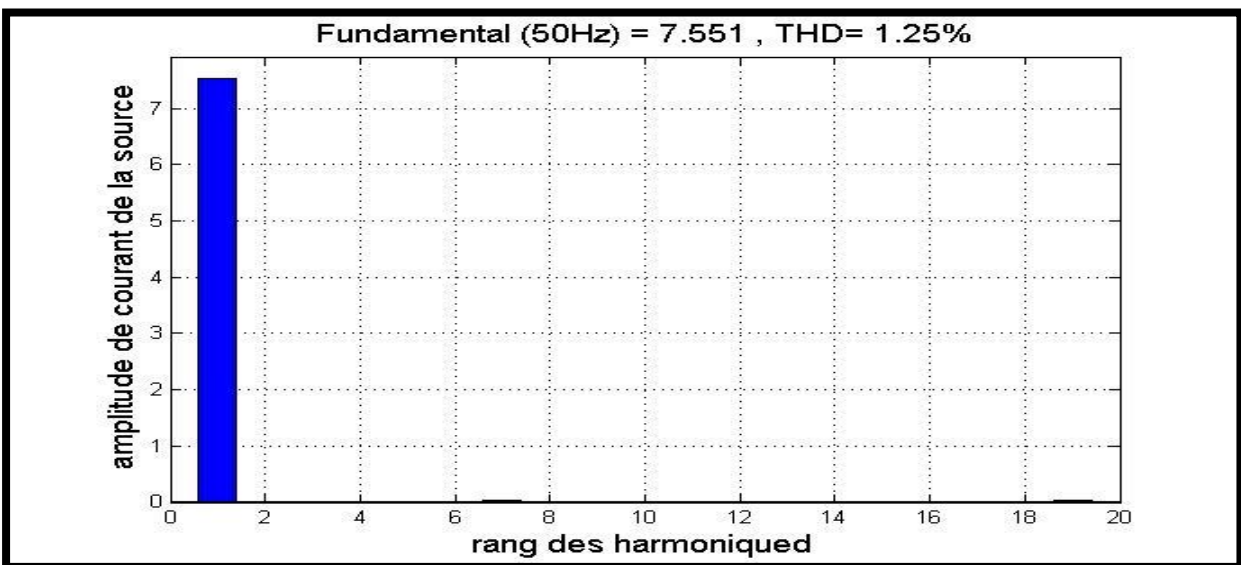


Figure IV.35: Spectre harmonique de courant de source après filtrage

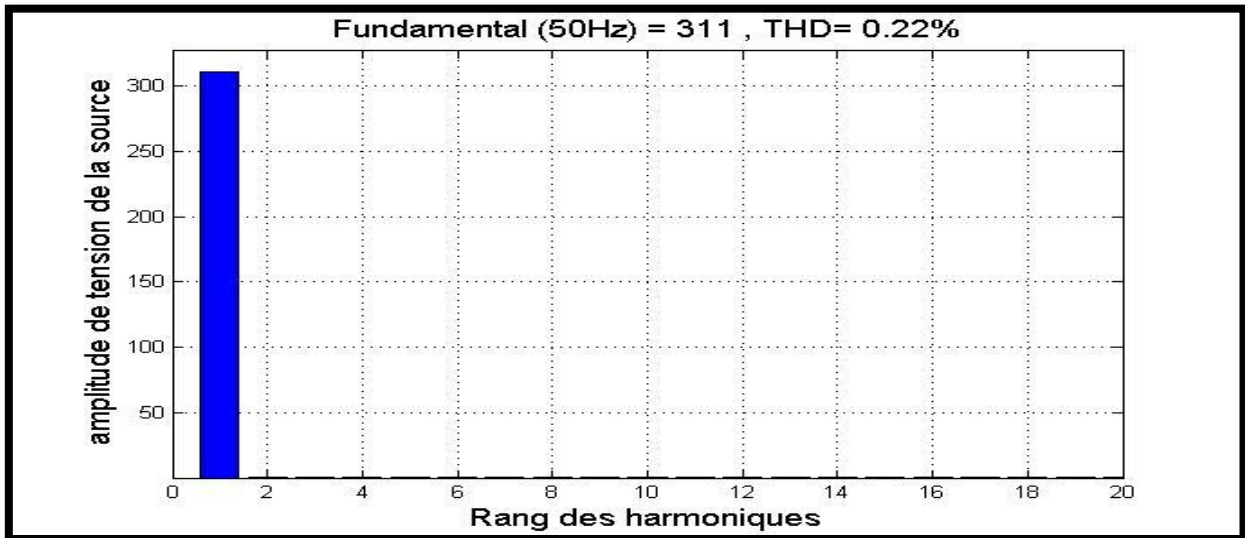


Figure IV.36: Spectre harmonique de tension de source après filtrage

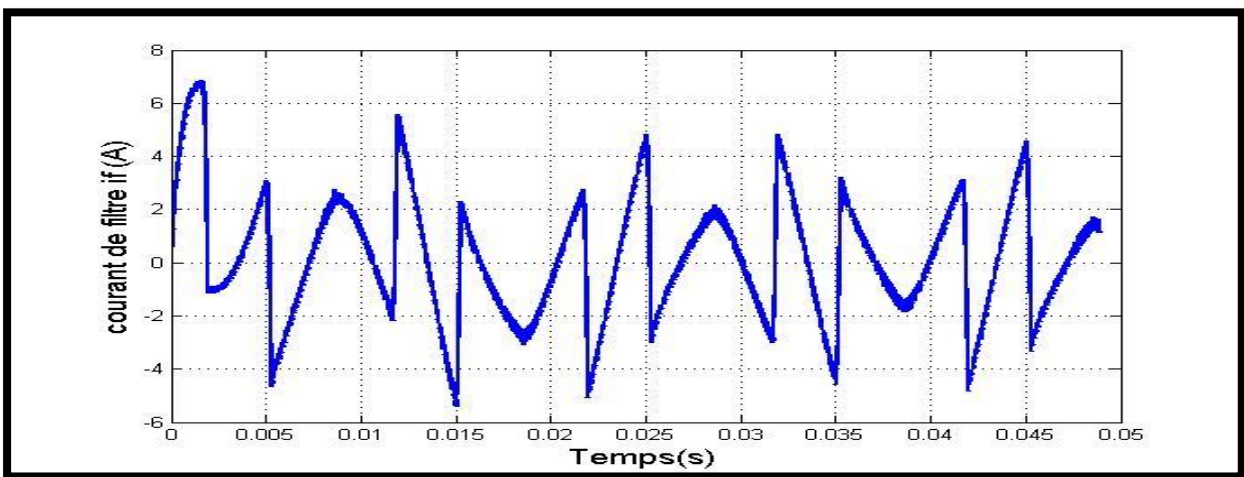


Figure IV.37: Courant injecter par le filtre actif

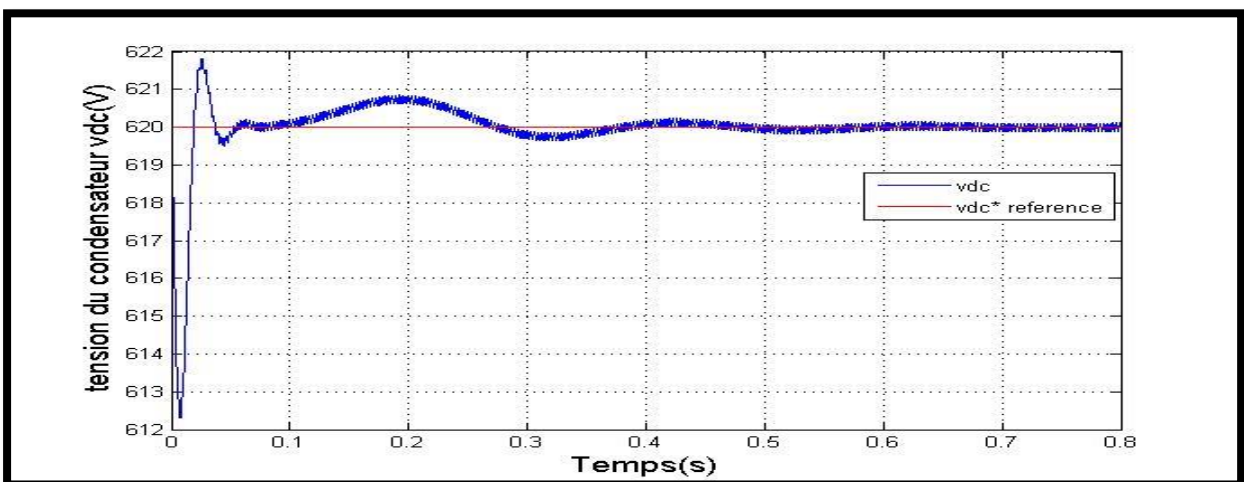


Figure IV.38: Tension V_{dc} aux bornes du condensateur

- Calcul des puissances :

$$FP = \frac{\cos(\varphi)}{\sqrt{1 + THD^2}}$$

$$P = 3 * V_1 * I_1 * \cos(\varphi_1)$$

$$Q = 3 * V_1 * I_1 * \sin(\varphi_1)$$

$$P = 3 * 220 * 5.325 * \cos(0^\circ) = 3514.07 \text{ W}$$

$$Q = 3 * 220 * 5.325 * \sin(0^\circ) = 0 \text{ VAR}$$

$$FP = \frac{0.99}{\sqrt{1 + 0.0000048}} = 0.98$$

$$THD = 0.22\%$$

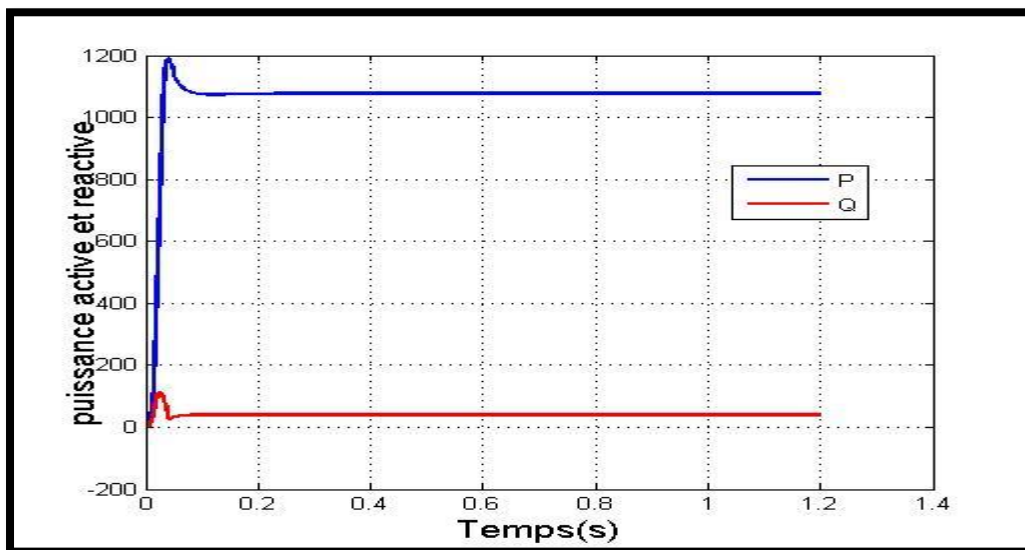


Figure IV.39: Puissance active (P) et la puissance réactive(Q) en monophasé.

IV.5.1.2.1.2.b). Commande par hystérésis

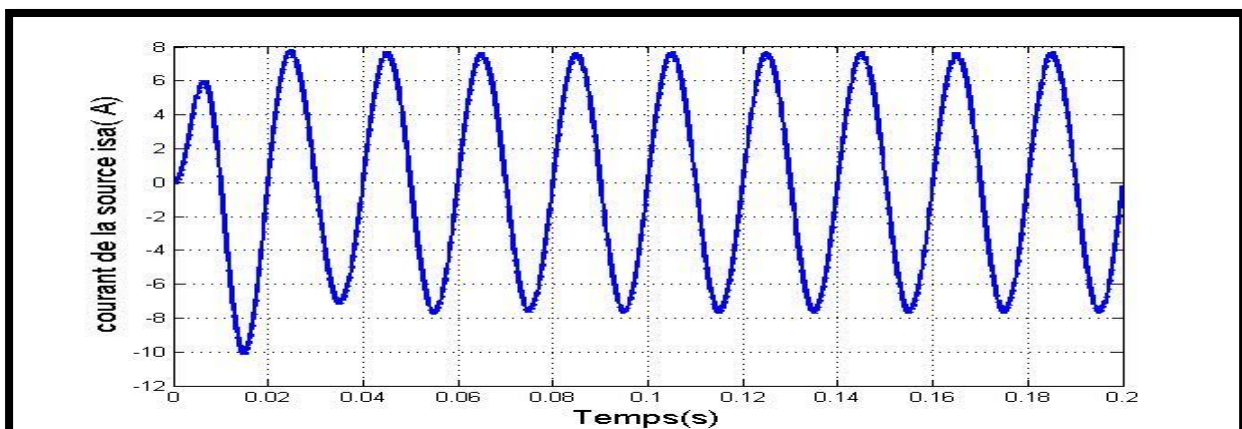


Figure IV.40: Courant de source après filtrage

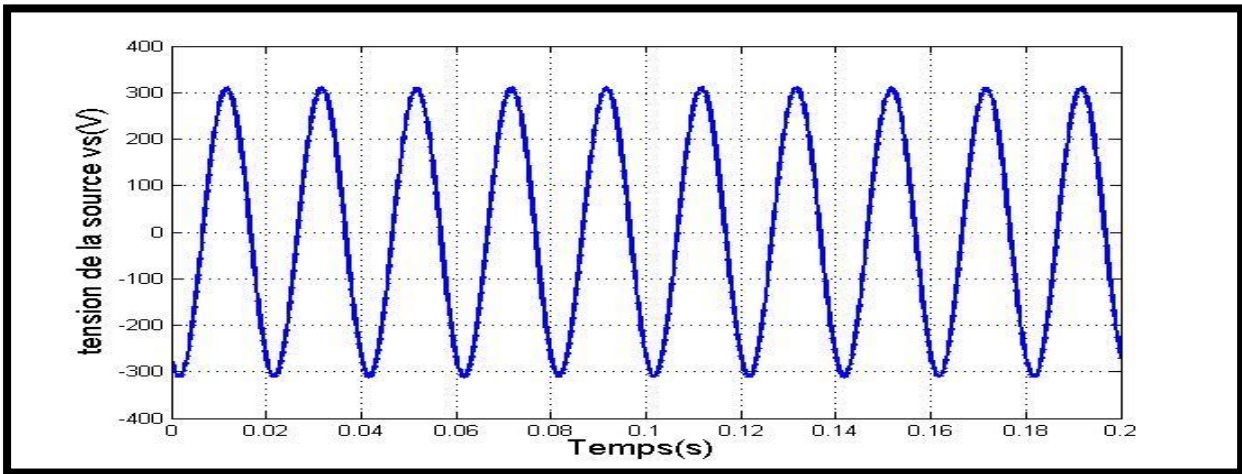


Figure IV.41: Tension de source après filtrage [49]

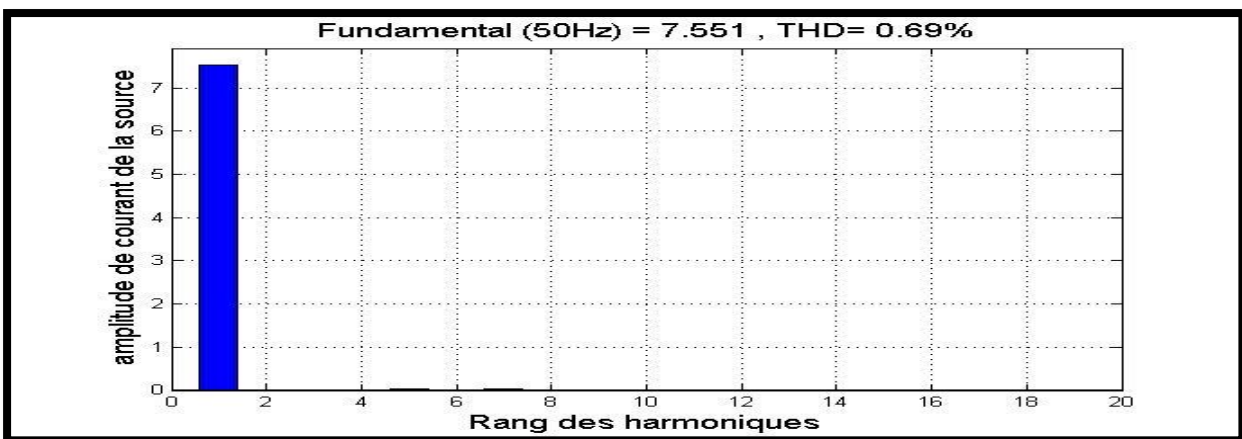


Figure IV.42: Spectre harmonique de courant de source après filtrage

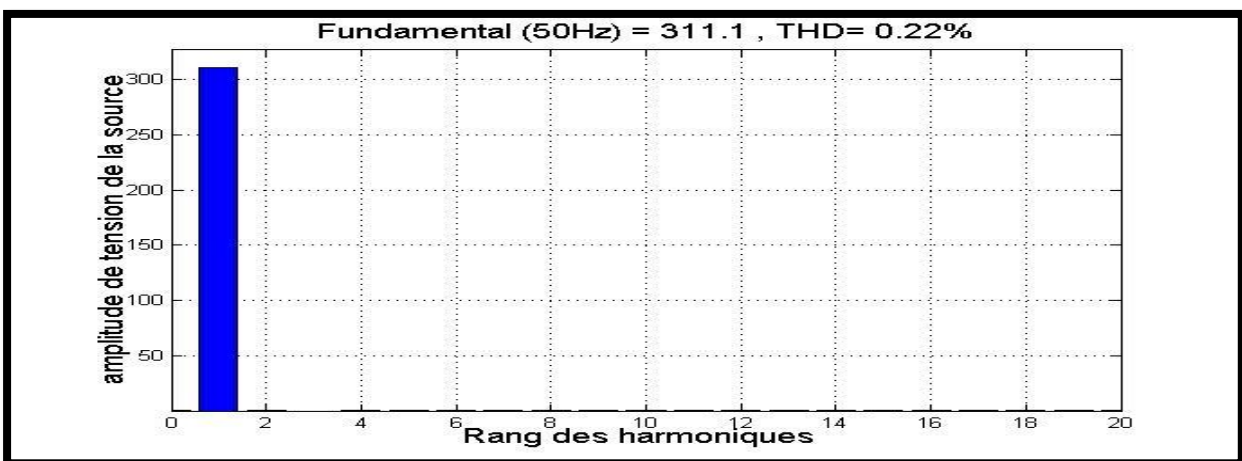


Figure IV.43: Spectre harmonique de tension de source après filtrage [49]

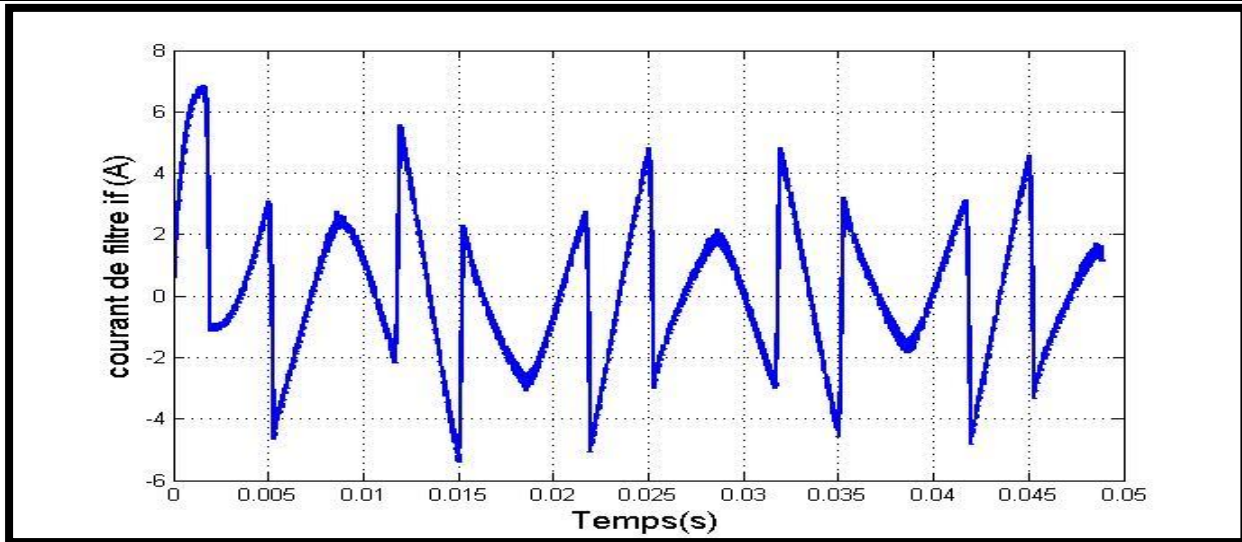
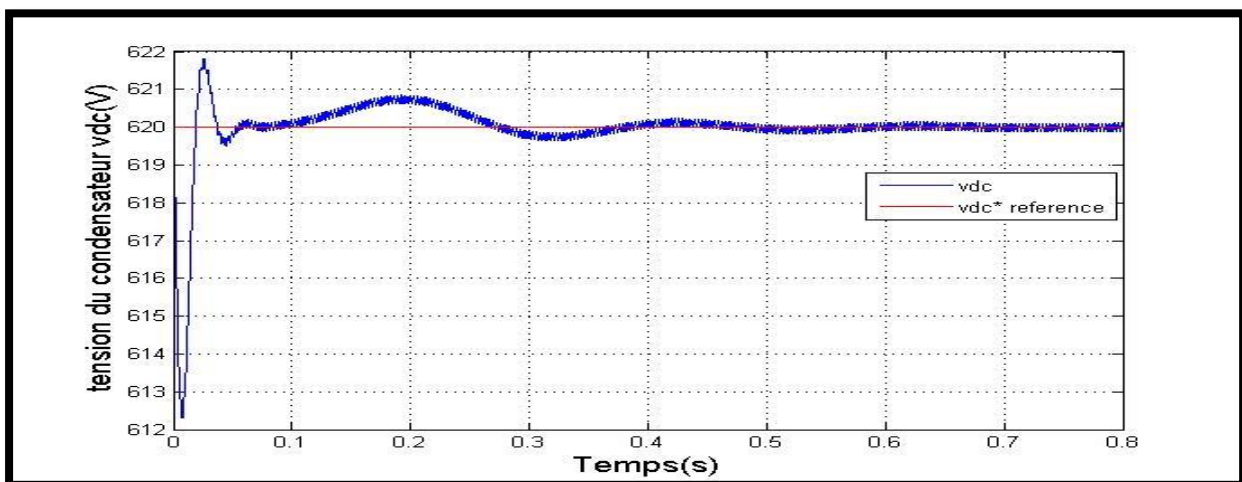


Figure IV.44: Courant injecter par le filtre actif

Figure IV.45: Tension V_{dc} aux bornes du condensateur

- Calcul des puissances :

$$FP = \frac{\cos(\varphi)}{\sqrt{1 + THD^2}}$$

$$P = 3 * V_1 * I_1 * \cos(\varphi_1)$$

$$Q = 3 * V_1 * I_1 * \sin(\varphi_1)$$

$$P = 3 * 220 * 5.335 * \cos(0^\circ) = 3521.11 \text{ W}$$

$$Q = 3 * 220 * 5.335 * \sin(0^\circ) = 0 \text{ VAR}$$

$$FP = \frac{1}{\sqrt{1 + 0.000047}} = 0.97$$

$$THD = 0.69 \%$$

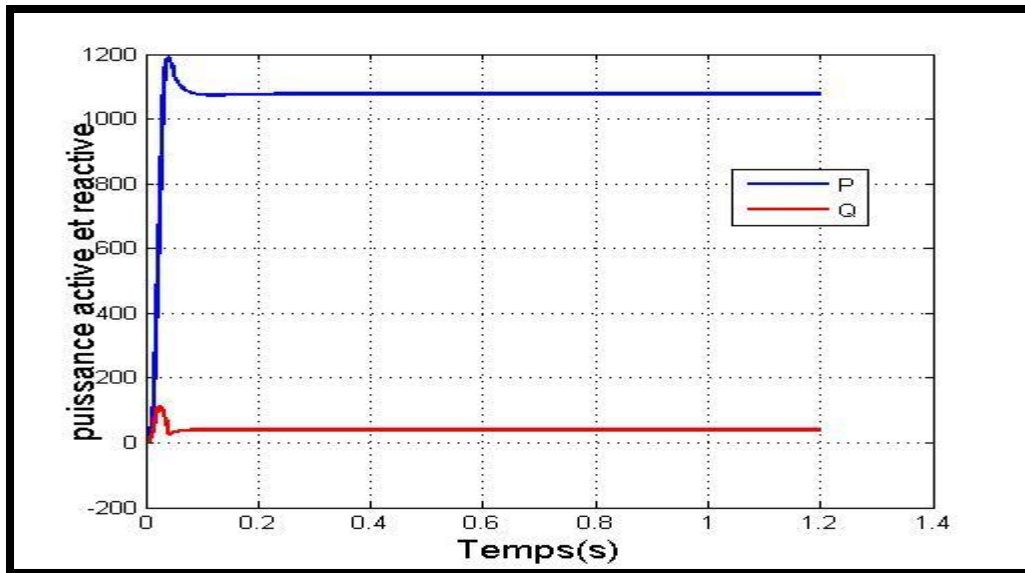


Figure IV.46: Puissance active (P) et la puissance réactive(Q) en monophasé.

IV.5.1.2.2. Changement de la charge (Charge linéaire 02) :

Les résultats de changement de la charge (charge 2) au niveau du redresseur sont représentés par les figures (IV.47..... IV.72.)

IV.5.1.2.2.1. Méthode de puissance instantanée :

IV.5.1.2.2.1.a). Commande par MLI :

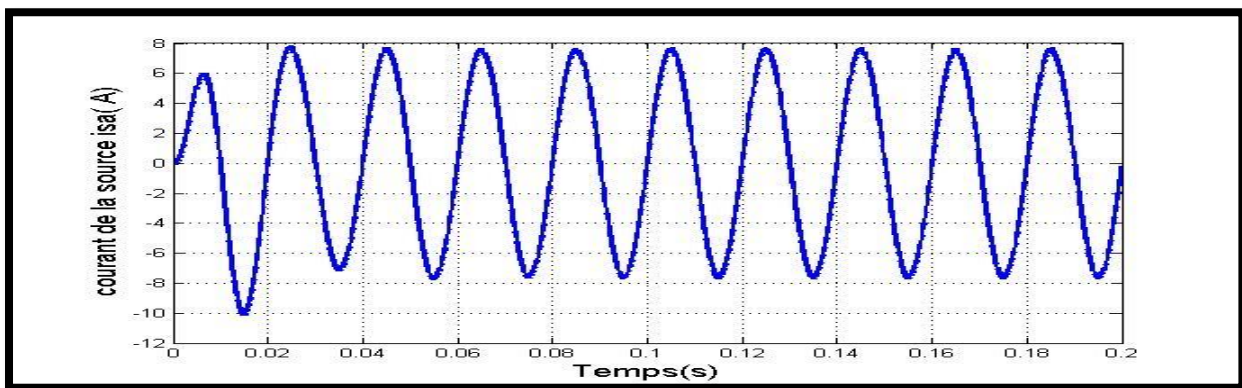


Figure IV.47: Courant de source après filtrage

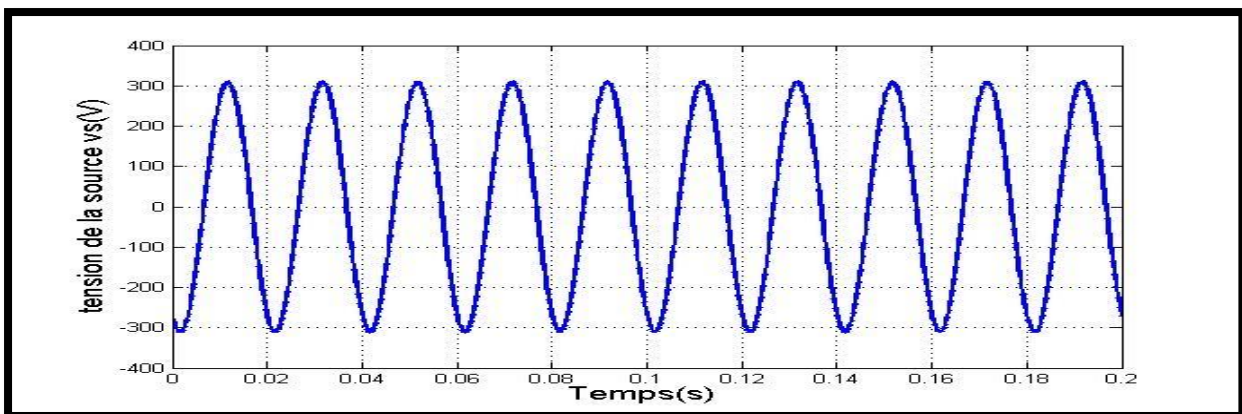


Figure IV.48: Tension de source après filtrage

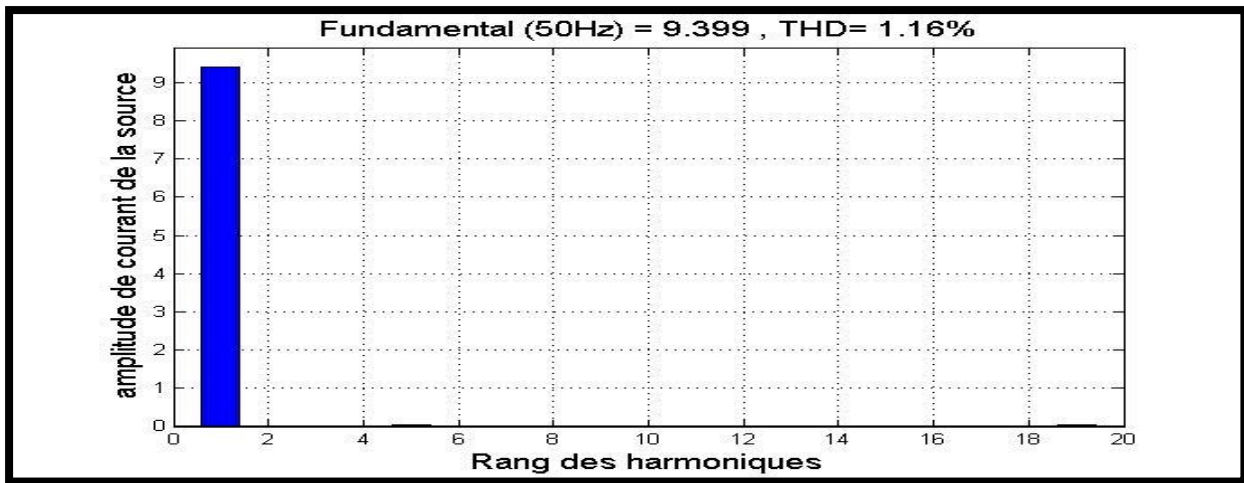


Figure IV.49: Spectre harmonique de courant de source après filtrage

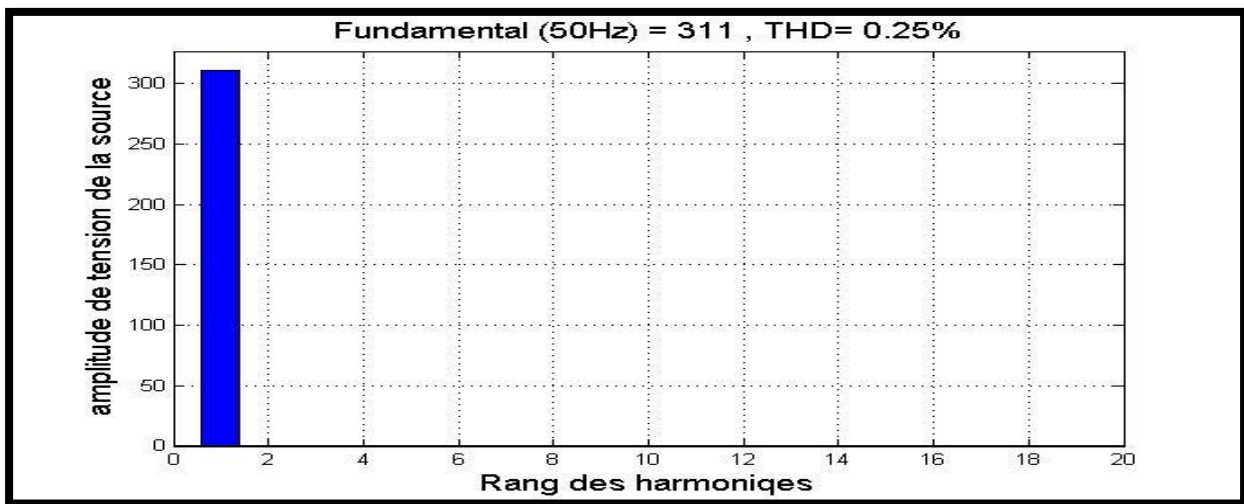


Figure IV.50: Spectre harmonique de la tension de source après filtrage

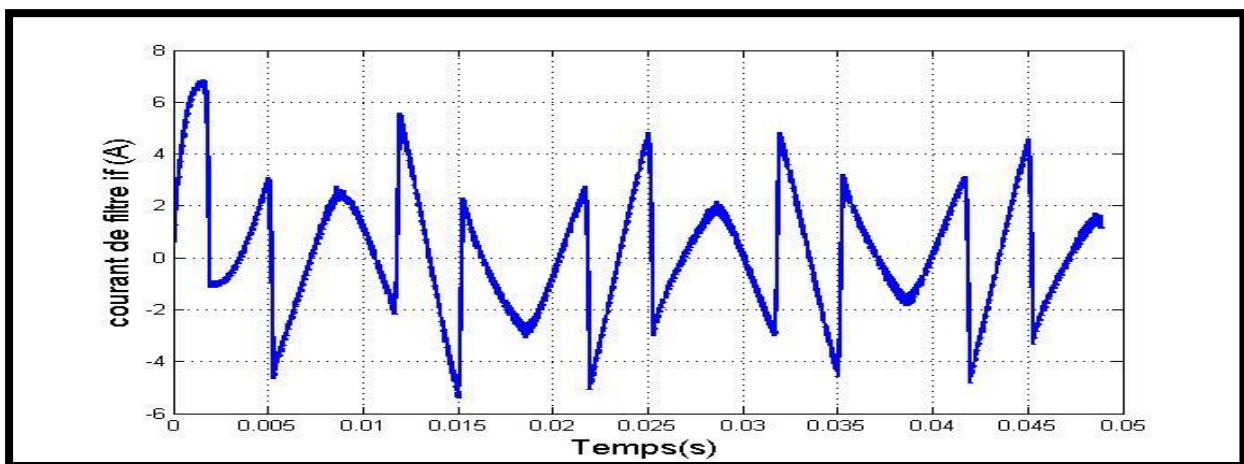


Figure IV.51: Courant injecter par le filtre actif

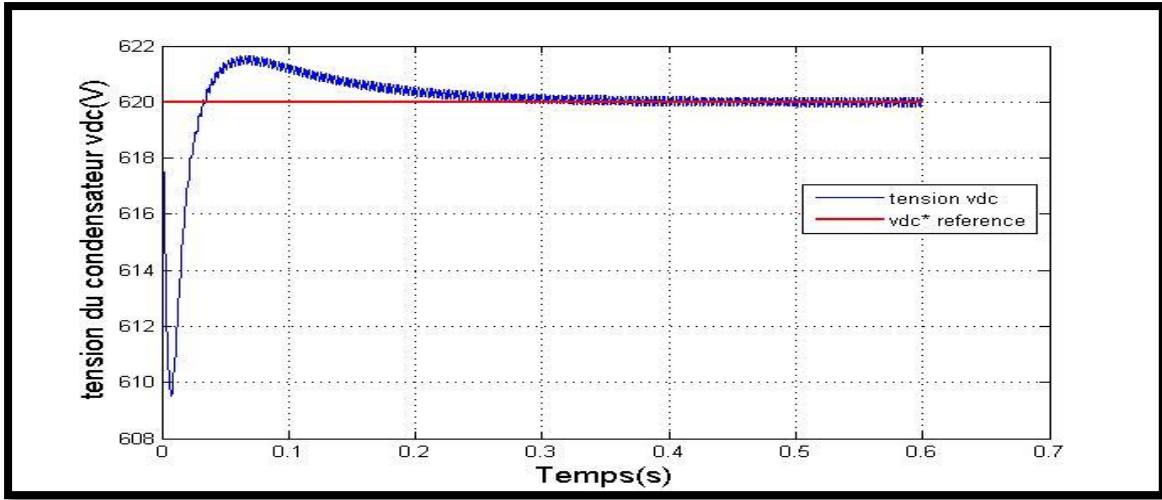


Figure IV.52: Tension V_{dc} aux bornes du condensateur

- Calcul des puissances :

$$FP = \frac{\cos(\varphi)}{\sqrt{1 + THD^2}}$$

$$P = 3 * V_1 * I_1 * \cos(\varphi_1)$$

$$Q = 3 * V_1 * I_1 * \sin(\varphi_1)$$

$$P = 3 * 220 * 5.412 * \cos(0) = 3571W$$

$$Q = 3 * 220 * 5.315 * \sin(0) = 0 VAR$$

$$FP = \frac{1}{\sqrt{1+0.0013}} = 0.96$$

$$THD = 1.16\%$$

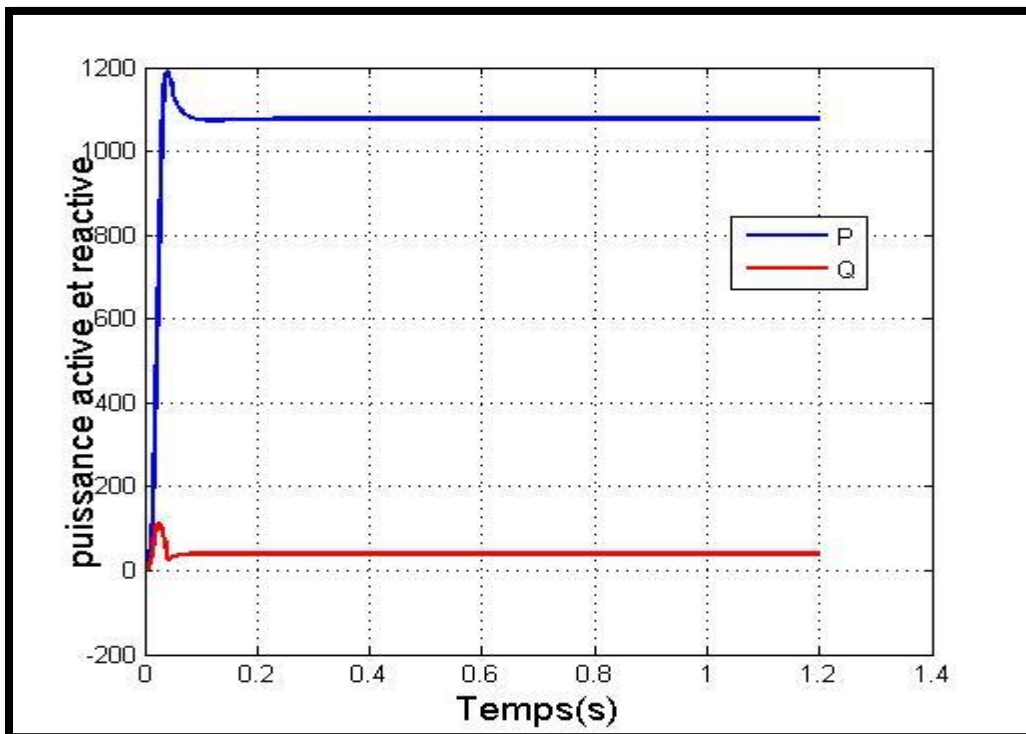


Figure IV.53: Puissance active (P) et la puissance réactive(Q) en monophasé]

IV.5.1.2.2.1.b). Commande par hystérésis :

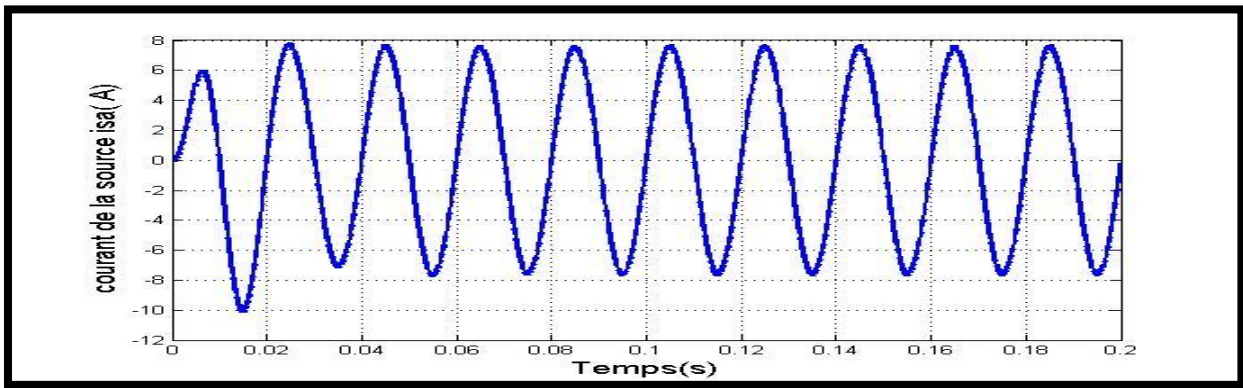


Figure IV.54: Courant de source après filtrage

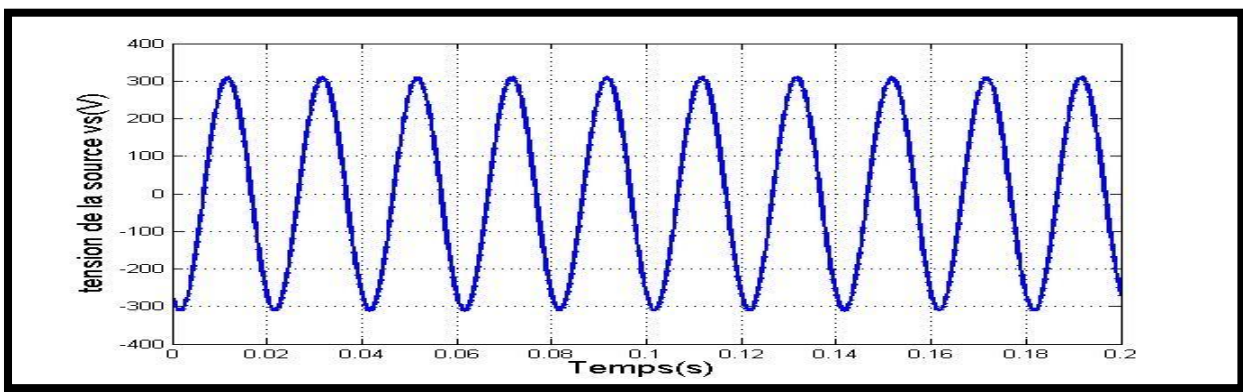


Figure IV.55: Tension de source après filtrage

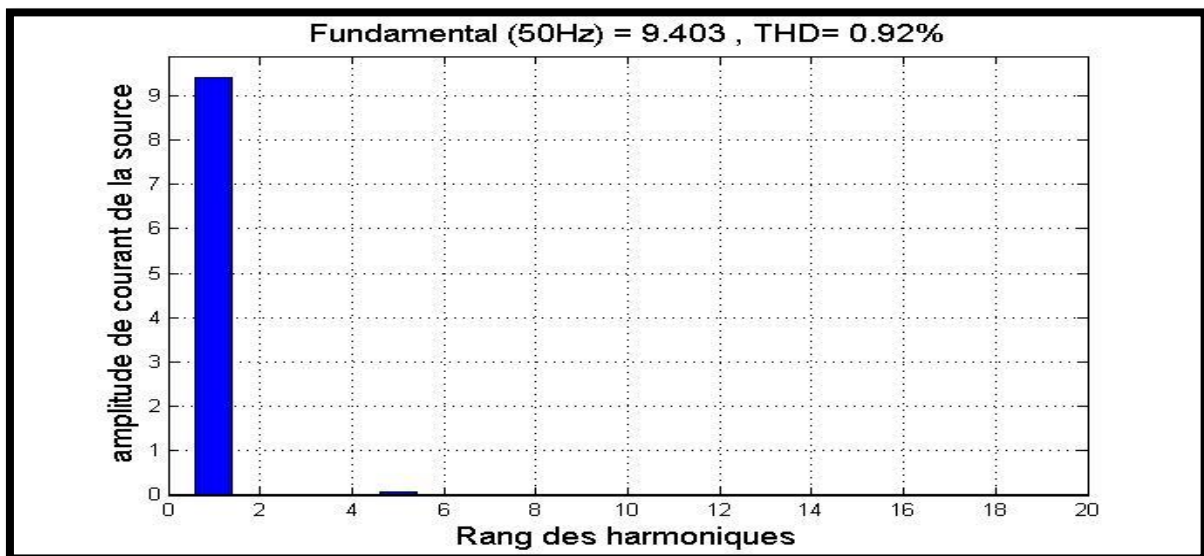


Figure IV.56: Spectre harmonique de courant de source après filtrage.

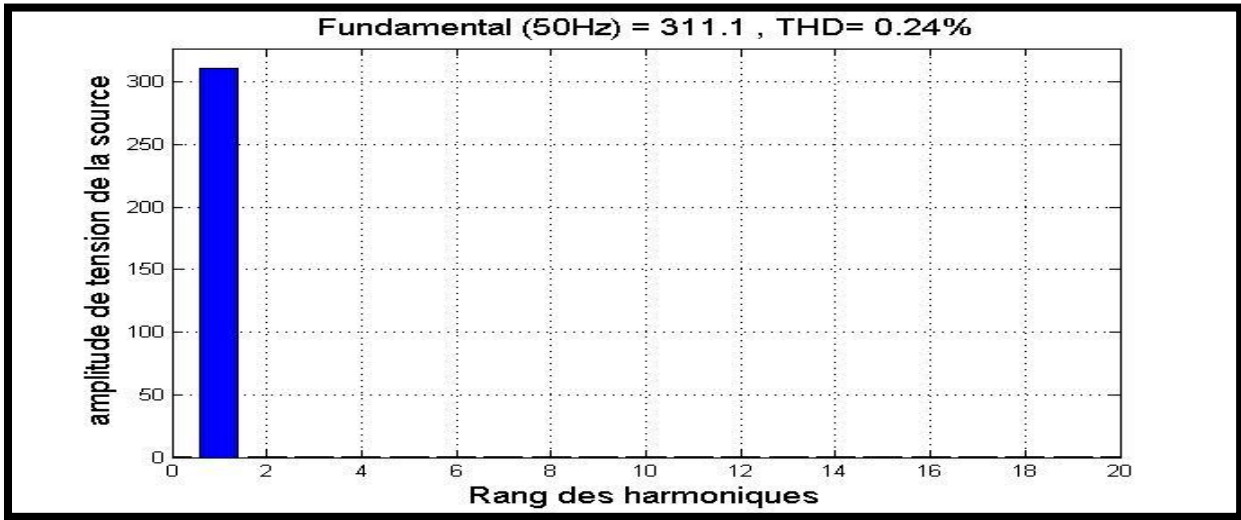


Figure IV.57: Spectre harmonique de la tension de source après filtrage

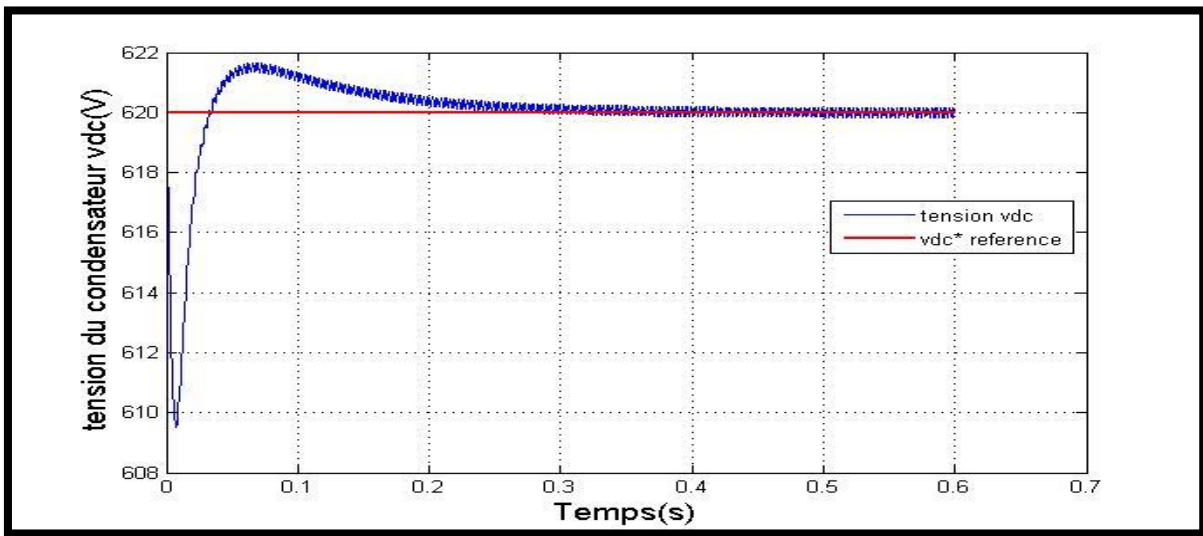


Figure IV.58: Tension V_{dc} aux bornes du condensateur.

$$FP = \frac{\cos(\varphi)}{\sqrt{1 + THD^2}}$$

$$P = 3 * V_1 * I_1 * \cos(\varphi_1)$$

$$Q = 3 * V_1 * I_1 * \sin(\varphi_1)$$

$$P = 3 * 220 * 5.315 * \cos(0^\circ) = 3505.17 \text{ W}$$

$$Q = 3 * 220 * 5.315 * \sin(0^\circ) = 0 \text{ VAR}$$

$$FP = \frac{0.99}{\sqrt{1+0.086}} = 0.98$$

$$THD = 0.92 \%$$

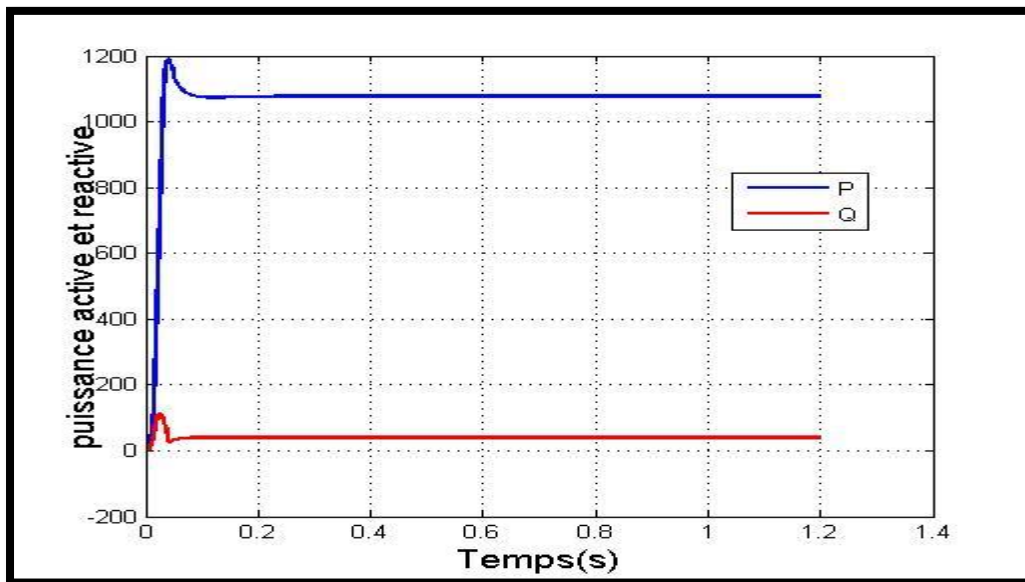


Figure IV.59: Puissance active (P) et la puissance réactive(Q) en monophasé

IV.5.1.2.2.2. Méthode du référentiel synchrone (dq) :

IV.5.1.2.2.2.a). commande par MLI :

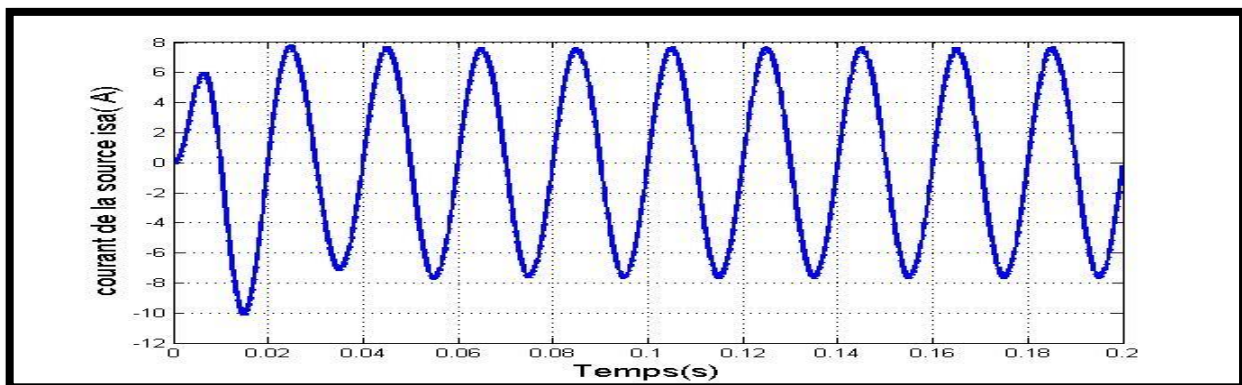


Figure IV.60: Courant de source après filtrage

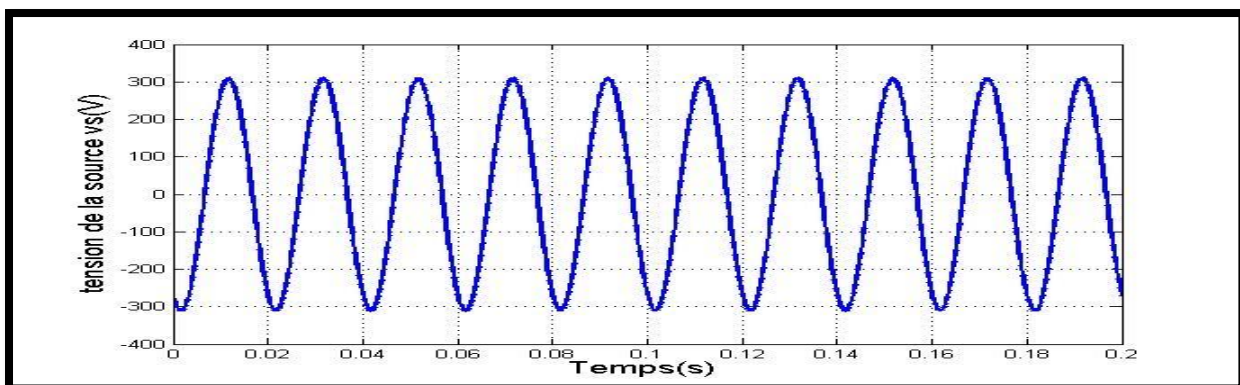


Figure IV.61: Tension de source après filtrage

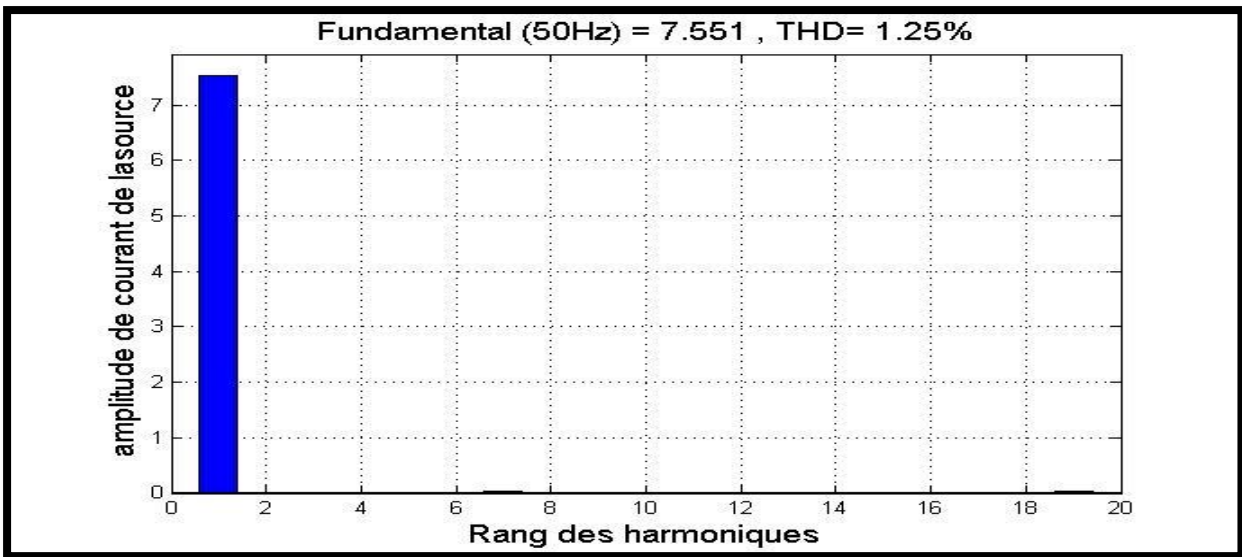


Figure IV.62: Spectre harmonique de courant de source après filtrage.

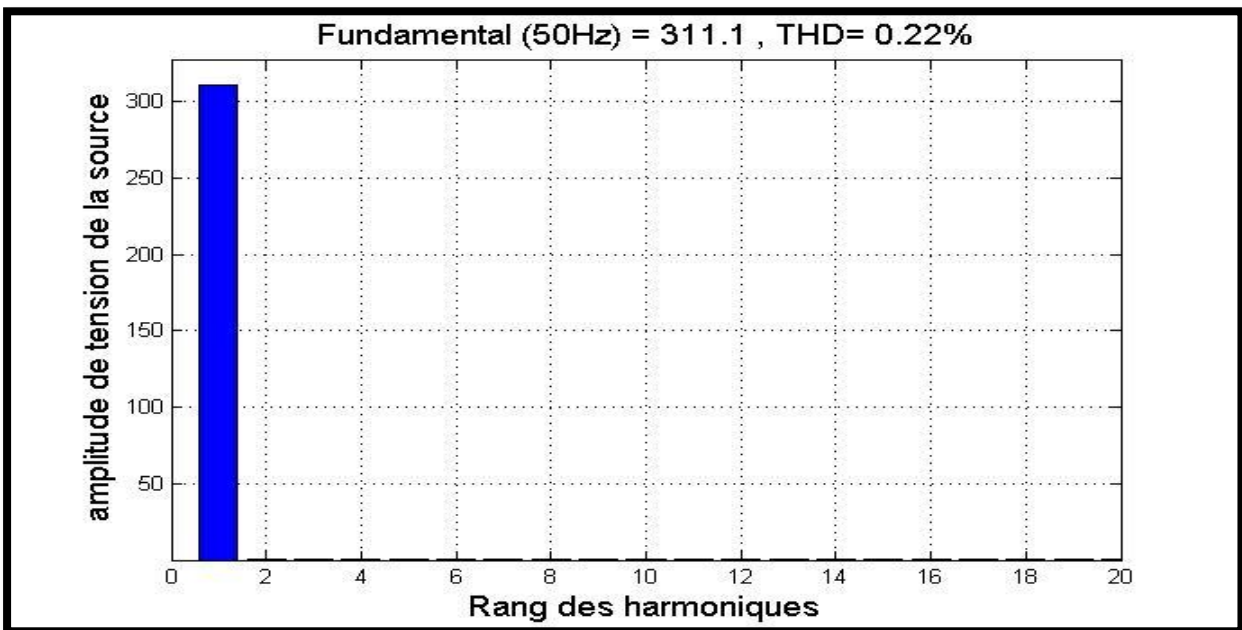


Figure IV.63: Spectre harmonique de la tension de source après filtrage

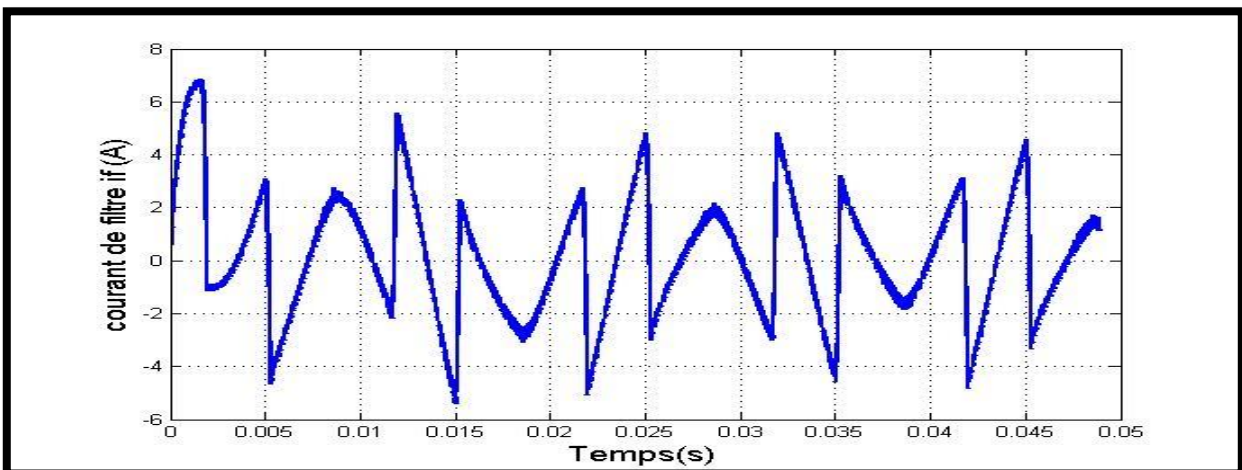


Figure IV.64: Courant injecter par le filtre actif

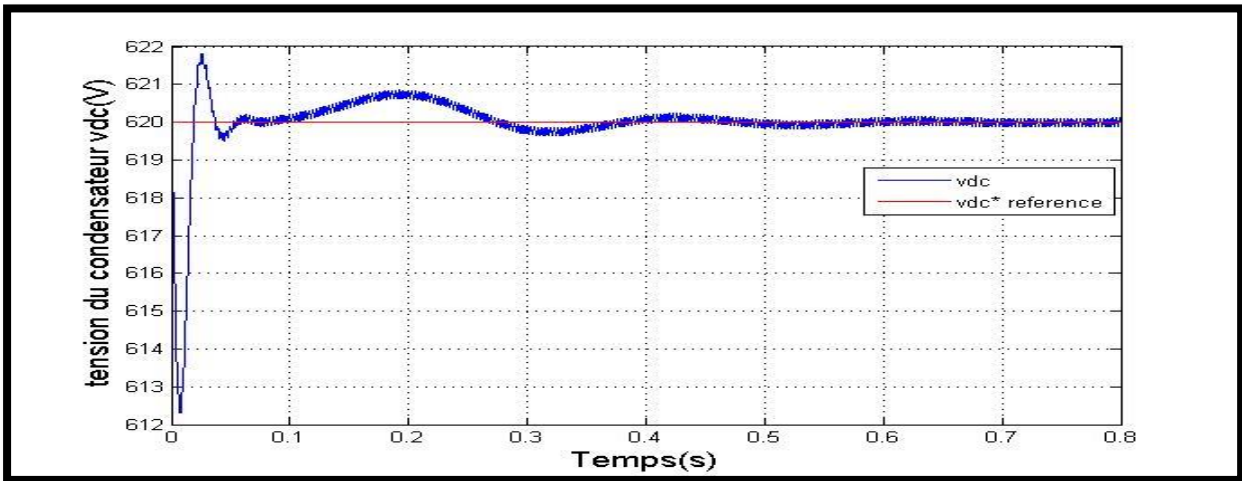


Figure IV.65: Tension aux bornes du condensateur

$$FP = \frac{\cos(\varphi)}{\sqrt{1 + THD^2}}$$

$$P = 3 * V_1 * I_1 * \cos(\varphi_1)$$

$$Q = 3 * V_1 * I_1 * \sin(\varphi_1)$$

$$P = 3 * 220 * 5.315 * \cos(0^\circ) = 3505.07 \text{ W}$$

$$Q = 3 * 220 * 5.315 * \sin(0^\circ) = 140.77 \text{ VAR}$$

$$FP = \frac{0.99}{\sqrt{1+0.086}} = 0.99$$

$$THD = 1.25\%$$

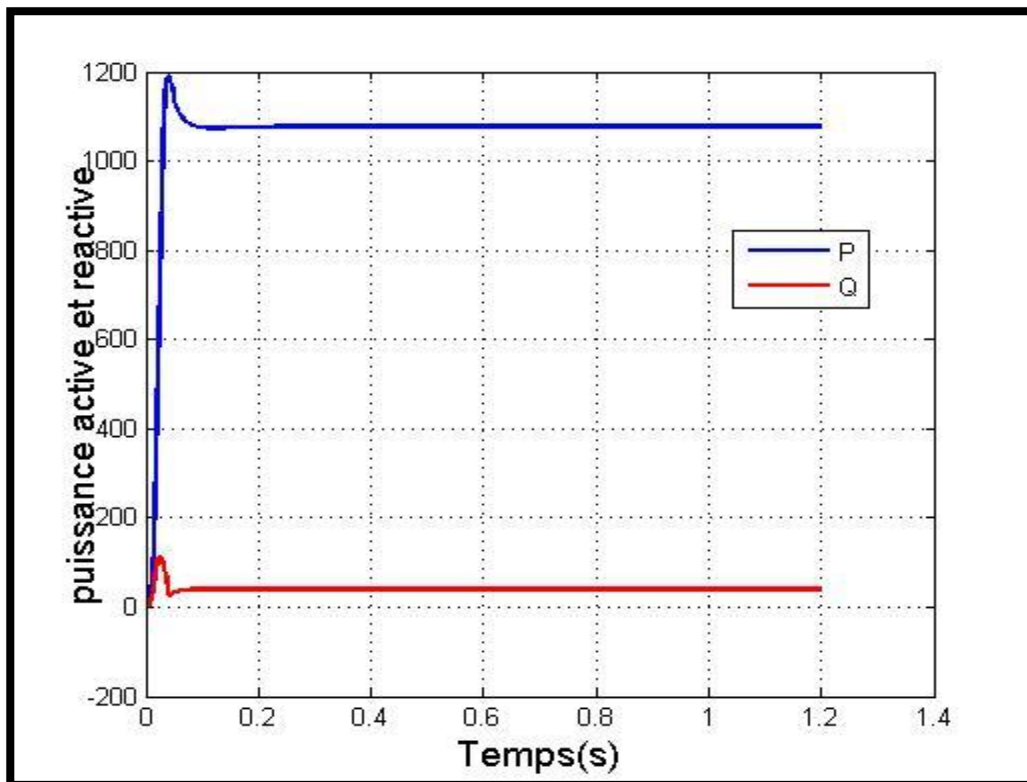


Figure IV.66: Puissance active (P) et la puissance réactive(Q) en monophasé

IV.5.1.2.2.2.b). Commande par hystérésis :

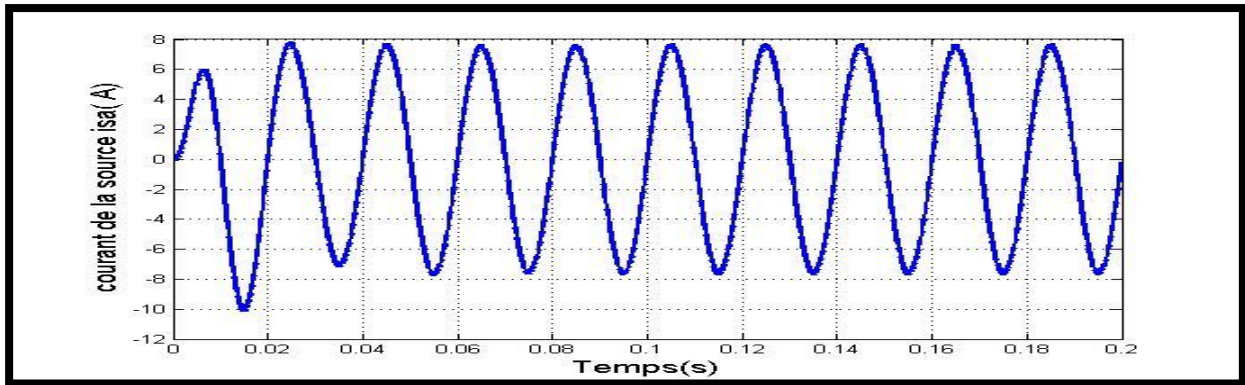


Figure IV.67: Courant de source après filtrage

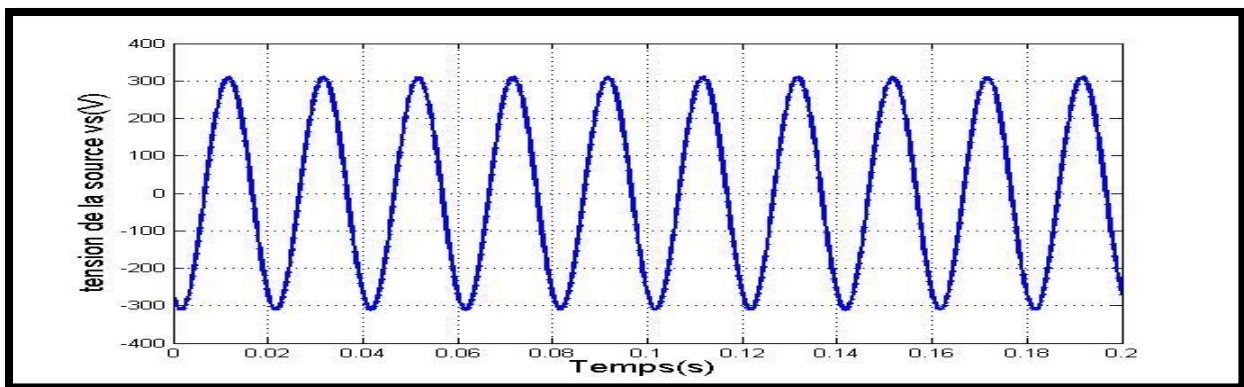


Figure IV.68: Tension de source après filtrage

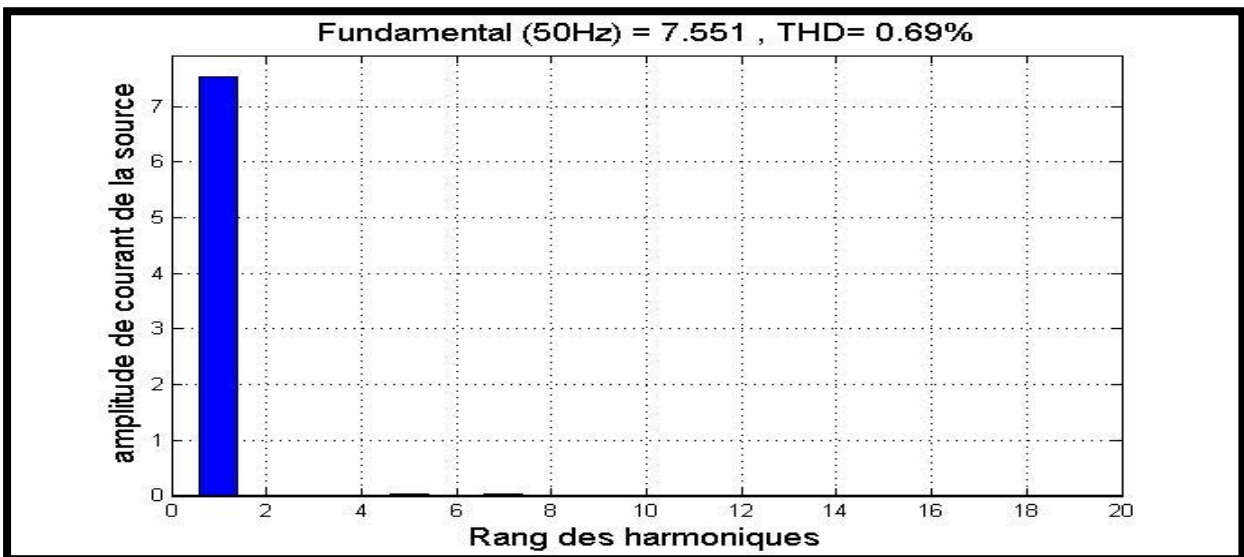


Figure IV.69: Spectre harmonique de courant de source après filtrage

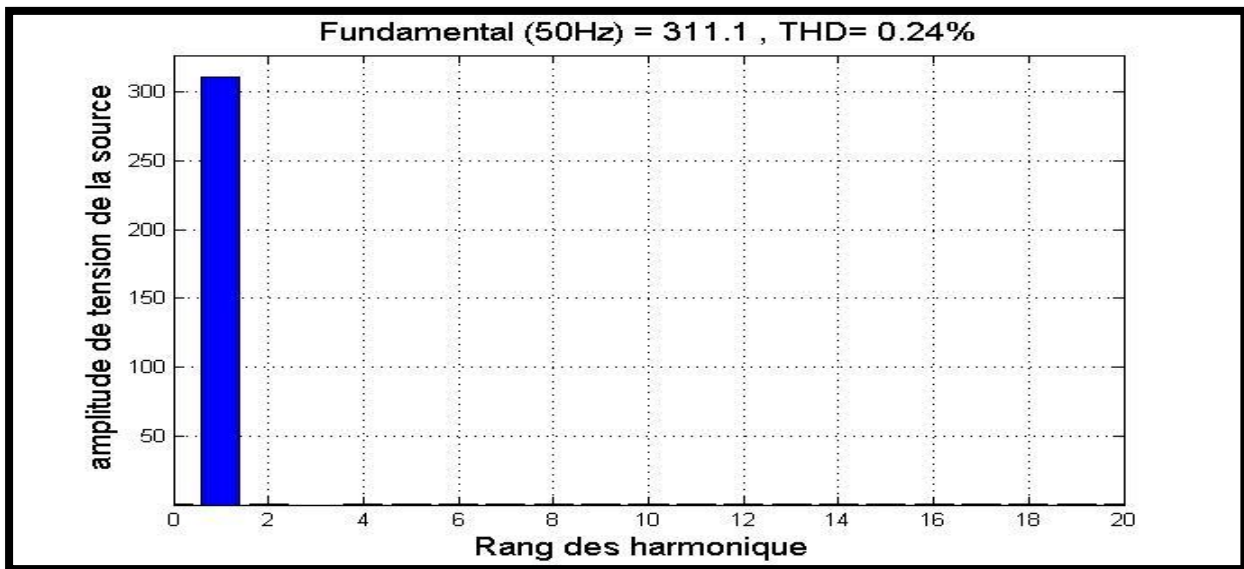


Figure IV.70: Spectre harmonique de la tension de source après filtrage

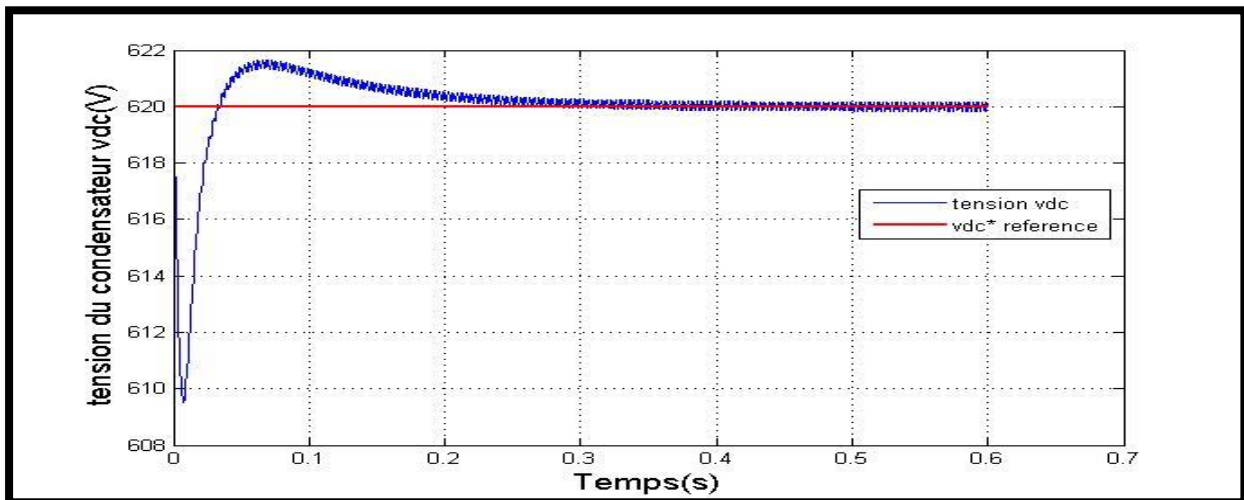


Figure IV.71: Tension aux bornes du condensateur

$$FP = \frac{\cos(\varphi)}{\sqrt{1 + THD^2}}$$

$$P = 3 * V_1 * I_1 * \cos(\varphi_1)$$

$$Q = 3 * V_1 * I_1 * \sin(\varphi_1)$$

$$P = 3 * 220 * 5.315 * \cos(0^\circ) = 3505.07 \text{ W}$$

$$Q = 3 * 220 * 5.315 * \sin(0^\circ) = 0 \text{ VAR}$$

$$FP = \frac{0.99}{\sqrt{1 + 0.086}} = 0.997$$

$$THD = 0.69 \%$$

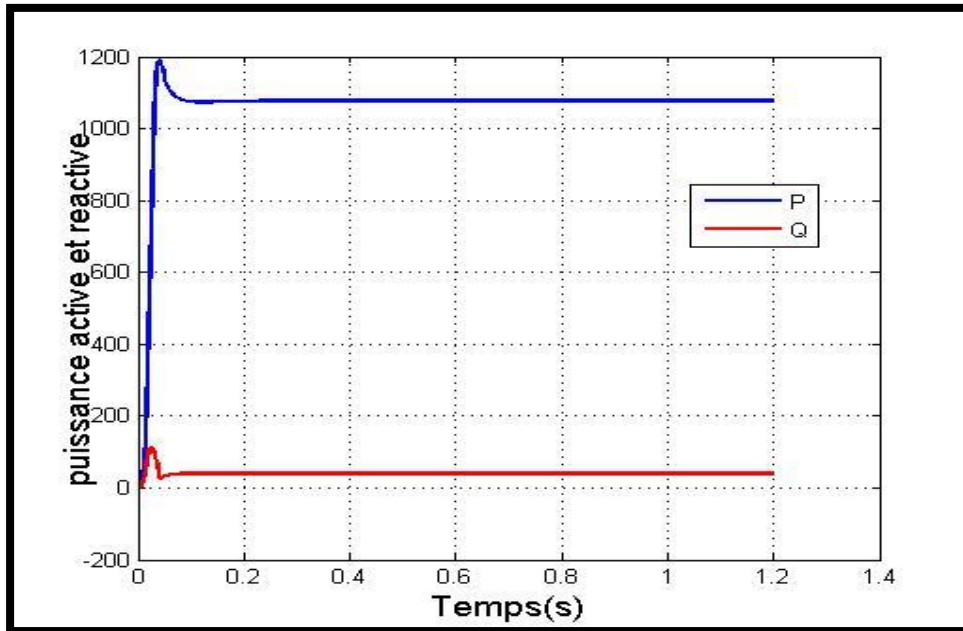


Figure IV.72: Puissance active (P) et la puissance réactive(Q) en monophasé

IV.5.2. Comparaison des résultats après le filtrage :

Tableau IV.2. Comparaison des résultats pour la charge 01

Méthode d'identification	Commande de l'onduleur	THD%	FP	P (W)	Q (var)
Méthode de pq	MLI	1.27%	0.99	3515.16	0
	HYS	0.92%	0.99	3505.17	0
Méthode de dq	MLI	1.26%	0.98	3505	0
	HYS	0.69%	0.97	3571	0

Tableau IV.3. Comparaison des résultats pour la charge 02

Méthode d'identification	Commande de l'onduleur	THD%	FP	P (W)	Q (var)
Méthode de pq	MLI	1.16%	0.96	3521.11	0
	HYS	0.92%	0.98	3514.07	0
Méthode de dq	MLI	1.25%	0.99	43515	0
	HYS	0.69%	0.997	3515.07	0

D'après les résultats de notre simulation avant et après le filtrage nous avons constaté que la puissance réactive a presque totalement été compensée. Aussi le facteur de puissance est amélioré et le système a fait une réduction des harmoniques au niveau du réseau électrique, ce que nous donne des spectres harmoniques qui représente le THD =1.16% et 0.92% pour la méthode (pq) et le THD =1.25% et 0.69% pour la deuxième méthode (dq).

Ces résultats obtenus montrent l'efficacité et les bonnes performances du filtre actif parallèle, qui a réduit le THD à une valeur inférieure à 5% correspondant aux recommandations et normes internationales (Le standard IEEE 519). [45]

IV.6. Conclusion :

Dans ce travail, un filtre actif à base d'un onduleur de tension de deux niveaux, est étudié avec différentes stratégies de détection des harmoniques basées respectivement sur la méthode des puissances instantanées (pq) et la théorie de référentiel synchrone (dq). Ces méthodes donnent directement la forme d'onde harmonique à compenser et ont une réponse adéquate pour le traçage des harmoniques variant dans le temps.

Les résultats obtenus dans ce chapitre montrent que la méthode d'identification de la puissance instantanée est efficace pour diminuer les harmoniques des courants à tous les états. Le filtre actif parallèle va connaître une grande évolution avec le développement des lois de commandes tel que MLI et hystérésis permettant ainsi de réduire les harmoniques à une valeur tolérable.

La commande par hystérésis est une solution très simple de réalisation et efficace au même temps pour réduire les harmoniques des courants. La tension du condensateur est adapté quel que soit la charge.

Finalement nous concluons d'après les résultats obtenus que le filtre actif parallèle réduit d'une manière efficace les harmoniques et compense l'énergie réactive du réseau quel que soit la charge.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire consiste à l'étude de l'effet des harmoniques et la dépollution harmonique, ainsi la compensation de la puissance réactive. Ces pollutions sont principalement causées par des charges non linéaires, ces charges non linéaires à base de convertisseurs de puissances offrent de l'énergie sous plusieurs formes et sont de plus en plus utilisées dans l'industrie.

La première partie de ce travail a été consacré à la problématique des perturbations ou distorsions harmoniques générées par les charges non linéaires connectées aux réseaux électriques. L'augmentation régulière du nombre de dispositifs d'électronique de puissance utilisés dans les systèmes électriques ne fait qu'accentuer ces perturbations. En outre, les origines et les effets néfastes de ces perturbations ont été abordés et les normes en vigueur ont été présentées. Ces normes, notamment imposées aux distributeurs d'énergie, autorisent cependant la génération d'harmoniques dans certaines limites. En outre, le respect de ces normes motive l'étude et le développement de méthodes efficaces pour dépolluer les réseaux électriques, comme par exemple les dispositifs de filtrage actif, c'est l'objet de notre travail. Nous avons alors présenté, de manière générale, les solutions traditionnelles et modernes utilisées pour le filtrage.

D'après l'analyse des perturbations harmoniques et leurs effets sur le réseau électrique, dans la deuxième partie on a présenté la topologie de filtre actif parallèle, la structure de FAP et les deux parties principales (partie de puissance et la partie de commande-contrôle). ainsi la simulation de deux phénomènes principaux qui sont la pollution harmonique et la puissance réactive.

Avec ce filtre, le THD des courants de source est réduit, pour un point de fonctionnement considéré comme étant typique, de 29.48% à 1.17% (MLI) et à 0.92% (Hystérésis) pour la méthode(pq), de 29.48% à 1.25% (MLI) et à 0.69% (Hystérésis) pour la deuxième méthode (dq).

Les résultats des simulations ont confirmés l'efficacité des dispositifs assurant la dépollution harmonique et la compensation de la puissance réactive.

Comme perspectives de ce travail nous proposons de développer un autre modèle avec une commande avancée (MLI vectorielle).

Bibliographie

Bibliographie

Références bibliographiques :

- [1] **SOUAD CHEBBI**,« *Production - Transport et Distribution d'Énergie, Notions de base sur les réseaux électriques*» Thèse de doctorat, Université Virtuelle de Tunis. 2006
- [2] « **LES ARCHITECTURES DE RESEAUX** », *Guide de conception des réseaux électriques industriels-Schneider électriques*.
- [3] « **Cour de réseaux électrique** ».www.scribd.com.2018
- [4] **GHADBANE Ismail**.«Etude Et Réalisation D'un Filtre Actif Parallèle En Utilisant Différentes Stratégies De Contrôle» Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2014
- [5] **N. Gheorghe**,« Perturbations dans les réseaux électriques», *Revue Polyewpert Technique* N°53 2008,
- [6] La qualité de l'énergie électrique «Cahier technique n°199». *Schneider électriques*
- [7] **T. Gouraud**, « *Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution électrique* » Thèse de doctorat, École Doctorale Sciences pour l'Ingénieur de Nantes, Janvier 1997.
- [8] **M. Al. ALALI**, « *Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension* », Thèse Doctorat de l'Université Louis Pasteur-Strasbourg I2002.
- [9] **P. Meynaud**, « *Qualité de la tension dans les réseaux électriques – creux de tension, flicker et harmoniques* » *Techniques de l'ingénieur, traité Génie électrique*, D 4 260, pp. 1-25, 1990.
- [10] **G. Desquilbet, C. Foucher, P. Fauquembergue**, «*Statistical analysis of voltage dips* » *Notes EDF, 96NR00102, 1995*
- [11] **A. Arora**, « *Solutions innovatrices pour l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique*», *Revue Qualité De L'énergie Electrique ABB* 3/1998.
- [12] **B. CHARIER**,« *La qualité de l'énergie électrique: critères et définitions*», *Revue technologie* 2009.
- [13] **Dahane Mohamed El-Amine**, « *Commande d'un Filtre Actif Parallèle à Trois Fils* »*Mémoire de Master, Université Mohamed Khider Biskra, 2014*
- [14] **R.P.Bouichard, G.Olivier** , « *Électrotechnique : deuxième édition* » ; *AGMV Marquis Quebec, Canada, 2001*
- [15] **L. Marroyo**, « *Contribution à l'étude des redresseurs triphasés à absorption de courants sinusoïdaux* », Thèse de docteur, Institut National Polytechnique de Toulouse (INPT), Toulouse, 1999
- [16] **SOUFIANE BEN ALI**, « *ETUDE ET SIMULATION D'UN FILTRE ACTIF PARALLEL A QUATRE FILS* »*Mémoire de Master, Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued, 2015*

Bibliographie

- [17] **H. AKAGI, Y. KANAZAWA, A. NABAE**, «*Generalized theory of the instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components* », *IEEE Trans . Ind .Appl* , vol. IA-20, No.9,pp. 652-630,May/June 1984.
- [18] **C. COLLOMBET, J. LUPIN et J. SCHONEK** ,«*Perturbations harmoniques dans les réseaux pollués, et leur traitement*».Cahier Technique Schneider Electric n° 152, septembre 1999.
- [19] **S .BOUGUERRA et I.BOURENNANE**, « *filtrage actifs parallèles des réseaux électriques avec compensation de l'énergie réactive* ». Mémoire d'ingénieur d'état, Université de M'Sila,2007.
- [20] **B. SZABADOS** ,«*Répercussions sur le réseau électrique de l'alimentation des convertisseurs de grande puissance* », *RGE*, Vol. 12, pp. 791-796,1984.
- [21] **Amaia Lopez De Heredia Bermeo**,« *Commandes avancées des systèmes dédiés à l'amélioration de la qualité de l'énergie : de la basse tension à la montée en tension* », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 14 novembre 2006.
- [22] **MIDOUNE Nasreddine**, « *Étude par simulation des effets des harmoniques et de la puissance réactive sur le réseau électrique* », UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA 2016
- [23] **I. Etxeberria.otadui**, « *Les systèmes de l'électronique de puissance dédiés à la distribution électrique. Application à la qualité de l'énergie électrique* ». Thèse de doctorat, 2003, Institut National Polytechnique de Grenoble, France, 2003
- [24] **R.Kiffouche**, «*Identification des Harmoniques et Génération de Courant de Référence, Application au Convertisseur Statiques* », Mémoire de Magister, Université de M'Hamed Bougara, Boumerdes, 2006.
- [25] **RoutelDalila** ,« *Technique intelligente pour la commande d'un filtre actif parallèle dédié à l'amélioration de la qualité de l'énergie dans un réseau électrique* »,Mémoire de Master,Université Ibn-Khaldounde Tiaret, 2016
- [26] **B.Ketem, N.Mehenni** , « *Application des onduleurs multi niveaux au filtrage actif des réseaux* ». Mémoire d'ingénieur d'état, l'USTHB, 2005.
- [27]**KEBIRI Samia**, « *Modélisation et simulation d'un filtre actif multi niveaux* » Mémoire de Magister, Université MOULOUD MAMMERI, TIZI-OUZOU, 2009
- [28] **C. LOTT, O. LAPIERRE, H. POULIQUEN, S. SAADATE**,« *Filtrage actif des harmoniques en courant et en tension des réseaux électriques: Modélisation, Simulation numérique et expérimentation* », *Journal de physique III, France7* (1997).
- [29] **J. N. FIORINA**, « *Harmoniques en amont des redresseurs des ASI* », *Cahier Technique n° 159 et160*.

Bibliographie

- [30] **A. Bouafia**, « *Techniques de commande prédictive et floue pour les systèmes d'électronique de puissance: application aux redresseurs à MLI* », Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas – Sétif, Octobre 2010.
- [31] **C. Tan Perng**, « *A single-phase hybrid active power filters with photovoltaic application* », Thèse de Master en Génie Electrique, Université de Technologie Malaysia 2006.
- [32] **M.M. Swamy**, « *Passive techniques for reducing input current harmonics* », WP.AFD.01 Copyright by Yaskawa Electric America, Inc. 2005.
- [33] **A. Hamadi**, « *Contribution à l'étude des filtres hybrides de puissance utilisés pour améliorer la qualité de l'énergie dans le réseau électrique de distribution* », Thèse Doctorat. Université du Québec 2010.
- [34] **Nekkar Djamel**, « *contribution à l'étude des stratégies de commande des filtres actifs triphasés* », thèse de magistrale, université Mohamed Cherif, souk- ahras, 2014.
- [35] **Steeve Beaulieu**, « *étude et mise au point d'un filtre actif d'harmoniques en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique* », Mémoire université du Québec a Chicoutiml, 2007.
- [36] **B. Singh, K. Al-Haddad and A.C. Chandra**, *A review of Active Filters for Power Quality Improvement*, *IEEE Transactions. Industrial Electronics*, Vol. 46, pp. 960-971, October 1999.
- [37] **S. Mouttou**, « *Nouvelles approches de commande d'un filtre actif parallèle à source de courant* », Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Trois-Rivières, Octobre 2002.
- [38] **M. A. Alali**, « *Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension* », Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg I, Septembre 2002.
- [39] **TransEnergie1999**, « *Caractéristiques et cibles de qualité de la tension fournie par le réseau de transport d'Hydro Québec* »,
- [40] « **Guide de conception des réseaux électriques industriels** », *La compensation de l'énergie réactive. -Schneider électriques*
- [41] **Amaia Lopez De Heredia Bermeo**, « *Commandes avancées des systèmes dédiés à l'amélioration de la qualité de l'énergie : de la basse tension à la montée en tension* », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 14 novembre 2006.
- [42] **A. SBA**, « *Commande en Temps réel d'un Filtre Actif de Puissance utilisant la technique par Logique Floue : Simulation par MATLAB/ Simulink* » Thèse de Magistère de l'université, Farhat Abbas, Sétif, UFAS Algérie, (2005).

Bibliographie

[43] **J. Afonso, M. Aredes, E. Watanabe and J. Martins** « *Shunt active filter for power quality improvement* », *International conference UIE 2000 "Electricity For A Sustainable Urban Development"* Lisboa, Portugal, 1-4 Novembre 2000.

[44] **M. Fatiha**, « *Etude et Commande d'un Filtre Actif Parallèle à Structure de Tension* », *Mémoire de Magister, Université Oran, Octobre 2001.*

[45] **MIHOUB Youcef**, « *Commande floue adaptative de la machine asynchrone* », *thèse de Doctorat, université d'Oran, 2012.*

[46] **J. Afonso, M. Aredes, E. Watanabe and J. Martins**,« *Shunt active filter for power quality improvement* », *International conference UIE 2000 "Electricity For A Sustainable Urban Development"* Lisboa, Portugal, 1-4 Novembre 2000.

ملخص:

يتعلق العمل المقدم في هذه الرسالة بدراسة الاضطرابات الناجمة عن استخدام الحمولات الغير الخطية، والتي لها تأثيرات ضارة على المعدات الكهربائية، الحل المقترح هو المرشح الفعال للتقليل من التوافقيات والتعويض عن الطاقة التفاعلية، وذلك باستخدام طريقتان لتحديد التيار التوافقي، الطريقة الأولى تعتمد على تحديد استطاعات لحظية حقيقية وخيالية لحساب التيار التوافقي، أما الطريقة الثانية فترتكز على التقاط تيار المنبع.

محاكاة هذا العمل تمت بواسطة برنامج (ماتلاب) باستخدام استراتيجيتين للتحكم (hystérésis و MLI)، خلال هذا العمل قمنا بتحليل الطيفي قبل وبعد التصفية وباستخدام نوعين من الحمولات الخطية لمقارنة النتائج وتأكد مدى فعالية المرشح النشط الفعال على التوازي ودوره في تعويض الطاقة التفاعلية.

كلمات مفتاحية:

الحمولات الخطية، الحمولات غير الخطية، التوافقيات، الطاقة التفاعلية، مرشح فعال، استطاعات لحظية.

Résumé :

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude des perturbations dues à l'utilisation des charges non linéaires qui consomment de la puissance réactive dont ils ont des effets néfastes sur les équipements électriques. Une solution proposée et efficace c'est le filtre actif shunt, qui a pour but de réduire les harmoniques et compenser l'énergie réactive. En utilisant deux méthodes d'identification des courants harmoniques : La première méthode basée sur les puissances instantanés réel et imaginaire, et la deuxième elle est basée sur les transformations vectorielles des signaux d'entrée.

Ce travail a été simulé par le logiciel Matlab en utilisant deux méthodes de commande (MLI et hystérésis). Pendant ce travail nous avons fait une analyse spectrale avant et après le filtre en utilisant deux charges linéaires pour comparer les résultats et confirmer l'efficacité de ce filtre actif et son rôle dans la compensation de l'énergie réactive.

Mots clés :

Charge linéaire, Charge non linéaire, Harmonique, Puissance réactive, Filtre actif, Puissance instantanée