

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf -Mila
Institut des Sciences et de Technologie
Département de Sciences et Technologie



N°Ref :.....

Projet de Fin d'Etude préparé En vue de l'obtention du diplôme
de MASTER
Spécialité : Electromécanique.

Dèpollution harmonique et identification des
courants perturbateurs par la technique
Neuronale.

Réalisé par :
-Radjah Saliha
-Zerara Nouha

Soutenu devant le jury :

M. Guentri .H
Mme .Yassad .D
Mme.Dib.S

Président
Examineur
Promoteur

Année universitaire : 2019/2020

Remerciement

Je remercie **الله** et tout puissant qui m'a guidé et qui m'a donné la force et la volonté de réaliser ce travail.

Je voudrai exprimer mes remerciements les plus sincères à mon directeur de mémoire Mme **DIB SAMIRA**, enseignante au Département des Sciences techniques à l'université de **Mila**, pour son encadrement et son expérience qu'elle a su me faire partager.

Je tiens également à remercier les membres de jury de soutenance, Monsieur **Guentri H** et Mme **Yassad D**, Maîtres de Conférences au département de Science technique à l'université de **Mila**, d'avoir accepté d'examiner le présent mémoire.

Mes remerciements et ma reconnaissance sont adressés à mes collègues pour le temps précieux qu'on a passé ensemble. Mes plus vifs remerciements vont également à tous mes amis avec qui j'ai partagé des moments inoubliables pendant mes études.

Enfin, toute ma gratitude, ma reconnaissance et mes très vifs remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin et en particulier l'ensemble des enseignants du département des Science techniques de **Mila**.



A decorative circular frame with a white, textured background and a dashed black border. The frame is adorned with three black graduation caps at the top, two rolled-up diplomas (one yellow, one white) with red ribbons on the sides, and several blue and pink flowers at the bottom. The word "Dédicace" is written in a blue, stylized font at the top center of the frame.

Dédicace

*A la mémoire de mon Père Rachid
A ma Mère Zahra,
A mon mari Karim,
A mes frères, mes sœurs,
A tous les membres de la famille ainsi que
mes amis,
A tous ceux qui travaillent pour que cette
nation soit meilleure.*



Dédicace

Je remercie infiniment «الله» tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a donnée durant toutes ces longues années.

❖ A ma très chère et incomparable mère qui est l'insigne de la tendresse Je te suis reconnaissante pour ton amour, ton affection, ta tendresse et ton aide morale.

❖ A mon très cher et adorable père pour tout le sacrifice qu'il a consenti afin de m'assurer sa totale et constante présence durant tous les cycles.

❖ A mes chers frères : Adam et Imad.

❖ A mes chères sœurs : Fatima, Djihane et Manel, Pour votre soutien et encouragements.

❖ A ma grande famille : Radjah, Fennour

❖ A tous mes professeurs, Et à tous mes Amis.

Résumé :

L'augmentation des charges non linéaires résidentielles, commerciales et industrielles raccordées au réseau de distribution d'énergies électrique génèrent des courants non sinusoïdaux. Ces courants provoquent l'apparition de tensions non sinusoïdales, en traversant les impédances de lignes de transport dans le réseau, provoquant à leur tour des courants non sinusoïdaux, bien souvent un désagrément du reste des charges connectées. En effet, les harmoniques de courant et de tension altèrent le fonctionnement de l'appareillage électrique, réduisent les performances du réseau et causent des bris de composants, la qualité de l'onde devient ainsi une exigence à respecter tant par le distributeur d'électricité que par le consommateur. Il est donc nécessaire de limiter la propagation de ces harmoniques de courant et de réduire les déformations des tensions du réseau.

L'objectif de ce travail est d'évaluer les harmoniques de courant causés par des charges non linéaires et de proposer une méthode de contrôle pour freiner leur propagation sous la variation de la charge et réaliser ainsi la réduction des harmoniques de tension.

Abstract:

The increase in non-linear loads whether they are residential, commercial or industrial, connected to power distribution network, will generate non-sinusoidal currents. These latter, in turn, will cause the emergence of non-sinusoidal voltages when passing through impedances of power transmission lines within the network. Finally, non-sinusoidal currents are generated, something which will cause inconveniences to the rest of connected loads. In fact we are here facing current and voltage harmonics which alter electrical equipment functioning, reduce network performances and harm existing components. In the light of such a situation, a crucial requirement has to be respected by electrical energy distributors and consumers alike, that is the wave quality.

It is necessary to limit current harmonics propagation and reduce network voltage distortions. This research work aims at evaluating current harmonics that are caused by non-linear loads, suggesting a controlling method to slow-down current harmonics propagation under load variation and achieving voltage harmonics reduction.

ملخص :

تؤدي زيادة الحملات غير الخطية، السكنية و التجارية و الصناعية، الموصولة بشبكة توزيع الطاقة الكهربائية إلى توليد تيارات غير جيبيّة تتسبب في ظهور توترات غير جيبيّة عند عبور ممانعات أسلاك النقل في الشبكة الكهربائية. تؤدي التوترات المذكورة بدورها إلى التسبب في تيارات غير جيبيّة تعيق غالبا باقي الحملات الموصلة. نحن هنا، إذن، أمام وجود تيار توافقية للتيار والتوتر تعرقل عمل التجهيزات الكهربائية، و تقلص من أداء الشبكة و تفضي إلى إتلاف التجهيزات الكهربائية. وعليه، يجب الاهتمام بنوعية الموجة التي تصبح في هذه الظروف من الشروط اللازم احترامها، سواء من ممول الطاقة الكهربائية أو من المستهلك.

من الضروري الحد من انتشار توافقيات التيار والتقليص من تشوهات توترات الشبكة. إن الهدف من هذا العمل هو تقدير توافقيات التيار الناتجة عن الحملات غير الخطية واقتراح طرق للمراقبة، من أجل كبح انتشار التيارات التوافقية تحت تأثير تغيرات الحمولة، ثم التقليل من التوترات التوافقية.

Nomenclature

F A P : Filtre actif parallèle.

F A S : Filtre actif série.

UPQC Unified Power Quality Conditioner

MLI : Modulation en largeur d'impulsions

THD : (En anglais : Total Harmonic distortion).

GTO: (En anglais: Gate turn off thyristor).

IGBT: (En anglais: Insolated gate bipolar transistor).

MOSFET: Metal Oxyde Semi-Conductor Field Effect Transistor

P : la puissance active

Q : la puissance réactive

S : la puissance apparente

Fp: Le facteur de puissance

h : Rang de l'harmonique

Vdc: tension aux bornes du condensateur de l'onduleur

Cdc : Condensateur du bus continue

is: courant de la source

if : Courant de filtre

ich : Courant de charge

Rfp : Résistance de filtre passif

Lfp : Inductance de filtre passif

L : Inductance

C : Capacité

R : Résistance

Vs: la tension simple du réseau,

I_h : le courant harmonique

RN: les Réseaux de Neurons

RNA: des réseaux de neurons artificiel

x (i): Vecteur d'entrée.

Y (j): Vecteur de sortie.

W (i,j): Poids du réseau de neurones.

W (0,j):représente le biais b(j).

ANN: artificial Neural Networks

MATLAB: Matrix laboratory

U: La tension de phase

fs: La fréquence de source

Liste des figures

Chapitre I

Perturbations Des Réseaux Electriques

Figure (I.1.1)	Fluctuation de la fréquence.....	5
Figure (I .1.2)	Creux de tension.....	6
Figure (I .1.3)	Coupure de tension.....	6
Figure (I .1.4)	Papillotement de tension.....	10
Figure (I .1.5)	Cas particulier de déséquilibre du système triphasé de tension.....	10
Figure (I .1.6)	Tension distordue.(a) : Tension, (b) : Composantes harmonique.....	12
Figure (I .1.7)	Spectre des harmoniques.....	14

Chapitre II

Solutions possibles pour la dépollution harmonique

Figure (II.2.1)	Montage de Steinmetz pour le rééquilibrage.....	26
Figure (II .2.2)	filtre passive.....	27
Figure (II.2.3)	filtre passive amorti.....	27
Figure (II.2.4)	Schéma simplifié d'un montage dodécaphasé série.....	28
Figure (II.2.5)	Filtre passif série.....	29
Figure (II.2.6)	Filtre passif parallèle.....	29
Figure (II.2.7)	Filtre actif parallèle.....	31
Figure (II.2.8)	Filtre actif série.....	32
Figure (II.2.9)	Filtre actif mixte série-parallèle (UPQC).....	32
Figure(II.2.10)	Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.....	33
Figure(II.2.11)	Filtre actif série avec filtre passif parallèle.....	33
Figure(II.2.12)	Filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles.....	33
Figure(II.2.13)	Filtre actif parallèle avec une charge non-linéaire	34
Figure(II.2.14)	structure générale d'un filtre actif parallèle.....	36
Figure(II.2.15)	Onduleur de tension triphasé	37
Figure(II.2.16)	Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur dans le plan biphasé (α, β).....	39
Figure(II.2.17)	Allure des potentiels de phase lors d'un fonctionnement en pleine onde....	42
Figure(II.2.18)	contrôle par hystérésis. (a):Principe de contrôle, (b): Commande des interrupteurs.....	43
Figure(II.2.19)	Principe de commande des courants par MLI.....	44
Figure(II.2.20)	Hexagones des tensions et courants définis dans le plan α - β	45
Figure(II.2.21)	Schéma de la commande directe.....	46
Figure(II.2.22)	Schéma de la commande indirecte.....	47

Chapitre III Réseaux De Neurones

Figure(III.3.1)	Structure d'un neurone biologique.....	50
Figure(III.3.2)	Modèle non linéaire d'un neurone.....	51
Figure(III.3.3)	Modèle mathématique d'un neurone biologique.....	52
Figure(III.3.4)	Structure d'un neurone simple.....	55
Figure(III.3.5)	Réseau de neurones monocouche.....	56
Figure(III.3.6)	Réseau de neurones multicouches.....	57
Figure(III.3.7)	Fonction d'activation binaire à seuil.....	57
Figure(III.3.8)	Fonction d'activation à rampe avec saturation.....	58
Figure(III.3.9)	Fonction d'activation sigmoïde.....	58
Figure(III.3.10)	Méthode d'apprentissage supervisé.....	60
Figure(III.3.11)	Modèle d'apprentissage par renforcement.....	61
Figure(III.3.12)	Modèle d'apprentissage non-supervisé.....	62
Figure(III.3.13)	Structure d'un réseau de neurones (à une seule couche caché).....	62
Figure(III.3.14)	Représentation d'un ADALINE.....	63
Figure(III.3.15)	Réseau de neurone étudié type ADALINE.....	64

Chapitre IV Simulations Et Discussions

Figure (IV.4.1)	Structure générale du filtre actif parallèle étudié.....	68
Figure (4.1a)	Structure générale du filtre actif parallèle étudié.....	69
Figure (IV.4.2)	Tension d'une phase de réseaux.....	69
Figure (IV.4.3)	Courant d'une phase de réseaux.....	69
Figure (IV.4.4)	Tension des trois phases de réseaux.....	69
Figure (IV.4.5)	Courants des trois phases de réseaux.....	69
Figure (IV.4.6)	Spectres harmoniques de tension du réseau.....	70
Figure (IV.4.7)	Les harmoniques de Courant du réseau.....	70
Figure (IV.4.8)	Tension d'une phase de réseaux.....	70
Figure (IV.4.9)	Courant d'une phase de réseaux.....	70
Figure(IV.4.10)	Tension des trois phases de réseaux.....	71
Figure(IV.4.11)	Courants des trois phases de réseaux	71
Figure(IV.4.12)	Les Spectres harmoniques de tension du réseau.....	71
Figure(IV.4.13)	Les Spectres harmoniques de Courant du réseau.....	71
Figure(IV.4.14)	Tension aux bornes du condensateur.....	71
Figure(IV.4.15)	Courant injecter par l'onduleur.....	72
Figure(IV.4.16)	Tension de charge d'une phase.....	72

Figure(IV.4.17)	Courant de charge d'une phase.....	72
Figure(IV.4.18)	Tension de charge Trois phase.....	72
Figure(IV.4.19)	Tension de charge Trois phase.....	72
Figure(IV.4.20)	Modélisation du (p-q théorie) par un réseau de neurone.....	73
Figure(IV.4.21)	Tension d'une phase de réseaux.....	74
Figure(IV.4.22)	Courant d'une phase de réseaux.....	74
Figure (IV.4.23)	Tension des trois phases de réseaux.....	74
Figure(IV.4.24)	Courants des trois phases de réseaux.....	74
Figure(IV.4.25)	Les Spectres harmoniques de tension du réseau.....	75
Figure(IV.4.26)	Les Spectres harmoniques de Courant du réseau.....	75
Figure(IV.4.27)	Tension de charge d'une phase.....	75
Figure(IV.4.28)	Courant de charge d'une phase.....	75
Figure(IV.4.29)	Tension de charge Trois phase.....	75
Figure(IV.4.30)	Courant de charge des Trois phases.....	75
Figure(IV.4.31)	Taux de distorsion harmonique en courant côté réseau.....	76
Figure(IV.4.32)	Tension aux bornes du condensateur.....	77
Figure(IV.4.33)	Courant injecter par l'onduleur.....	77
Figure(IV.4.34)	Comparaison entre les deux Méthode, PQ et Réseau neurone, du Taux de distorsion harmoniques.....	78
Figure(IV.4.35)	Comparaison entre les deux Méthode, PQ et Réseau neurone, de la tension de condensateur de stockage.....	79
Figure(IV.4.36)	Tension d'une phase de réseaux.....	80
Figure(IV.4.37)	Courant d'une phase de réseaux.....	80
Figure(IV.4.38)	Tension des trois phases de réseaux.....	80
Figure(IV.4.39)	Courants des trois phases de réseaux.....	80
Figure(IV.4.40)	Les Spectres harmoniques de tension du réseau.....	80
Figure(IV.4.41)	Les Spectres harmoniques de Courant du réseau.....	80
Figure(IV.4.42)	Tension de charge d'une phase.....	81
Figure(IV.4.43)	Courant de charge d'une phase.....	81
Figure(IV.4.44)	Tension de charge Trois phase.....	81
Figure(IV.4.45)	Courant de charge des Trois phases.....	81
Figure(IV.4.46)	Taux de distorsion harmonique en courant côté réseau.....	81
Figure(IV.4.47)	Tension aux bornes du condensateur.....	82
Figure(IV.4.48)	Courant injecter par l'onduleur.....	82
Figure(IV.4.49)	Tension d'une phase de réseaux.....	83
Figure(IV.4.50)	Courant d'une phase de réseaux.....	83

Figure(IV.4.51)	Tension des trois phases de réseaux.....	84
Figure(IV.4.52)	Courants des trois phases de réseaux.....	84
Figure(IV.4.53)	Les Spectres harmoniques de tension du réseau.....	84
Figure(IV.4.54)	Les Spectres harmoniques de Courant du réseau.....	84
Figure(IV.4.55)	Tension de charge d'une phase.....	84
Figure(IV.4.56)	Courant de charge d'une phase.....	84
Figure(IV.4.57)	Tension de charge Trois phase.....	85
Figure(IV.4.58)	Courant de charge des Trois phases.....	85
Figure(IV.4.59)	Taux de distorsion harmonique en courant côté réseau.....	85
Figure(IV.4.60)	Tension aux bornes du condensateur.....	86
Figure(IV.4.61)	Tension aux bornes du condensateur 0.3s 1s.....	86
Figure(IV.4.62)	Courant injecter par l'onduleur.....	87
Figure(IV.4.63)	Comparaison entre les deux Méthode, PQ et Réseau neurone, du Taux de distorsion harmoniques.....	88
Figure(IV.4.64)	Comparaison entre les deux Méthode, PQ et Réseau neurone, du Taux de distorsion harmoniques.....	88

Liste des tableaux

Chapitre I Perturbations Des Réseaux Electriques

Tableau (I .1.1)	Conséquences des creux de tension sur quelques équipements électriques sensible.....	7
Tableau (I.1.2)	Les quatre types de surtensions présentes sur les réseaux électriques.....	8
Tableau (I.1.3)	Niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux basse tension (CEI 61000-2-2).....	19
Tableau (I .1.4)	Limites des composantes harmoniques du courant (CEI 61000 3-2)...	20
Tableau (I .1.5)	Limites d'émission des courants harmoniques Pour l'étape I (CEI 61000-3-4).....	21

Chapitre II

Solutions possibles pour la dépollution harmonique

Tableau(II .2.1)	Tensions générées par l'onduleur.....	39
Tableau (II .2.2)	Comparaison entre le filtre actif parallèle et le filtre passif shunt.....	48

Chapitre IV Simulations Et Discussions

Tableau(IV. 4.1)	Les paramètres du système.....	68
-------------------------	--------------------------------	----

SOMMAIRE

	Dédicace	
	Remerciements	
	Nomenclature	
	Sommaire	
	Liste des tableaux	
	Liste des figures	
	Résumé	
	Introduction générale.....	1
	Chapitre I: Perturbations des réseaux électriques	
I.1	Introduction	3
I.2	Qualité de l'énergie électrique	3
I.2.1	Identification des problèmes affectant la qualité de l'énergie.....	4
I.3	Perturbations électriques et leurs origines	4
I.3.1	Fluctuations de la fréquence à 50 Hz	5
I.3.2	Variations de l'amplitude de la tension	6
I.3.2.1	Creux et coupures de tension.....	6
I.3.2.1.1	Origines des creux et coupures de tension	7
I.3.2.1.2	Effets et conséquences des creux de tension	7
I.3.2.2	Surtensions temporaires ou transitoires	8
I.3.2.2.1	Conséquences des Surtensions	9
I.3.2.3	Fluctuations de tension ou Papillotement.....	9
I.3.3	Déséquilibre du courant et de tension.....	10
I.3.3.1	Origines du déséquilibre et Conséquences.....	11
I.3.4	Perturbations Harmoniques et inter harmoniques.....	12
I.3.4.1	Origine des perturbations harmoniques.....	13
I.3.4.2	Inter et infra harmoniques	13
I.3.4.3	Conséquences des harmoniques.....	14
I.3.4.4	Caractérisation des perturbations harmoniques.....	15
I.3.4.5	Normes concernant les perturbations harmoniques.....	18
I.3.5	Inter harmoniques	22
I.4	Conclusion.....	22
	Chapitre II: Solutions possibles pour la dépollution harmonique	
II.1	Introduction.....	23
II.2	Solutions pour améliorer la qualité de l'énergie électrique.....	23
II.2.1	Solutions possibles pour réduire les harmoniques.....	24
II.2.2	Solutions de dépollution des réseaux électriques	25
II.2.2.1	Solutions traditionnelles de dépollution	25
II.2.2.1.1	Rééquilibrage des courants et des tensions.....	25
II.2.2.1.2	Compensation des creux et des interruptions.....	26
II.2.2.1.3	Compensation de la puissance réactive	26

II.2.2.1.4	Compensation des courants harmonique.....	27
II.2.2.2	Solutions modernes de dépollution.....	29
II.2.2.2.1	Redresseur à MLI.....	30
II.2.2.2.2	Filtres actifs.....	30
II.3	Filtre actif parallèle (FAP).....	34
II.3.1	Principe de fonctionnement du FAP.....	35
II.3.2	Structure générale du Filtre Actif Parallèle.....	35
II.3.3	Etude de la partie puissance.....	36
II.3.3.1	Structure générale d'Onduleur de tension.....	36
II.3.3.2	Tension fournie par l'Onduleur.....	37
II.3.3.3	Système de stockage d'énergie.....	40
II.3.3.4	Filtre de sortie (découplage).....	41
II.3.4	Etude de la partie commande.....	41
II.3.4.1	Commande de l'onduleur.....	42
II.3.4.2	Commande du filtre actif parallèle.....	45
II.4	Points d'insertion du filtre actif parallèle.....	47
II.4.1	Comparaison entre le FAP et le filtre passif shunt.....	48
II.4.2	Coût du filtre actif parallèle.....	48
II.5	Avantage des filtres harmoniques.....	48
II.6	Conclusion.....	49

Chapitre III: Réseaux de Neurones

III.1	Introduction.....	50
III.2	Le Neurone Artificiel.....	51
III.2.1	Définition.....	51
III.2.2	Types et structures des réseaux de neurones artificiels (RNA).....	52
III.2.2.1	Types de RNA.....	52
III.2.3	Perceptron.....	53
III.2.3.1	Perceptron multicouche.....	53
III.2.3.2	Réseau de neurones linéaire.....	54
III.2.3.3	Réseau Hopfield.....	54
III.3	Structure d'un neurone.....	54
III.3.1	Structure d'un réseau de neurones à couches simples.....	55
III.3.2	Structure des réseaux de neurones multicouches.....	56
III.4	Fonctions d'activation de RNA.....	57
III.4.1	Fonction binaire à seuil.....	57
III.4.2	Fonction à rampe avec saturation.....	58
III.4.3	Fonction sigmoïde.....	58
III.5	Apprentissage.....	59
III.5.1	Modes d'apprentissage des réseaux de neurones artificiels (RNA).....	59
III.5.1.1	Apprentissage supervisé.....	59
III.5.1.2	Apprentissage par renforcement.....	60
III.5.1.3	Apprentissage non-supervisé.....	61
III.6	Réseau de neurones type ADALINE.....	62
III.6.1	Application des RNAs à l'estimation du contenu harmonique.....	63
III.7	Conclusion.....	66

Chapitre IV: Simulations et discussions

IV.1	Introduction.....	67
IV.2	Problématique.....	68

IV.3	Résultats de simulation et discussions.....	69
IV.4	Simulation une tension sinusoïdale.....	69
IV.4.1	Fonctionnement sans filtre actif FAP.....	70
IV.4.2	Fonctionnement avec FAP.....	70
IV.4.2.1	Simulation avec la Méthode des puissances instantanées p-q.....	73
IV.4.2.2	Simulation avec méthode p-q modélisée par un réseau de neurone.....	78
IV.4.2.3	Comparaison entre les deux Méthode, PQ et Réseau de neurone.....	80
IV.5	Simulation avec un intervalle de tenson source perturbée.....	80
IV.5.1	Fonctionnement du FAP avec méthode p-q.....	83
IV.5.2	Fonctionnement du FAP méthode p-q modélisée par un réseau de neurone...	88
IV.6	Comparaison entre les deux Méthode, PQ et Réseau de neurone.....	89
	Conclusion générale.....	
	Références bibliographiques.....	

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale :

Un des phénomènes importants entraînant la dégradation de la qualité de l'énergie est la présence de la pollution harmonique sur les réseaux électriques. Les conséquences les plus connues de ce phénomène sont la destruction de condensateurs, le déclenchement intempestif de disjoncteurs, les phénomènes de résonance avec les éléments composant le réseau, réchauffement de conducteur de neutre et de transformateur...etc. En comparaison avec les moyens classiques de mitigation, tels que le surdimensionnement des installations ou le filtrage passif, le filtrage actif est considéré par les spécialistes des réseaux comme étant la solution avant-gardiste pour filtrer les harmoniques.

Plusieurs solutions de dépollution des réseaux électriques ont été déjà proposées dans la littérature. Parmi les solutions traditionnelles très utilisées on trouve le filtre passif, qui est utilisé pour absorber les courants harmoniques et aussi pour relever le facteur de puissance, mais cette solution traditionnelle présente un certain nombre d'inconvénients tel que la résonance dans les systèmes du réseau électrique; celle-ci peut entraîner une tension harmonique élevée, des courants harmoniques importants dans le condensateur du filtre et dans le réseau électrique.

Grâce à l'évolution de la technologie des semi-conducteurs, des nouveaux composants de puissance rapides tel que GTO et IGBT ont permis la mise en exploitation entre autre d'une solution moderne de dépollution des réseaux électriques plus performante, plus efficace et répondant le mieux aux contraintes industrielles qu'est les filtres actifs. Ils contiennent des modules électroniques assez avancés pour analyser le signal à l'entrée d'une charge et y injecter les harmoniques présents, mais avec une polarité inverse. Principalement, les filtres actifs servent à dépolluer le réseau et garder le THD selon la norme utilisée qui régit le contrôle des distorsions d'harmoniques. Entre autre, les filtres actifs parallèles, actifs séries et la combinaison parallèle-série (aussi appelée UPQC) sont les plus courants industriellement. Le filtre actif parallèle peut être utilisé pour compenser les courants harmoniques et déséquilibrés de même que la puissance réactive.

Notre travail consiste à l'étude, la modélisation et la simulation du système (Réseau électrique - Filtre actif parallèle – réseau de neurone) pour la compensation des harmoniques de courant engendrées par le convertisseur AC/DC selon deux cas. Le premier cas une simulation avec la méthode des puissances instantanées p-q, le deuxième cas avec La méthode p-q modélisée par un réseau de neurone artificiel (ANN).

Ce memoire est divisé en quatre chapitres :

Introduction générale

Le premier chapitre sera consacré à la description des perturbations en courant et en tension pouvant intervenir dans un réseau électrique. Les origines et les conséquences de ces perturbations seront analysées. Deux normes internationales concernant les limites des harmoniques de courant injecté dans un réseau électrique sont présentées.

Dans le second chapitre, nous présenterons les solutions traditionnelles et modernes de dépollution et nous discuterons aussi des filtres actifs, leur comportement et leur configuration de base. On s'est intéressé spécialement au filtre actif parallèle à structure tension, Il représente actuellement la solution active la plus performante.

Le troisième chapitre, sera consacré à l'étude détaillée sur les réseaux de neurones.

Nous discuterons les résultats de simulation réalisés par MATLAB Simulink. Le premier cas avec la méthode des puissances instantanées p-q le deuxième cas avec La méthode p-q modélisée par un réseau de neurone artificiel (ANN). Les deux cas sont simulés lorsque le filtre actif parallèle est considéré dans un réseau source non pollué d'une part, l'autre part lorsque le filtre actif parallèle est considéré dans un réseau source pollué.

Enfin une étude comparative est établie sur la base des résultats obtenus.

Finalement, nous concluons ce travail en établissant les avantages de la commande la plus performante, ainsi que les perspectives et les recommandations concernant le filtre actif parallèle à structure tension.

Chapitre I :

Perturbations des

réseaux électriques

I.1 Introduction :

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

En se propageant à travers les réseaux électriques, les tensions et les courants sont idéalement des ondes sinusoïdales à la fréquence fondamentale du réseau. La qualité de l'énergie fournie aux utilisateurs dépend de celle de la tension au point de livraison. Elle peut être affectée par certains incidents, soit externes comme la défaillance de la source d'alimentation ou bien inhérents à l'installation. La source des perturbations est, soit une anomalie du côté du réseau électrique, soit la nature de fonctionnement des charges non-linéaires. D'ailleurs, L'utilisation accrue, dans l'industrie, des systèmes commandés à base d'électronique de puissance provoque de plus en plus des problèmes de perturbations au niveau des réseaux électriques. Ces défauts détériorant la qualité de la tension se manifestent sous formes de différentes perturbations: surtension, déséquilibre, fluctuation, harmonique et creux de tension. Nous commencerons ce chapitre par un exposé des principaux défauts affectant la tension et le courant du réseau électrique. Nous parlerons également de leurs origines, des conséquences matérielles et des normes internationales imposées aux utilisateurs

I.2 Qualité de l'énergie électrique :

Dans un premier temps, on introduit les bases théoriques pour étudier les perturbations liées à l'onde électrique, la théorie généralisée de l'énergie électrique, l'origine et les effets des perturbations électriques qui font l'objet de ce mémoire en (les perturbations harmoniques et les perturbations sur la valeur efficace de la tension réseau) et finalement un résumé des principales normes concernant la qualité de l'énergie. [14]

La qualité de l'énergie électrique, au niveau de la distribution, se réfère largement à maintenir une tension sinusoïdale, d'une amplitude et fréquence nominales. De ce fait la notion « qualité de l'énergie » est devenue très importante, en raison de l'utilisation à grande échelle de systèmes à base d'électronique de puissance à la fois par les utilisateurs et les fournisseurs. [7]C'est le concept de maintenir les formes d'onde de la tension et du courant sinusoïdale avec

une fréquence constante, par les systèmes de transmission, distribution et de production de l'énergie électrique, et habituellement pris pour signifier des formes d'onde des tensions équilibrées et non distordues.[1] L'équation correspondant à l'interprétation la plus correcte est donc :

Qualité de l'énergie électrique = Continuité de la tension + Qualité de la Tension

I.2.1 Identification des problèmes affectant la qualité de l'énergie :

Les perturbations de tension sont la cause la plus fréquente d'un large éventail de perturbations dans les systèmes d'alimentation industriels et commerciaux [7]. Les perturbations peuvent être transitoires, de courte durée, de longue durée ou périodiques, sont classée comme des problèmes de la qualité d'énergie. Toutefois, les problèmes les plus souvent rencontrés sont [1]:

- ✓ Déséquilibre du système triphasé
- ✓ Creux de tension de courte durée
- ✓ Fluctuations de tension (ou flicker)
- ✓ Distorsion harmonique
- ✓ Coupures de courte durée
- ✓ Surtensions de courte durée
- ✓ Perturbations transitoires

I.3 Perturbations électriques et leurs origines :

L'énergie électrique est fournie sous forme de tension constituant un système sinusoïdal triphasé dont la fréquence est de 50 Hz ou de 60 Hz. .les perturbations électriques aspectant l'un des quatre paramètres cités précédemment [16] :

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

Dans la pratique, l'énergie électrique distribuée se présente sous la forme d'un ensemble de tension constituant un système alternatif triphasé qui possède quatre caractéristiques principales distinctes de perturbations : fréquence, forme d'onde et dissymétrie, amplitude. [6]

❖ **Fluctuations de la fréquence à 50 Hz** : elles sont rares et ne sont observées que lors de circonstances exceptionnelles. par exemple certains défauts graves du réseau, au niveau de la production ou du transport;[3]

❖ **Modification de la forme d'onde** : cette onde n'est alors plus sinusoïdale, et peut être considérée comme représentable par une onde fondamentale à 50 Hz, associée soit à des harmoniques de fréquence multiple entier de 50 Hz, soit même parfois à des ondes de fréquence quelconque.

❖ **Dissymétrie du système triphasé** : que l'on appelle déséquilibre ; C'est la situation où les trois tensions du système triphasé ne sont pas égales en amplitude ou ne sont pas déphasées de 120° les unes par rapport aux autres. [3]

❖ **Variations de l'amplitude de la tension**: il ne s'agit pas des variations lentes de tension qui sont corrigées par les transformateurs de réglage en charge, mais de Variations rapides de tension se présentant souvent sous forme d'à-coups brusques. [16]

On peut, en plus, mentionner un type particulier de perturbations difficile à classer puisqu'il concerne tout à la fois l'amplitude et la forme d'onde : ce sont les variations transitoires d'amplitudes dont la durée est inférieure à 10 ms.

I.3.1 Fluctuations de la fréquence à 50 Hz :

Dans le cas idéal, les trois tensions sont alternatives et sinusoïdales d'une fréquence constante de 50 ou 60 Hz selon le pays. Des variations de fréquence peuvent être provoquées par des pertes importantes de production, Cependant, ces variations sont en général très faibles (moins de 1%) et ne nuisent pas au bon fonctionnement des équipements électriques ou électroniques. [6] Les fluctuations de tension sont des variations périodiques ou erratiques de l'enveloppe de la tension, [2] Il faut également remarquer que les variations de fréquence peuvent être bien plus importantes pour les réseaux autonomes. Les fluctuations de fréquence sont observées le plus souvent sur des réseaux non interconnectés ou des réseaux sur groupe électrogène [15]

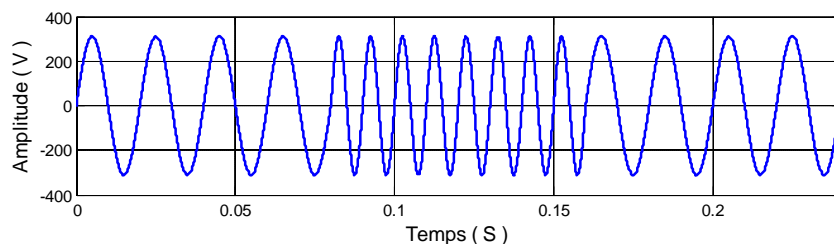


Figure I.1 : Fluctuation de la fréquence

I.3.2 Variations de l'amplitude de la tension :

L'amplitude de la tension est un facteur crucial pour la qualité de l'électricité. Elle constitue en général le premier engagement contractuel du distributeur d'énergie.

I.3.2.1 Creux et coupures de tension :

Le creux de tension est une diminution brutale de la tension à une valeur située entre 10% et 90% de la tension nominale pendant une durée allant de 10ms jusqu'à quelques secondes.[8] [6] Les creux de tension sont dus à des phénomènes naturels comme la foudre, ou à des défauts sur l'installation ou dans les réseaux tant publics que ceux des utilisateurs. Une coupure de tension quand elle est une diminution brutale de la tension à une valeur supérieure à 90% de la tension nominale ou disparition totale pendant une durée généralement comprise entre 10ms et une minute pour les coupures brèves et supérieure à une minute pour les coupures longues. La plupart des appareils électriques admettent une coupure totale d'alimentation d'une durée inférieure à 10ms. [2]

Ils peuvent provoquer le déclenchement d'équipements, lorsque leur profondeur et leur durée excèdent certaines limites (dépendant de la sensibilité particulière des charges. [15]. Il s'agit d'événements aléatoires imprévisibles pour la plupart des cas (Fig. 1.2). Les coupures sont un cas particulier de creux de tension de profondeur supérieur à 90% (Fig. 1.3).

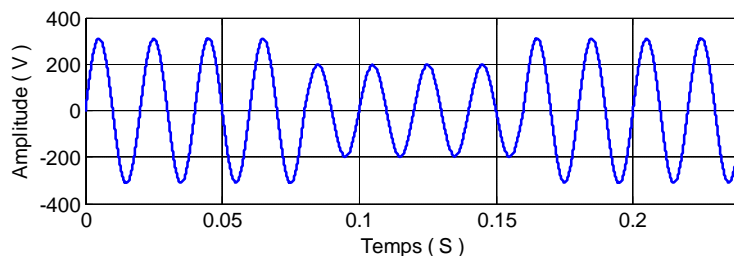


Figure I.2 : Creux de tension

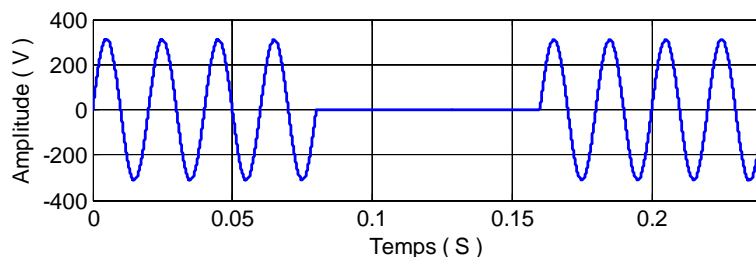


Figure I.3 : Coupure de tension

I.3.2.1.1 Origines des creux et coupures de tension :

Les creux de tension ont pour principale origine les courts-circuits affectant le réseau électrique ou les installations raccordées, et le démarrage des moteurs de forte puissance. Toutefois, les courts-circuits restent la principale cause de creux de tension et de coupures brèves. Ils engendrent des variations brusques de l'amplitude de la tension et pour cette raison, les creux de tension correspondants se caractérisent par une forme rectangulaire en fonction de temps. Les courts-circuits peuvent affecter une, deux ou trois des phases et peuvent engendrer des déphasages supplémentaires entre elles [8]. Il y a deux types de phénomène à l'origine des creux de tension, qu'il soit sur le réseau de transport (HT), sur le réseau de distribution (BT et MT) ou sur l'installation elle-même. [17][18]

I.3.2.1.2 Effets et conséquences des creux de tension :

Les creux et les coupures de tension sont susceptibles de perturber le fonctionnement de nombreuses installations industrielles, tertiaires et domestiques raccordées au réseau. En effet, ce type de perturbation est la cause la plus fréquente de problèmes de qualité d'énergie qui peut se traduire par des conséquences néfastes. Le Tableau 1.1 résume les conséquences néfastes causées par les creux de tension sur quelques matériels industriels et tertiaires sensibles. [17][19]

Tableau I.1 : Conséquences des creux de tension sur quelques équipements électriques sensible

Type d'équipements	Conséquences néfastes
Systèmes d'éclairage	Moins de luminosité, extinction et réallumage.
Systèmes à base d'électronique de puissance	Arrêt ou mauvais fonctionnement des équipements.
Dispositifs de protection	Déclenchement et ouverture des contacteurs
Moteurs asynchrones	Ralentissement, décrochage, 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, décrochage, surintensité au retour de la tension, destruction éventuelle de matériel au niveau du convertisseur.

I.3.2.2 Surtensions temporaires ou transitoires :

En électrocinétique, un réseau électrique possède en général une tension normale : on parle aussi de tension nominale. En basse tension, cette tension nominale peut être par exemple de 230 V entre phase et neutre. En moyenne tension, celle-ci est normalisée à 20 kV (entre phases) et 11,5 kV (entre phase et terre). Toute tension appliquée à un équipement dont la valeur de crête sort des limites d'un gabarit défini par une norme ou une spécification est une surtension [17]. Les surtensions sont une des causes possibles de défaillances d'équipements électriques ou électroniques, bien que ceux-ci soient de mieux en mieux protégés contre ce type d'incident. Les surtensions sont de trois natures:[8]

- Temporaires à fréquence industrielle;
- De manœuvre;
- D'origine atmosphérique (foudre).

Elles peuvent apparaître:

- En mode différentiel (entre conducteurs actifs ph/ph – ph/neutre) ;
- En mode commun (entre conducteurs actifs et la masse ou la terre).

Tableau I.2 : Les quatre types de surtensions présentes sur les réseaux électriques

Surtension	Durée	Raideur du front de montée, ou fréquence	Amortissement en fonction de la distance
Atmosphérique	Très courte (μS)	Très élevée (100kV/ μS)	Fort
Décharge électrostatique	Très courte (nS)	Elevée (≈ 10 Mhz)	Très fort
Manœuvre	Courte (mS)	Moyenne (1 à 200 kHz)	Moyen
Temporaire	Long (S), voir très longues (h)	Fréquence du réseau	Nul

Des moyens de protection contre les surtensions existent et sont efficaces. Pour protéger il convient d'installer :

- Un parasurtenseur, qui protégera l'installation des surtensions émanant du réseau (fluctuations, etc.) et qui s'installe en aval du parafoudre.
- Une prise ou un bloc multiprise parafoudre, qui protégera directement l'appareil qu'il relie au secteur.
- Un parafoudre, qui protégera l'installation de la surtension créée par la foudre et évitera par conséquent l'endommagement des appareils électriques de l'habitat. Le parafoudre s'installe dans le tableau électrique.

I.3.2.2.1 Conséquences des Surtensions :

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

- Claquage diélectrique, cause de destruction de matériel sensible (composants électroniques...);
- Dégradation de matériel par vieillissement (surtensions non destructives mais répétées);
- Coupure longue entraînée par la destruction de matériel (perte de facturation pour les distributeurs, pertes de production pour les industriels);
- Perturbations des circuits de contrôle commande et de communication à courant faible;
- Contraintes électrodynamiques et thermiques (incendie) causées par:
 - La foudre essentiellement;
 - Les surtensions de manœuvre qui sont répétitives et dont la probabilité d'apparition est nettement supérieure à celle de la foudre et de durée plus longue. [17] [8]

I.3.2.3 Fluctuations de tension ou Papillotement :

Des variations rapides de tension, répétitives ou aléatoires, sont provoquées par des variations rapides de puissance absorbée ou produite par des installations telles que les soudeuses, fours à arc, éoliennes, etc. [15]. Les fluctuations de tension sont des variations périodiques ou erratiques de l'enveloppe de la tension. Ce sont des variations brutales de l'amplitude de la tension situées dans une bande de $\pm 10\%$ et se produisent sur un intervalle de temps de quelques centièmes de secondes [6].

Elles sont en particulier dues à la propagation sur les lignes du réseau de courants d'appel importants. Ce phénomène de papillotement est appelé flicker. Un exemple de fluctuation de tension est montré dans la figure (1.4).

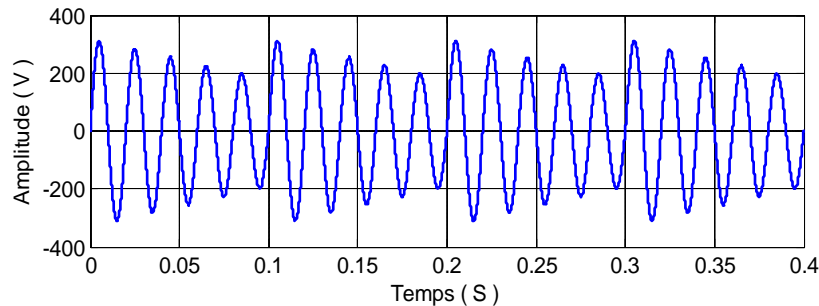


Figure I.4 : Papillotement de tension

I.3.3 Déséquilibre du courant et de tension :

L'outil principal pour étudier les déséquilibres sont les composantes symétriques. Cette théorie a été développée par Charles L. Fortescue à la fin de 1913 [14].

Les déséquilibres sont généralement dus à des charges monophasées car dans ce cas les courants absorbés sur les trois phases sont d'amplitude et/ou de phase différente, d'où un déséquilibre des trois tensions. [6].

Lorsque les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalées d'un angle de 120° les unes par rapport aux autres, on parlera de déséquilibres du système triphasé (figure 1.5).[2] Un réseau électrique triphasé équilibré alimentant un récepteur électrique triphasé non équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau

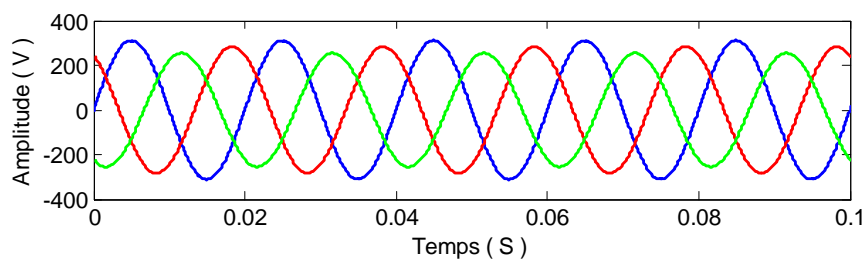


Figure I.5 : Cas particulier de déséquilibre du système triphasé de tension

I.3.3.1 Origines du déséquilibre et Conséquences :

On parle d'un déséquilibre d'amplitude lorsque les trois tensions n'ont pas la même valeur efficace, et d'un déséquilibre de phase lorsque le déphasage entre les trois phases successives n'est pas de 120° . Le niveau de déséquilibre est lié à la fois à la puissance et la localisation des charges perturbatrices, et à la puissance de court-circuit du réseau amont. Le bouclage des réseaux, favorable à l'obtention d'une puissance de court-circuit élevée, permet de diminuer le degré de déséquilibre [8]. Un récepteur électrique triphasé, 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 [15].

Les déséquilibres de tension engendrent des composantes inverses de courant, qui provoquent des couples de freinage parasites et des échauffements dans les moteurs à courant alternatif. Ils peuvent également perturber le fonctionnement des dispositifs à thyristors à commande de phase [8]. Dans le domaine des protections contre les risques électriques, ce type de perturbation est également gênant, car les déséquilibres de courant limitent l'utilisation du montage de Nicholson (mise en commun de quatre transformateurs de courant) pour détecter des courants résiduels dus à un défaut d'isolement [20]. On caractérise les asymétries d'amplitude et de déphasage des tensions triphasées en régime permanent par deux indices, soient : le taux de déséquilibre inverse et le taux de déséquilibre homopolaire [21] :

- **Le taux de déséquilibre de tension inverse** : est défini, suivant la méthode des composantes symétriques, comme étant le rapport existant entre le module de la composante inverse du fondamental de la tension et celui de la composante directe :

$$\delta^- = \frac{V_1^-}{V_1^+} \quad (\text{I. 1})$$

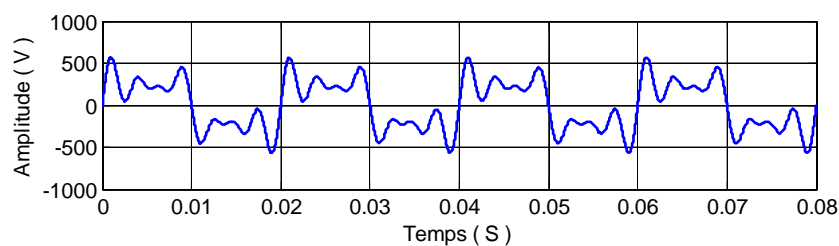
- **Le taux de déséquilibre de tension homopolaire** : est défini comme étant le rapport du module de la composante homopolaire fondamentale de la tension et celui de la composante directe :

$$\delta^0 = \frac{V_1^0}{V_1^+} \quad (\text{I. 2})$$

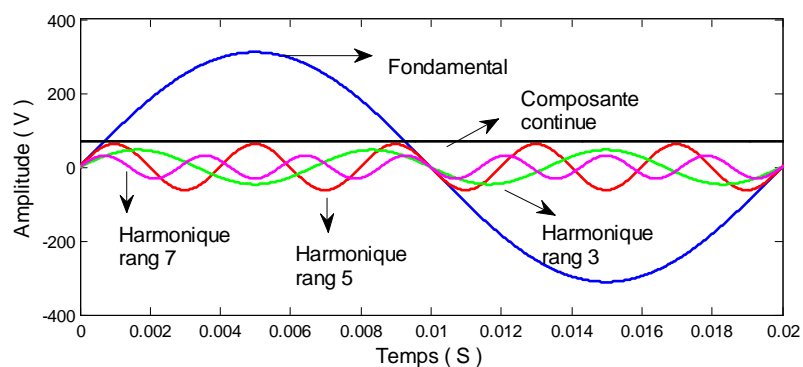
I.3.4 Perturbations Harmoniques et inter harmoniques :

Du point de vue de la qualité de l'énergie on entend par perturbation électrique tout écart de la tension réseau par rapport à sa valeur et à sa forme nominale [14].

Les harmoniques sont une superposition sur l'onde fondamentale à 50Hz, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples entier de celle du fondamental. Montre la superposition de l'harmonique d'ordre 3 sur un courant fondamental de fréquence (50H). La principale source de la présence des harmoniques dans les réseaux électrique est l'utilisation de plus en plus croissante d'équipements de l'électronique de puissance à base de thyristors. Les inter harmoniques sont superposés à l'onde fondamentale mais ne sont pas des multiples entiers de la fréquence du réseau. L'apparition des inters harmoniques est en augmentation et leurs origines principales sont les convertisseurs de fréquence, les variateurs de vitesse et d'autres équipements similaires de contrôle-commande [4] [2].



(a)



(b)

Figure I.6 : Tension distordue. (a) : Tension, (b) : Composantes harmonique

I.3.4.1 Origine des perturbations harmoniques :

En principe, les harmoniques proviennent de charges dont la caractéristique tension/courant n'est pas linéaire, ainsi que les convertisseurs électroniques de puissance, les entraînements de moteurs, les alimentations à découpage, les fours à arc, les machines à souder, etc.

Chaque système contient des composants électroniques quelle que soit sa puissance, produit des courants riches en harmoniques dont le spectre dépend beaucoup de la nature de la charge. Ces courants harmoniques circulent à travers les impédances du réseau et par conséquent créent des tensions harmoniques qui peuvent perturber le fonctionnement des autres utilisateurs raccordés à la même source [22].

L'impédance de la source aux différentes fréquences harmoniques a donc un rôle fondamental dans la sévérité de la distorsion harmonique en tension [17]. Actuellement, les équipements à base de thyristors constituent la principale source de ces harmoniques.

Ces appareils, dont les caractéristiques électriques varient avec la valeur de la tension, sont assimilables à des générateurs de courants harmoniques: appareils d'éclairage fluorescent, variateurs de vitesse, redresseurs, téléviseurs, ordinateurs, etc. [8]

I.3.4.2 Inter et infra harmoniques :

❖ **Inter harmoniques** : Ce sont des composantes sinusoïdales avec des fréquences qui ne sont pas des fréquences multiples entières de celle de la fondamentale [17]. Les inter harmoniques sont superposés à l'onde fondamentale mais ne sont pas des multiples entiers de la fréquence du réseau. L'apparition des interharmoniques est en augmentation et leurs origines principales sont les convertisseurs de fréquence, les variateurs de vitesse et d'autres équipements similaires de contrôle-commande [8].

❖ **Infra harmoniques** : Ce sont des composantes qui sont à des fréquences inférieures à celle de la fondamentale.

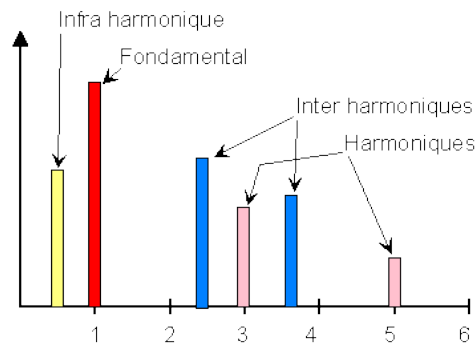


Figure I.7 : Spectre des harmoniques

I.3.4.3 Conséquences des harmoniques :

Les courants harmoniques se propagent dans le réseau électrique, déforme l'allure du courant de la source et polluent les consommateurs alimentés par ce même réseau. Ils peuvent occasionner des incidents au niveau de l'appareillage du client et donner lieu à des surcoûts de production d'énergie importants. On peut classer les effets engendrés par les harmoniques en deux types : les effets instantanés et les effets à terme [2].

a. Effets instantanés :

Les effets instantanés apparaissent immédiatement dans certains appareillages.

- **Défauts de fonctionnement de certains équipements électriques** : En présence d'harmoniques, la tension et le courant peuvent changer plusieurs fois de signe dans une demi-période. Les appareils dont le fonctionnement est basé sur le passage à zéro des grandeurs électriques peuvent être affectés.
- **Troubles fonctionnels des micro-ordinateurs** : Les effets sur ces équipements peuvent se manifester par la dégradation de la qualité de l'image et par des couples pulsatoires des moteurs d'entraînement de disque.
- **Erreurs dans les appareils de mesure** : Certains appareils de mesure et les compteurs d'énergie à induction présentent des dégradations de mesure et des erreurs de lecture supplémentaires en présence d'harmoniques.
- **Vibrations et bruits** : Les courants harmoniques génèrent également des vibrations et des bruits acoustiques, principalement dans les appareils électromagnétiques (transformateurs, inductances et machines tournantes). [2]

b. Effets à terme :

Ils se manifestent après une exposition plus ou moins longue à la perturbation harmonique. L'effet à terme le plus important est de nature thermique, il se traduit par l'échauffement. Il conduit à une fatigue prématurée du matériel, des lignes et amènent un déclassement des équipements.

- **Echauffement des câbles et des équipements :** Ces Effets peuvent être à moyen terme (de quelques secondes à quelques heures) ou à long terme (de quelques heures à quelques années) et concernent les câbles qui peuvent être le siège du sur échauffement du neutre et les matériels bobines comme les transformateurs ou les moteurs.
- **Echauffement des condensateurs :** L'échauffement est cause par les pertes dues au phénomène d'hystérésis dans le di électrique. Les condensateurs sont donc sensibles aux surcharges, qu'elles soient dues à une tension fondamentale trop élevée ou à la présence d'harmoniques. Ces échauffement peuvent conduire au claquage
- **Echauffement du aux pertes supplémentaires des machines et des transformateurs :** Echauffement cause par les pertes dans le stator des machines et principalement dans leurs circuits rotoriques (cages, amortisseurs, circuits magnétiques) à cause des différences importantes de vitesse entre les champs tournants inducteurs harmoniques et le rotor. Les harmoniques génèrent aussi des pertes supplémentaires dans les transformateurs, par Effet Joule dans les enroulements, accentuées par l'effet de peau et des pertes par hystérésis et courants de Foucault dans les circuits magnétiques.

I.3.4.4 Caractérisation des perturbations harmoniques :

A fin de caractériser les perturbations harmoniques, diverses grandeurs et paramètres ont été définies, dans ce qui suit nous allons indiquer les plus employés. Le taux global de distorsion harmonique (THD) et le facteur de puissance sont les plus employés pour quantifier respectivement les perturbations harmoniques et la consommation de puissance réactive. [2]

a. Le taux de distorsion harmoniques :

Notre étude se limite au cas où la source de tension est sinusoïdale et où le courant absorbe par la charge est entache de composantes harmoniques. Dans ces conditions, le taux global de distorsion harmonique est bien adapté pour quantifier le degré de pollution harmonique sur les réseaux électriques. Le THD s'exprime par rapport à la fréquence fondamentale et caractérise l'influence des harmoniques sur l'onde de courant d'enformée. Il est donné par l'expression suivante [17]:

❖ **Taux harmonique de rang h :**

$$G_h = \frac{C_h}{C_1} * 100 \% \quad (I.3)$$

Où C_h représente la valeur efficace de la composante harmonique de rang h, C_1 représente la valeur efficace de la composante fondamentale.

❖ **Taux global de distorsion harmonique :**

Ce taux est estimé selon la relation suivante [17]:

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^N \frac{C_h^2}{C_1^2}} * 100 \% \quad (I.4)$$

Habituellement on prend N égal 50.

Deux taux globaux de distorsion harmonique sont distingués :

- le taux de distorsion harmonique en courant, noté THD_I
- le taux de distorsion harmonique en tension, noté THD_V

Le THD_I ne dépend que des valeurs efficaces du courant de charge. S'exprime pratiquement sous la forme :

$$THD_I (\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} I_h^2}}{I_1} \quad (1.5)$$

Et le THD_V s'exprime pratiquement sous la forme [17] :

$$THD_V (\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} V_h^2}}{V_1} \quad (1.6)$$

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

b. Le facteur de puissance :

Pour la transmission efficace de l'énergie d'une source à une charge, on doit maximiser la puissance moyenne [23]. En présence des harmoniques, la puissance apparente S est composée de trois parties: active P , réactive Q et déformante D . Son expression est donnée par l'équation suivante [2]:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (1.7)$$

La puissance réactive Q est associée au courant fondamental. La puissance déformante D est due aux harmoniques de courant (avec $D = 3V_p \sqrt{I_c^2 + I_{c1}^2}$, où I_c est la valeur efficace du courant de la charge).

Tous les dispositifs électriques sont dimensionnés selon la tension et le courant nominal. Le facteur de puissance caractérise le rendement de ces dispositifs, où une faible valeur de ce facteur s'exprime par un mauvais fonctionnement de ces équipements.

Pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance FP est égal au quotient de la puissance active P par la puissance apparente S [23]:

$$\text{Facteur de puissance} = \frac{\text{(puissance active)}}{\text{(tension efficace) (courant efficace)}}$$

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{V_{\text{eff}} I_{\text{eff}}} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + D^2 + Q^2}} \quad (1.8)$$

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

$$p = 3V \cdot I_{c1} \cdot \cos \varphi, \quad (1.9)$$

On aura :

$$FP = \frac{I_c}{I_{c1}} \cdot \cos \varphi = F_{\text{dis}} \cdot \cos \varphi \quad (1.10)$$

Où F_{dis} représenté le facteur de distorsion. Il vaut 1 lorsque le courant est parfaitement sinusoïdal et il décroît lorsque la déformation de l'onde s'accroît. Φ représenté le déphasage entre le courant fondamental et la tension. Afin d'éviter les désagréments causés par la

présence de courants et de tensions harmoniques dans le réseau, des normes sont imposées aux utilisateurs [2].

En présence des courants harmoniques avec une tension sinusoïdale ; on distingue [23] :

➤ **Facteur de déphasage (facteur de Puissance de Déplacement):** C'est le rapport entre la puissance active et la puissance apparente de l'onde fondamentale.

$$Fp_{\text{dép}} = \frac{P_1}{V_{1\text{eff}} I_{1\text{eff}}} \quad (1.11)$$

➤ **Facteur de Puissance de Distorsion :** C'est le rapport entre le courant fondamental et le courant total

$$Fp_{\text{dis}} = I_1/I_T = \frac{1}{\sqrt{1 + (\text{THD}_1)^2}} \quad (1.12)$$

➤ **Facteur de puissance (total):** est le rapport entre la puissance active P et la puissance apparente S.

$$Fp_{\text{tot}} = \frac{P}{S} = \frac{P}{V_{\text{eff}} I_{\text{eff}}} \quad (1.13)$$

• **Le Facteur de puissance (total) peut aussi être exprimé :**

En régime déformé, le facteur de puissance devient le produit du facteur de déplacement et du facteur de distorsion. Les définitions précédentes s'appliquent tout aussi bien en régime monophasé qu'en régime triphasé équilibré.

$$Fp_{\text{tot}} = Fp_{\text{dis}} * Fp_{\text{dép}} \quad (1.14)$$

I.3.4.5 Normes concernant les perturbations harmoniques :

L'objectif des normes et des réglementations est de limiter les dysfonctionnements occasionnés par les harmoniques. La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) définit le niveau des courants et des tensions harmoniques à ne pas dépasser par une série de normes de compatibilité électromagnétique (CEI 61000) qui détermine le taux de distorsion harmonique de la tension de référence sur le réseau. Nous pouvons citer à titre d'exemple [2] [14]:

➤ **La norme CEI 61000-2-2:** elle définit les niveaux de compatibilité de tensions harmoniques sur les réseaux publics basse tension. Cette norme vise à protéger les équipements raccordés sur un réseau basse tension déformé [18].

➤ **La norme CEI 61000-3-2:** cette norme fixe la limitation des courants injectés dans le réseau public pour des équipements dont le courant par phase est inférieur à 16A. Il s'agit des appareils du domaine domestique.

Les normes précitées sont obligatoires mais restent incomplètes et ne permettent pas de garantir totalement la compatibilité électromagnétique sur les réseaux publics. C'est la raison pour laquelle EDF émet quelques recommandations concernant le raccordement des utilisateurs sur le réseau.

Les limitations en tension harmonique que doivent respecter les clients d'EDF sont:

- pour chaque rang pair, la tension harmonique est limitée à 0.6%,
- pour chaque rang impair, la tension harmonique est limitée à 1%,
- limitation du THD à 1.6%.

EDF propose le contrat EMERAUDE à ces clients. Ce contrat stipule que les deux parties (fournisseur et récepteur) s'engagent à respecter les normes limitant les perturbations harmoniques. EDF s'engage aussi à atteindre des résultats négociés au préalable [2].

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

Cette norme fait une classification des dispositifs (équipements) en quatre groupes ou classes, ces équipements doivent avoir une puissance de 75 W jusqu'à 600 W [18] [19].

- ⇒ Classe A : tous les équipements triphasés équilibrés non inclus dans les classes (B, C et D).
- ⇒ Classe B : Outils portatifs.
- ⇒ Classe C : Équipements d'éclairage, y compris les dispositifs de régulation.
- ⇒ Classe D : micro-ordinateurs et télévisions.

Tableau 1.3. Niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux basse tension (CEI 61000-2-2).

Harmoniques impairs non multiple de 3		Harmoniques impairs multiples de 3		Harmoniques pairs	
Rang harmonique	Tension harmonique	Rang harmonique	Tension harmonique	Rang harmonique	Tension harmonique

h	%	h	%	h	%
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	> 21	0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			> 12	0.2
25	1.5				
> 25	$0.2+0.5*25/h$				

Les limites des courants harmoniques de la norme CEI 61000 3-2 sont données par le Tableau 1.4, Il est intéressant de noter que ces limites sont exprimées en valeurs absolues et non relatives à la fondamentale. Ceci implique que l'équipement avec une petite puissance peut accomplir la norme avec un indice de distorsion harmonique (THD_I) très élevé.

Tableau 1.4 : Limites des composantes harmoniques du courant (CEI 61000 3-2).

Harmoniques (h)	Classe A (A)	Classe B (A)	Classe C I_h/I₁%	Classe D (mA/W)
Harmoniques impairs				
3	2.30	3.45	30 x F _p	3.4
5	1.14	1.71	10	1.9
7	0.77	1.155	7	1.0
9	0.40	0.60	5	0.5
11	0.33	0.495	3	0.35
13	0.21	0.315	3	0.296
15 ≤ h ≤ 39	0.15 x 15/h	0.225 x 15/h	3	3.85/h
Harmoniques pairs				
2	1.08	1.62	2	-
4	0.43	0.645	-	-

6	0.30	0.45	-	-
$8 \leq h \leq 40$	$0.23 \times 8/h$	$0.345 \times 8/h$	-	-
F_p : est le facteur de puissance				

➤ **La norme Le CEI 61000 3-4** : définit des limites d'émission de courant harmonique pour tout équipement raccordé au réseau qui absorbe plus de 16 A et moins de 75 A par phase. Trois étapes sont définies, selon le rapport entre la puissance nominale de la charge et la puissance du court-circuit de la source de puissance au point de raccordement (PCC). L'étape I comprend tous ces dispositifs qui peuvent être reliés à n'importe quel point du réseau et qui ont un rapport entre la puissance nominale de la charge et la puissance du court-circuit supérieure ou égale à 33 ($S_{CC}/S_N \geq 33$). Le Tableau 1.5 définit des limites d'émission des courants harmoniques pour cette étape. Tout équipement qui n'accomplit pas cette restriction, devra être classifié dans l'étape II ou l'étape III.

Tableau 1.5 : Limites d'émission des courants harmoniques Pour l'étape I (CEI 61000-3-4)

H Impairs	I_h/I_1 %	h Pairs	I_h/I_1 %
3	21.6	2	4
5	10.7	4	2
7	7.2	6	1.33
9	3.8	8	1
11	3.1	10	0.8
13	2	12	0.66
15	0.7	≥ 14	0.6
17	1.2		
19	1.1		
21	0.6		
23	0.9		
25	0.8		
27	0.6		
29	0.7		
31	0.7		
≥ 33	≤ 0.6		

➤ **La norme EN 50160** étant une description des caractéristiques de la tension réseau, elle ne détermine que les valeurs limitent des harmoniques de tension. Ces limites sont pratiquement identiques à celles fixées par la CEI.

En ce qui concerne l'IEEE, la norme IEEE 519: 1992, Recommande Practices and Rééquipements for Harmonique Control in Power Systems, détermine les procédures pour contrôler les harmoniques présents sur le réseau électrique ainsi que les limites recommandées de pollution admissible de la part des clients et de distorsion harmonique globale dans le réseau[14].

I.3.5 Inter harmoniques :

L'analyse harmonique des courants et des tensions nous indique qu'en plus des harmoniques de rang entier, il existe des inters harmoniques. Ceux-ci ont d'ordinaire une amplitude relativement réduite, mais peuvent être gênants s'ils provoquent des résonances. Ils peuvent également avoir des effets très néfastes lorsque leur fréquence se situe dans les plages de fréquence réservées pour les signaux de commande. Les inter harmoniques ont principalement pour origine [6]:

- ❖ les imperfections du convertisseur et de sa commande (chutes de tension dans les thyristors, variation ou inégalité des angles de commutation, variation de l'impédance vue du côté continu du redresseur [Car-99]),
- ❖ l'association de plusieurs convertisseurs fonctionnant à des fréquences différentes (variateurs de vitesse des moteurs à courant alternatif [Bon-00, Ros-02]),
- ❖ les convertisseurs statiques de commande non périodique,
- ❖ les fours à arc et les cycloconvertisseurs.

I.4 Conclusion :

Comme nous avons pu le constater dans ce premier chapitre, la qualité de l'énergie électrique est affectée par les différents types de perturbations électriques que peut subir le réseau électrique et leurs conséquences sur les équipements électriques tels que les creux de tension, les surtensions, le déséquilibre.... Etc, qui ont des effets néfastes sur les équipements électriques, ainsi que les harmoniques, qui engendrent la dégradation de la qualité de l'énergie et donc une mauvaise satisfaction et prestation du client [7].

Chapitre II : Solutions possibles pour la dépollution harmonique

II.1 Introduction :

Avec l'augmentation ces dernières années du nombre et de la puissance unitaire des charges non linéaires telles que les sources d'alimentations statiques et les entraînements électriques à vitesse variable dans les réseaux électriques, les harmoniques qu'ils génèrent deviennent de plus en plus préoccupantes, tant pour les distributeurs d'énergie que pour les consommateurs vus les effets nocifs et les coûts qu'ils engendrent.

L'évolution rapide des composants semi-conducteurs, a permis d'envisager de nouvelles solutions pour la dépollution des réseaux électriques. Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes solutions traditionnelles et modernes proposées dans la littérature pour compenser ces perturbations. Les solutions classiques ne sont pas très efficaces pour traiter ce problème en conséquence, il est important que des solutions de dépollution harmoniques soient mises en œuvre. Parmi les solutions existantes : filtrage passif, filtrage actif.

Les filtres passifs sont souvent pénalisés en termes d'encombrement et de résonance. Nous avons aussi présenté les différentes topologies des filtres actifs série et parallèle. Le filtre actif série pour compenser toutes les perturbations de tension comme les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension. Le filtre actif parallèle pour compenser toutes les perturbations en courant comme les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive. En 1976, une première famille de filtre actif parallèle a été conçue à partir d'onduleurs à transistors de puissance commandés en MLI, c'est le plus connu et le plus utilisé pour la dépollution harmonique.

II.2 Solutions pour améliorer la qualité de l'énergie électrique :

Le choix de la solution la plus appropriée dépend des caractéristiques de l'offre au niveau du point de connexion, les exigences de la charge et de l'économie. Il existe deux possibilités pour l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique, l'une est appelée conditionnement de la charge qui consiste à rendre les équipements du processus industriel moins sensibles aux problèmes de la qualité de l'énergie, en leur permettant ainsi de les surmonter, l'autre possibilité réside dans l'installation d'un dispositif de conditionnement capable de minimiser ou empêcher les perturbations provenant du réseau .[7]Une dégradation de qualité peut conduire à une modification du comportement, des performances ou même à la destruction des équipements et des procédés qui en dépendent avec des conséquences possibles sur la sécurité des personnes et des surcoûts économiques. Ceci suppose trois éléments:

- un ou plusieurs générateurs de perturbations,
- un ou plusieurs récepteurs sensibles à ces perturbations,
- entre les deux un chemin de propagation de ces perturbations. [8]

Les solutions consistent à agir sur tout ou sur une partie de ces trois éléments soit de façon globale (installation) soit de façon locale (un ou plusieurs récepteurs). Ces solutions peuvent être mises en œuvre pour corriger un dysfonctionnement dans une installation, d'agir de façon préventive en vue du raccordement de charges polluantes, de mettre en conformité l'installation par rapport à une norme ou à des recommandations du distributeur d'énergie et de réduire la facture énergétique (réduction de l'abonnement en kVA, réduction de la consommation). L'utilité même de choisir une solution et de la mettre en œuvre dépend:

- **Du niveau de performance souhaité:** Un dysfonctionnement peut être inadmissible s'il met en jeu la sécurité des personnes (hôpitaux, balisage des aéroports, éclairages et systèmes de sécurité des locaux recevant du public, auxiliaires de centrale...).
- **Des conséquences financières du dysfonctionnement:** Tout arrêt non programmé, même très court, de certains procédés (fabrication de semi-conducteurs, sidérurgie, pétrochimie...) conduit à une perte ou à une production de mauvaise qualité.
- **Du temps de retour sur investissement souhaité:** C'est le rapport entre les pertes financières (matières premières, pertes de production...) provoquées par la non-qualité de l'énergie électrique et le coût (étude, mise en œuvre, fonctionnement, maintenance) de la solution.

II.2.1 Solutions possibles pour réduire les harmoniques :

Afin de diminuer les perturbations en tension ou en courant, il est possible d'agir à deux niveaux:

- ✓ du côté de la source en filtrant la tension du réseau ou en améliorant le réseau de Transport et celui de distribution.
- ✓ du côté du client en rendant le courant de ligne le plus sinusoïdal possible.

Plusieurs solutions ont été envisagées pour limiter la propagation des harmoniques et améliorer la qualité et la gestion de l'énergie électrique.

Elles peuvent être classées en deux catégories, traditionnelles et modernes (à base de L'électronique de puissance) [5].

II.2.2 Solutions de dépollution des réseaux électriques :

Afin de compenser toutes les perturbations, séparées en deux types : courant et tension, deux groupes de solution de dépollution, Deux types de solutions sont envisageables, Traditionnelle et moderne La première consiste à utiliser des convertisseurs statiques moins ou peu polluants, tandis que la seconde consiste en la mise en œuvre d'un filtrage des composantes harmoniques, vont être étudiées. [10]

L'approche de la dépollution la mieux adaptée à notre objectif pour réduction de ses perturbation.

Suivant les types de perturbation, courant et tension, deux solutions traditionnelles de dépollution sont analysées [5]

II.2.2.1 Solutions traditionnelles de dépollution :

Ce sont des techniques qui doivent être connues par tous les électriciens. Elles apportent une solution facile et rapide pour certains cas de perturbations bien localisées et utilisent des composants passifs (inductances, condensateurs, transformateurs) et/ou des branchements qui modifient le schéma de l'installation.[9] [11]Les moyens de dépollution traditionnels sont nombreux et se résument dans les points suivants :

- inductance anti-harmonique de protection des condensateurs.
- inductance de lissage des courants.
- confinement des harmoniques.
- l'utilisation de transformateurs à couplage approprié permettant de limiter la Circulation des courants harmoniques.
- augmentation de l'indice de modulation.
- filtres passifs utilisant des éléments réactifs en l'occurrence des inductances et des Condensateurs.

II.2.2.1.1 Rééquilibrage des courants et des tensions :

Puisque les courants déséquilibrés dans un réseau électrique basse tension résultent généralement des charges monophasées et biphasées mal réparties, la première solution est la répartition égale des charges sur les trois phases.

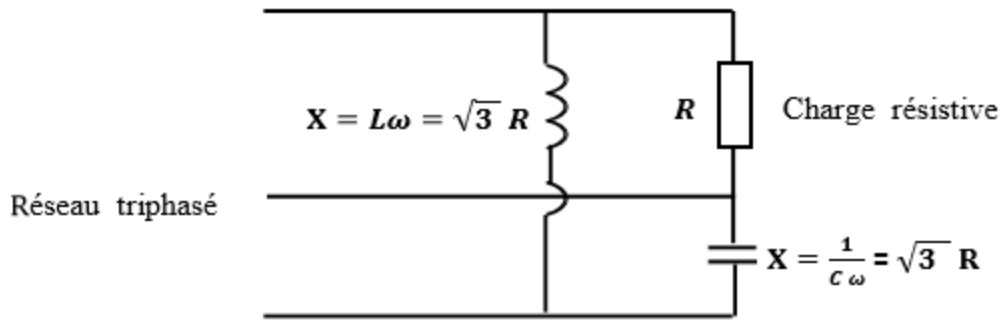


Figure II.1:Montage de Steinmetz pour le rééquilibrage

II.2.2.1.2 Compensation des creux et des interruptions :

Les creux de tension deviennent un souci majeur en matière de la qualité de l'onde. En conséquence, les investigations des techniques de mitigation des creux reçoivent de plus en plus d'importance. Des dispositifs conventionnels tels que les sources d'alimentation sans interruption, les transformateurs à Ferro-résonance et les groupes moteur-générateur, sont susceptibles de mitiger le problème à un certain point [24]. Cependant, ces moyens ont leurs inconvénients et limites, particulièrement en matière de coût, performance et puissance maximale. Un moyen plus intéressant pour la mitigation des creux est l'utilisation des transformateurs à rapport variable électroniquement.

II.2.2.1.3 La Compensation de la puissance réactive :

La compensation d'énergie réactive-consommée en générale par les charges non linéaire-provoque des pertes, réduire la capacité de transport des lignes électrique et cause des chute de tension par suit du caractère inductif du réseau d'ou la nécessité de prévoie des moyens de compensation [13]. La puissance réactive est majoritairement consommée par les moteurs asynchrones et plus récemment par des dispositifs à base d'électronique de puissance. Différentes méthodes de compensation sont utilisées pour relever le facteur de puissance. La plus simple consiste à placer des batteries de condensateurs en parallèle avec le réseau. On peut les placer directement à proximité des charges qui ont un mauvais facteur de puissance (compensation locale) ou près du transformateur d'alimentation (compensation globale). [7] L'inconvénient de cette méthode réside dans le fait que la puissance réactive fournie par les condensateurs est constante non réglable et qu'elle ne s'adapte pas à l'évolution du besoin.

II.2.2.1.4 Compensation des courants harmoniques :

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

- l'augmentation de la puissance de court-circuit du réseau et l'utilisation de convertisseurs peu polluants qui ont pour effet de diminuer la distorsion harmonique.
- l'utilisation de dispositifs de filtrage pour réduire la propagation des harmoniques produits par des charges non linéaires.

Le filtrage consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance de Valeur très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau [5]. Parmi les dispositifs de filtrage les plus répandus, On distingue le filtre passif résonnant Figure (2-2) et le filtre passif amorti ou passe-haut Figure (2-3).

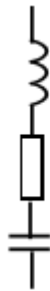


Figure II.2: filtre passive

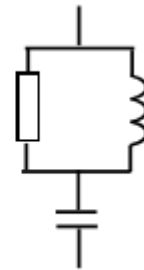


Figure II.3: filtre passive amorti

Le filtre résonnant est un filtre très sélectif. Il peut se connecter en parallèle avec d'autres filtres résonnants. Le filtre passe-haut compense les harmoniques supérieurs ou égaux à sa fréquence propre. Il peut se connecter en parallèle avec d'autres filtres résonnants. [5] Ces dispositifs sont utilisés pour empêcher les courants harmoniques de se propager dans les réseaux électriques. Ils peuvent aussi être utilisés pour compenser la puissance réactive. Plusieurs solutions existent pour limiter la propagation et l'effet des harmoniques dans les réseaux électriques,[24]les plus importants sont :

a. Augmentation de la puissance de court-circuit du réseau : elle permet de réduire la tension créée par les harmoniques de courant, et donc de diminuer le taux de distorsion harmonique en tension au point de raccordement. En revanche, les courants harmoniques ne sont pas atténués.

b. utilisation de convertisseurs peu polluants qui ont pour effet de diminuer la distorsion harmonique, par exemple, le montage dodécaphasé (figure.2.4):Le courant absorbé par ce

type de montage ne contient que les harmoniques de rangs $12h \pm 1$ avec h entier. Figure. 2.4. Schéma simplifié d'un montage dodécaphasé série.

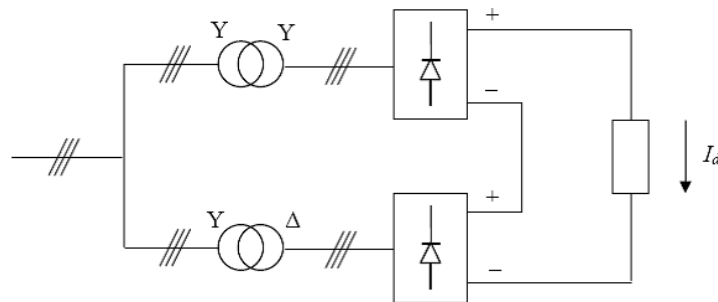


Figure II.4 : Schéma simplifié d'un montage dodécaphasé série.

c. Ajout d'une self : Afin de limiter le contenu des courants harmoniques générés sur le réseau, une première solution consiste à insérer une self de lissage avant le pont de diodes. Avec une valeur de self définie pour 3% de chute de tension pour le courant nominal du pont de diode.

d. Utilisation de filtre passif : Le filtrage consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance de valeur très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau. Parmi les dispositifs de filtrage les plus répandus, on distingue le filtre passif parallèle, filtre passif série et le passif amorti ou passe-haut. Le filtre passif a pour objet, dans le cas des harmoniques, de diminuer l'impédance du réseau à une fréquence donnée. Les courants harmoniques à cette fréquence sont alors dérivés dans le filtre et créent peu de distorsion sur le réseau. Le rang d'accord h_a correspond au multiple, entier ou non, de la fréquence nominale du réseau pour lequel l'impédance du filtre LC est minimale.

d.1 Classification des filtres passifs :

Les solutions conventionnelles aux problèmes de distorsion harmonique existent depuis longtemps. Le filtrage passif est la plus simple solution conventionnelle pour atténuer la distorsion harmonique [7]. Les filtres passifs sont des éléments à base d'inductance, capacité et résistance configurés et réglés pour contrôler les harmoniques. On peut classer les filtres passifs suivant leur fréquence de résonance, leur mode de connexion et leur emplacement sur le réseau. Sa conception nécessite une étude approfondie du réseau électrique et un travail de conception de bureau d'étude. Le dimensionnement dépend du spectre harmonique de la charge et de l'impédance de la source d'énergie [9]. Cette solution est la plus simple et la moins chère mais sans doute, elle n'est pas la plus efficace.

d.2 Filtre passif série :

Une façon d'atténuer les harmoniques générées par les charges non linéaires est d'introduire un filtre passif série (Figure 2.5), dans l'alimentation d'entrée ligne de sorte que le filtre offre une impédance élevée à la circulation des harmoniques à partir de la source à la charge non-linéaire [7].

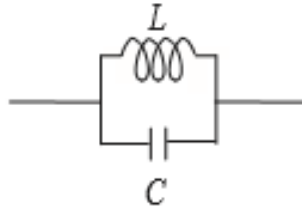


Figure II.5: Filtre passif série

d.3 Filtre passif parallèle :

Le filtre passif parallèle est montré sur la Figure (2.6) 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 [7].

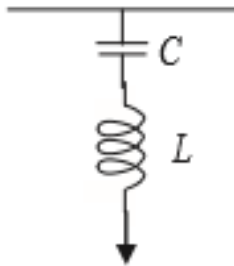


Figure II.6: Filtre passif parallèle

II.2.2.2 Solutions de dépollutions modernes :

La première solution consiste à fabriquer la charge la moins polluante comme le pont redresseur dodécphasé de manière à réduire le taux d'émission d'harmonique. [13]. Ces solutions sont proposées comme des solutions efficaces de dépollution des réseaux électriques afin de traiter les inconvénients inhérents aux solutions traditionnelles comme les filtres passifs (non adaptatifs aux variations de la charge et du réseau, phénomènes de résonance). [10] Les

solutions de dépollution traditionnelle ne répondant plus à l'évolution des réseaux électriques et des charges à protéger, comme nous venons de le décrire précédemment, d'autres solutions modernes ont été proposées. [5] Le but principal des chercheurs dans le domaine de l'électronique de puissance est de satisfaire les industriels par l'utilisation des solutions plus efficaces et économiques.

Les progrès remarquables réalisés d'une part dans le domaine des composants semi-conducteurs, comme les IGBT, IGCT, GTO et MOSFET, ainsi que la maîtrise de leur mise en œuvre et d'autre part l'existence de nouvelles méthodes de traitement analogique et numérique du signal, ont permis l'émergence de moyens modernes et efficaces pour faire face aux différentes perturbations (harmoniques, puissance réactive, fluctuations, creux de tension) affectant les systèmes électriques. Pour fournir aux consommateurs une bonne qualité de l'énergie électrique, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, les filtres actifs et les redresseurs MLI sont proposés comme des solutions avancées de dépollution des réseaux électriques. [9] C'est pourquoi d'autres solutions dites modernes ont été proposées. Parmi toutes les solutions modernes, on trouve deux types de structures classiquement utilisées :

- Le filtre actif (série, parallèle ou bien encore associant les deux).
- Le filtre actif hybride (série, parallèle). [10]

II.2.2.2.1 Redresseur à MLI :

C'est un redresseur commandé par une MLI optimisée, qui consiste à déterminer les angles de commutation selon certains critères d'optimisation. Ce sont des convertisseurs à modulation de largeurs d'impulsions, utilisant des composants à commutation forcée tels que les IGBT ou les thyristors GTO. [9] Suivant les caractéristiques harmoniques exigées, on peut, par exemple, soit minimiser les harmoniques d'une bande, soit éliminer certains d'entre eux, soit faire que le facteur de puissance égale à 1. Il ya plusieurs techniques d'optimisations parmi elles, on distingue l'utilisation de l'algorithme génétique qui donne de très bons résultats [25] [26].

II.2.2.2.2 Filtres actifs :

Les filtres actifs constituent une alternative intéressante aux solutions classiques. Ils peuvent être utilisés comme complément aux solutions traditionnelles de dépollution. Le rôle d'un filtre actif est de compenser en temps réel les perturbations, en tout ou en partie, présentes dans les réseaux électriques.

Les principales structures, proposées dans la littérature, sont les filtres actifs parallèle, série, combiné parallèle-série et les structures hybrides actif-passif. [25]. Actuellement, les filtres actifs parallèles sont essentiellement installés par les consommateurs industriels. L'évolution future de ces dispositifs de puissance pourrait autoriser le fournisseur d'énergie à prendre un rôle plus important, en lui permettant de les installer lui-même. Cette approche permettrait d'amortir la propagation des harmoniques causées par la résonance, laquelle peut être observée entre les inductances du réseau et les batteries de condensateur installées pour améliorer le facteur de puissance. De même, des filtres actifs parallèles installés par le fournisseur auraient aussi pour objectif de réduire la distorsion harmonique de tension en amont, côté réseau électrique. [5]

a) Filtre actif parallèle (FAP) :

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau, est considéré comme générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant côté réseau est alors sinusoïdal. [5]

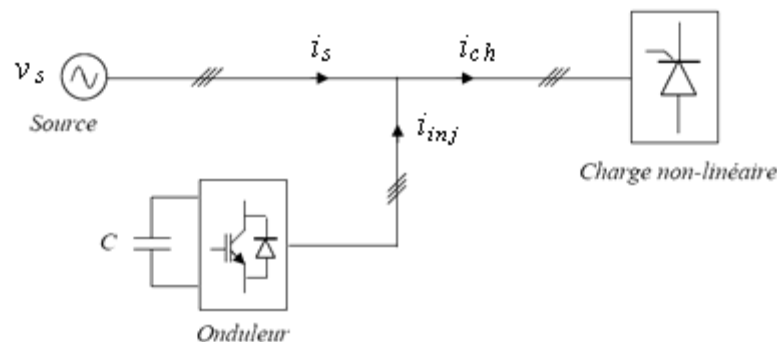


Figure II.7: Filtre actif parallèle.

b) Filtre actif série (FAS) :

Le filtre actif série se comporte comme une source de tension qui s'oppose aux tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmonique) venant de la source et également celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Ainsi la tension aux bornes de la charge à protéger est purement sinusoïdale. [26] L'utilisation industrielle des filtres actifs série uniquement est très limitée, son usage est principalement fait pour les compensateurs globaux de puissance connus sous l'appellation Unified Power Quality Conditioner (UPQC). [9]

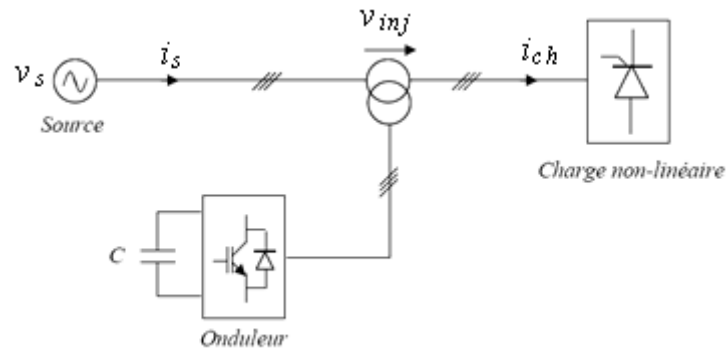


Figure II.8: Filtre actif série

c) Filtres actifs parallèle-série combinés (UPQC) :

La combinaison parallèle-série actifs, appelée aussi ‘Unified Power Quality Conditioner (UPQC)’, résulte de l’association des deux filtres actifs parallèle et série. Profitant des avantages des deux filtres, l’UPQC assure un courant et une tension sinusoïdaux du réseau électrique à partir d’un courant et d’une tension perturbés de celui-ci [5]. L’objet du filtre actif série est l’isolation harmonique entre la charge et la source d’une part, la régulation de la tension de réseau (compensation de flicker ou de déséquilibre) d’autre part. Le filtre actif parallèle compense les courants harmoniques et la puissance réactive de la charge et le courant inverse [7]. en même temps qu’il contrôle la tension continue du condensateur commun des deux filtres actifs.

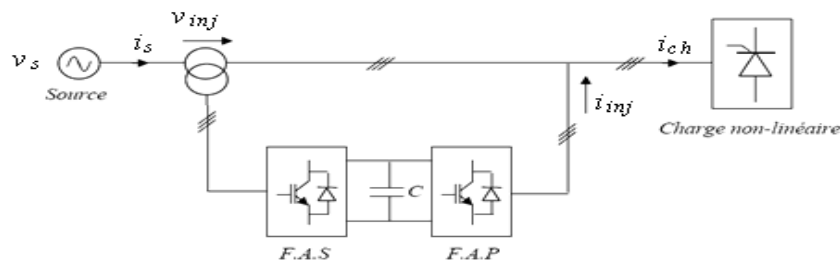


Figure II.9: Filtre actif mixte série-parallèle (UPQC)

d) Filtres hybrides actifs et passifs :

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. [10] Pour réduire le dimensionnement du filtre actif et son coût, on lui associe un filtre passif. Le filtre passif a pour rôle d’éliminer les fréquences spécifiques permettant la réduction du dimensionnement du filtre actif qui compensera le reste des perturbations. [25][26][5]. En

conséquence, le filtre hybride est plus petit que pour un filtre actif et la réponse est bien meilleure qu'avec des filtres passifs seuls. Cette structure permet d'améliorer les caractéristiques de compensation des filtres passifs et de réaliser ainsi une réduction de la valeur nominale du filtre actif [7]. Les configurations les plus étudiées dans la littérature sont :

- **Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle :**

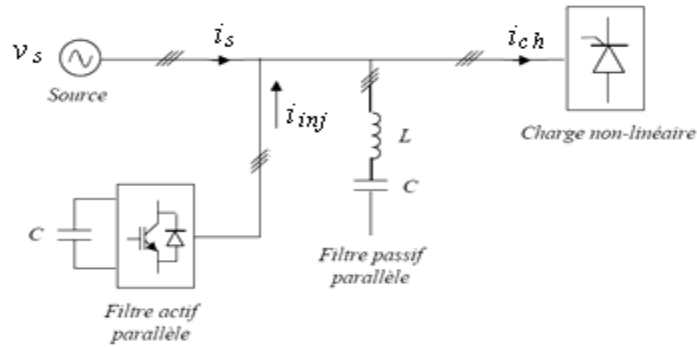


Figure II.10: Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

- **Filtre actif série avec un filtre passif parallèle**

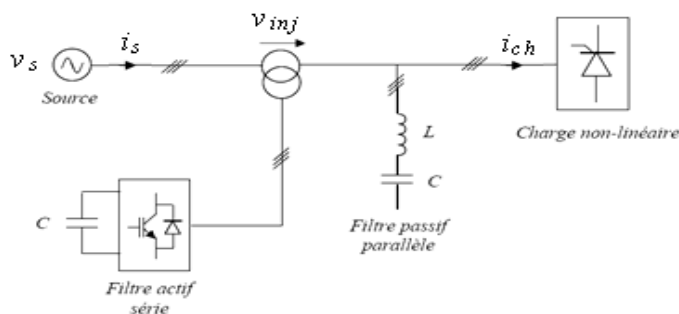


Figure II.11: Filtre actif série avec filtre passif parallèle

- **Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle**

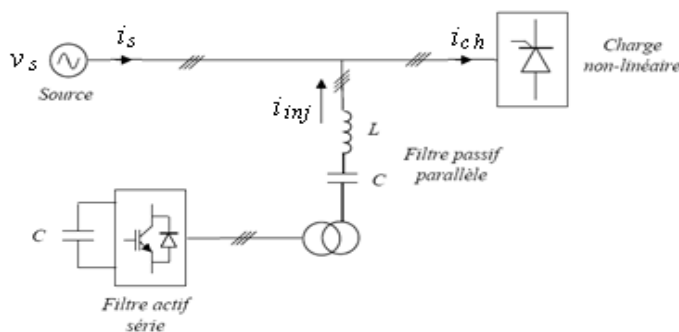


Figure II.12: Filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles.

II.3 Filtre actif parallèle (FAP) :

Le filtre actif parallèle (shunt) représente la solution alternative du filtre passif shunt. Les recherches sur les moyens de mitigation des harmoniques par l'utilisation des filtres actifs parallèles se sont multipliées dans la littérature depuis que L. Gyugyi a initié les premières structures [27]. Ainsi l'objectif du filtre actif parallèle (F.A.P) consiste à empêcher les courants harmoniques produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif.[5] Ces filtres peuvent être monophasés ou triphasés. Ces derniers peuvent à leur tour être à trois fils ou à quatre fils lorsque le courant du fil neutre cause un problème, [28]. Il existe cependant deux structures de base selon l'élément de stockage d'énergie de l'onduleur du FAP. Ces deux structures de base sont :

- ❖ Filtre actif parallèle à structure tension : lorsque le côté continu de l'onduleur possède un condensateur.
- ❖ Filtre actif parallèle à structure courant : Dans ce cas le côté continu de l'onduleur comportera une inductance, cette structure est moins utilisée à cause de son faible rendement

La figure (2.12) montre la configuration d'un filtre actif shunt susceptible de remplacer un filtre passif shunt. Le filtre est un pont à six interrupteurs avec six diodes antiparallèles. L'onduleur avec l'inductance de sortie se comporte comme une source de courant afin de compenser le courant harmonique dans la source.

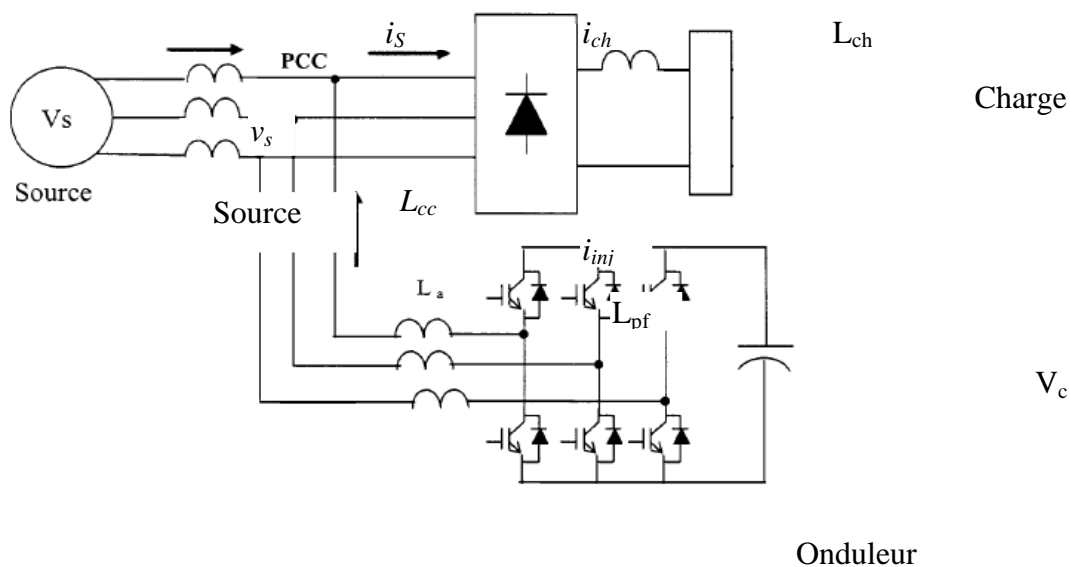


Figure II.13 : Filtre actif parallèle avec une charge non-linéaire

II.3.1 Principe de fonctionnement du FAP :

Le FAP est connecté en parallèle sur le réseau de distribution (Figure. 2.13). Il est le plus souvent commandé comme générateur de courant [20] [29] [30]. Il constitue un excellent dépollueur, car il est souple, auto-adaptatif, performant, ne présentant aucun risque d'interaction avec l'impédance réseau et ne nécessite pratiquement pas d'études préalables à la mise en service. En effet, l'objectif primordial du filtre actif parallèle (FAP) consiste à empêcher les courants perturbateurs (harmoniques, réactifs et déséquilibrés), produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, tout en éliminant la possibilité de produire des résonances. Il faut noter aussi que ce filtre actif ne s'oppose pas nécessairement aux filtres passifs auxquels il peut s'associer avec intérêt. En générale, le filtre actif parallèle est utilisé pour la dépollution des réseaux BT et MT.[9]

II.3.2 Structure générale du Filtre Actif Parallèle :

La structure des filtres actifs se compose essentiellement de deux parties, une partie puissance et une partie commande (Figure 2.14). La partie puissance se compose d'un onduleur, d'un filtre de couplage et d'un élément passif lui servant de source d'énergie. La partie commande, sert à contrôler la commutation des semi-conducteurs formant l'onduleur [7].

- **La partie puissance** : est constituée d'un onduleur de tension deux niveaux a basse d'interrupteur de puissance (IGBT) avec une diode antiparallèle ; d'un circuit de stockage d'énergie, souvent capacitif et d'un filtre à la sortie de l'onduleur.
- **La partie commande** : elle est constituée de l'algorithme de détection de courant de référence et de la commande de l'onduleur de tension.

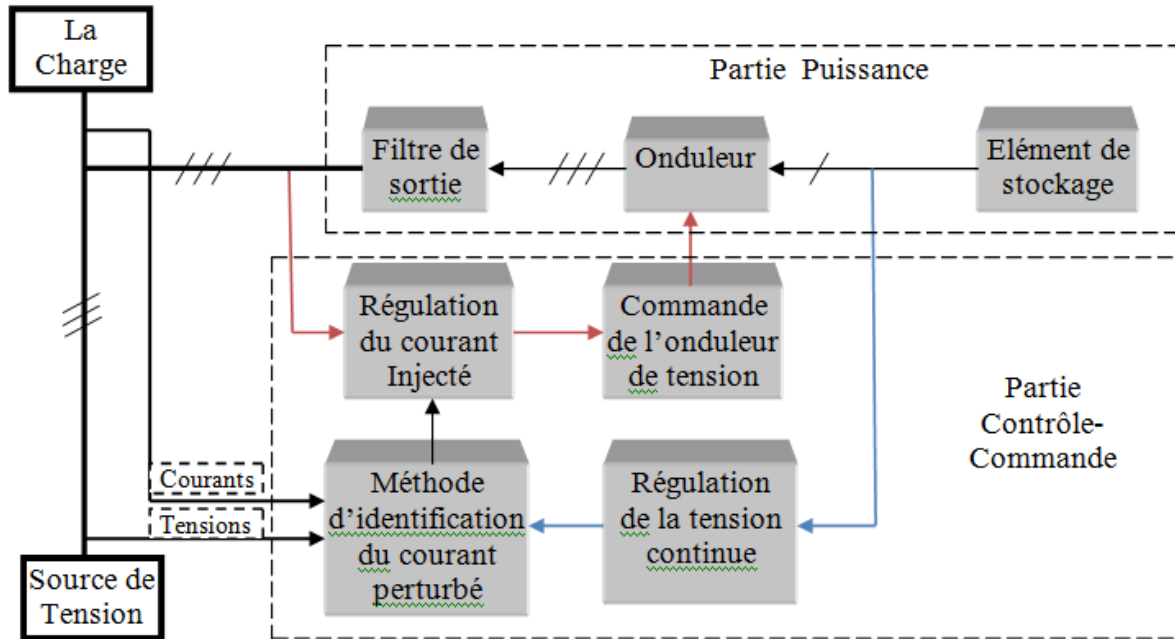


Figure II.14: structure générale d'un

Cette étude se limite au cas où la source de tension est sinusoïdale et où le courant absorbé par la charge est entaché de composantes harmoniques. Dans ces conditions, le taux global de distorsion harmonique (THD) est bien adapté pour qualifier le degré de pollution harmonique sur le réseau électrique [5].

II.3.3 Etude de la partie puissance :

II.3.3.1 Structure générale d'Onduleur de tension :

L'onduleur est la partie essentielle du filtre actif. Dépendamment du type de filtre de couplage le reliant au réseau ainsi que de l'élément passif qui lui sert de source d'énergie, il s'agira d'un onduleur de tension ou de courant. L'onduleur peut être commandé en tension ou en courant et peut donc se comporter comme une source de tension ou de courant.[13]

La Figure (2.15) présente un onduleur triphasé à structure de tension. Il se compose de trois bras à interrupteurs réversibles en courant, commandés à la fermeture et à l'ouverture, réalisés à partir d'un transistor (GTO ou IGBT) et d'une diode en antiparallèle. Le stockage de l'énergie du côté continu se fait par l'intermédiaire d'un condensateur C_{dc} de tension V_c . Le filtre de sortie est un filtre passif habituellement du premier ordre (L_{fp}, R_{fp}) employé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique.

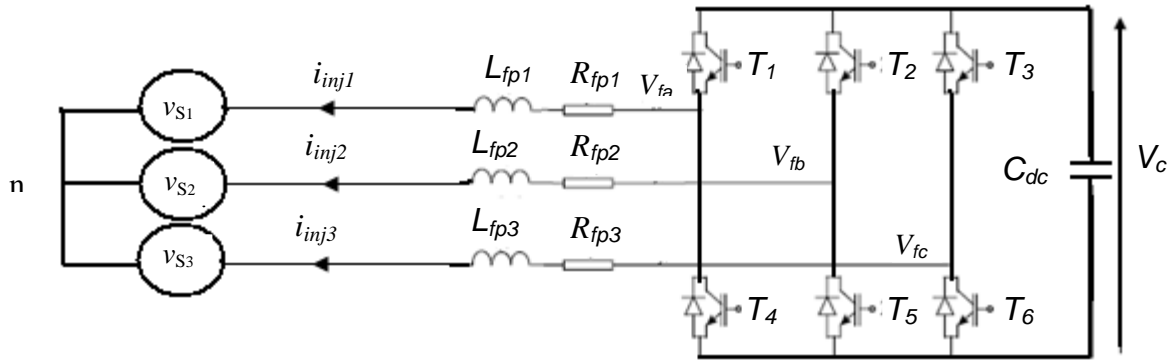


Figure II.15 : Onduleur de tension triphasé

Cette structure du filtre actif parallèle ne permet pas la fermeture simultanée des semi-conducteurs d'un même bras sous peine de court-circuiter le condensateur de stockage. Par contre, ils peuvent être tous les deux ouverts (pendant un temps mort). La continuité des courants est alors assurée par la mise en conduction d'une des diodes d'un même bras. En pratique, nous commandons les deux semi-conducteurs d'un même bras de façon complémentaire : la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre. En réalité, le mode, où les semi-conducteurs d'un même bras sont tous les deux fermés, n'existe que durant les commutations. Afin d'éviter un court-circuit à cause du délai de blocage des interrupteurs, il faut insérer sur un même bras, un temps d'attente, également appelé temps mort, entre la commande de blocage d'un interrupteur et la commande d'amorçage de l'autre [31]. Avec l'hypothèse des commutations instantanées, ce mode de fonctionnement ne sera pas pris en compte et par conséquent, aucun risque de court-circuiter le condensateur n'est à craindre.

II.3.3.2 Tension fournie par l'Onduleur :

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur de tension du filtre actif parallèle dépendent de l'état des signaux de commande (S_1, S_2, S_3), comme défini ci-dessous :

[6] [33] [12]

$$S_1 = \begin{cases} 1 & T_1 \text{ fermé et } T_4 \text{ ouvert} \\ 0 & T_1 \text{ ouvert et } T_4 \text{ fermé} \end{cases}$$

$$S_2 = \begin{cases} 1 & T_2 \text{ fermé et } T_5 \text{ ouvert} \\ 0 & T_2 \text{ ouvert et } T_5 \text{ fermé} \end{cases}$$

$$S_3 = \begin{cases} 1 & T_3 \text{ fermé et } T_6 \text{ ouvert} \\ 0 & T_3 \text{ ouvert et } T_6 \text{ fermé} \end{cases}$$

Les tensions entre phases imposées par l'onduleur sont :

$$\begin{bmatrix} V_{fa} - V_{fb} \\ V_{fb} - V_{fc} \\ V_{fc} - V_{fa} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 - S_2 \\ S_2 - S_3 \\ S_3 - S_1 \end{bmatrix} V_C \quad (\text{II. 1})$$

On suppose que les tensions de phase sont équilibrées ($V_{fa} + V_{fb} + V_{fc} = 0$), alors l'équation 2.1 devient :

$$\begin{bmatrix} V_{fa} \\ V_{fb} \\ V_{fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2S_1 & -S_2 & -S_3 \\ -S_1 & 2S_2 & -S_3 \\ -S_1 & -S_2 & 2S_3 \end{bmatrix} \frac{V_C}{3} \quad (\text{II. 2})$$

soit \vec{V}_f le vecteur correspondant aux tensions de phase de l'onduleur, $\vec{V}_f = \begin{bmatrix} V_{fa} \\ V_{fb} \\ V_{fc} \end{bmatrix}$

Pour simplifier les calculs et représenter ce vecteur de tension pour les différents états de S_1, S_2 et S_3 nous transformons ce vecteur à trois dimensions en un vecteur à deux dimensions en appliquant la transformation triphasée/diphasée (qui est très connue) suivante :

$$\vec{V}_f = \begin{bmatrix} V_{f\alpha} \\ V_{f\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{fa} \\ V_{fb} \\ V_{fc} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 3})$$

En utilisant l'équation 2.2 et 2.3, le module et l'argument du vecteur \vec{V}_f sont :

$$\text{Mod}(\vec{V}_f) = \frac{V_C}{\sqrt{3}} \sqrt{(S_1 - S_2)^2 + (S_2 - S_3)^2 + (S_3 - S_1)^2} \quad (\text{II. 4})$$

$$\text{Arg}(\vec{V}_f) = \text{arctg} \left(\frac{\sqrt{3}(S_2 - S_3)}{(S_1 - S_2) + (S_1 - S_3)} \right) \quad (\text{II. 5})$$

Ainsi, on pourra exprimer huit cas possibles de tension de sortie du filtre actif (V_{fa}, V_{fb} et V_{fc} ou $V_{f\alpha}$ et $V_{f\beta}$) comme le montre le tableau 2.1

Tableau II.1 : Tensions générées par l'onduleur.

N° du Cas	Inter-rupteurs Fermés	S ₁	S ₂	S ₃	V _{fa}	V _{fb}	V _{fc}	V _{fa}	V _{fb}	Mod(\vec{V}_f)	Arg(\vec{V}_f)
0	T ₄ T ₅ T ₆	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1	T ₁ T ₅ T ₆	1	0	0	2V _c /3	-V _c /3	-V _c /3	$\sqrt{\frac{2}{3}}V_c$	0	$\sqrt{\frac{2}{3}}V_c$	0
2	T ₂ T ₄ T ₆	0	1	0	-V _c /3	2V _c /3	-V _c /3	$-V_c/\sqrt{6}$	$V_c/\sqrt{2}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}V_c$	2π/3
3	T ₁ T ₂ T ₆	1	1	0	V _c /3	V _c /3	-2V _c /3	$V_c/\sqrt{6}$	$V_c/\sqrt{2}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}V_c$	π/3
4	T ₃ T ₄ T ₅	0	0	1	-V _c /3	-V _c /3	2V _c /3	$-V_c/\sqrt{6}$	$-V_c/\sqrt{2}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}V_c$	4π/3
5	T ₁ T ₃ T ₅	1	0	1	V _c /3	-2V _c /3	V _c /3	$V_c/\sqrt{6}$	$V_c/\sqrt{2}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}V_c$	5π/3
6	T ₂ T ₃ T ₄	0	1	1	-2V _c /3	V _c /3	V _c /3	$-\sqrt{\frac{2}{3}}V_c$	0	$\sqrt{\frac{2}{3}}V_c$	π
7	T ₁ T ₂ T ₃	1	1	1	0	0	0	0	0	0	

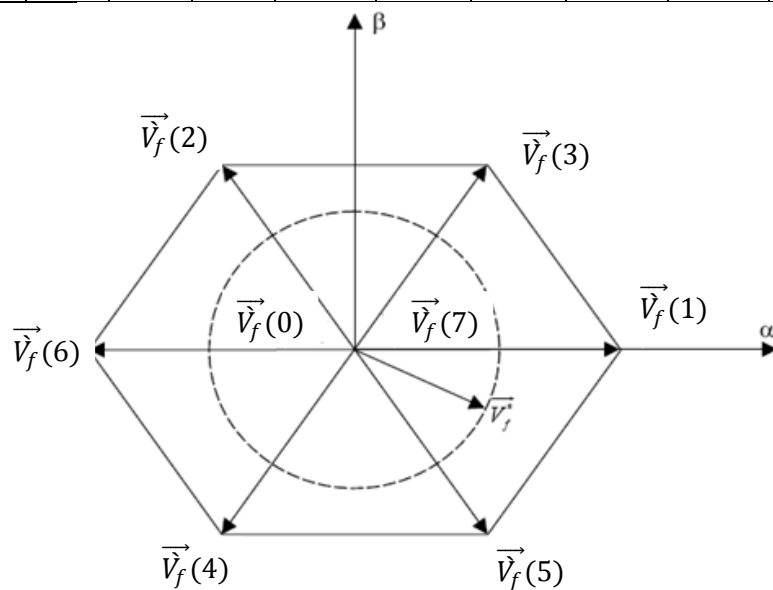


Figure II.16: Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur dans le plan biphasé (α, β)

Où \vec{V}_r représente la tension de référence que doit produire l'onduleur pour pouvoir créer les courants perturbateurs identifiés. Ceci signifie que l'onduleur n'est capable de fournir des tensions égales aux tensions de référence que si le vecteur formé par ces derniers reste à l'intérieur de l'hexagone montré dans la Figure (2.16) [32] [33].

II.3.3.3 Système de stockage d'énergie :

La source continue de l'onduleur de tension est un condensateur (Cdc) qui joue le rôle d'une source de tension continue Vdc. [9] [4] Une certaine quantité de l'énergie doit être emmagasinée en permanence dans la source continue. Mais à cause des pertes dans les interrupteurs et dans le condensateur, la source continue doit recevoir son énergie du réseau continuellement à travers le convertisseur. Pour son fonctionnement, la tension Vdc est maintenue constante afin de remédier aux fluctuations qui peuvent affecter la qualité du filtrage [33]. Ces fluctuations sont d'autant plus importantes que l'amplitude du courant du filtre est grande et que sa fréquence est faible. Pour cette raison, nous pouvons estimer que seuls les premiers harmoniques sont pris en compte dans le choix des paramètres du système de stockage.[10] Pour démontrer ceci, deux méthodes peuvent être utilisées[7]:

➤ La première méthode se base sur le calcul de l'énergie fournie par le filtre actif pendant une demi-période de la pulsation de puissance liée aux deux premiers harmoniques (5 et 7 pour un pont redresseur de Graetz)[33]. En choisissant un taux d'ondulation acceptable (ϵ), généralement de l'ordre de 5% de V_c , nous pouvons calculer la capacité C_{dc} à partir de la relation suivante :

$$C_{dc} = \frac{V_s \sqrt{I_5^2 + I_7^2 - 2I_5 I_7 \cos(5\alpha - 7\alpha)}}{2\omega \epsilon V_c^2} \quad (\text{II.6})$$

Avec V_s la tension simple du réseau, I_h le courant harmonique du rang h et α l'angle d'allumage des thyristors du pont Graetz. Puisque l'augmentation de la valeur de la tension continue améliore le fonctionnement du filtre actif et sachant que le choix de cette tension se répercute en grande partie sur le choix des interrupteurs, la tension continue V_c doit être choisie comme la plus grande tension respectant les contraintes des interrupteurs.

➤ La deuxième méthode, plus simple, se base sur la mesure du courant harmonique I_h du rang le plus faible. La capacité C_{dc} se calcule de la façon suivante [34]:

$$C_{dc} = \frac{I_h}{\varepsilon V_c \omega_h} \quad (\text{II. 7})$$

Avec ω_h : la pulsation la plus faible des harmoniques à compenser

II.3.3.4 Filtre de sortie (découplage):

Le filtre de sortie est un filtre passif utilisé pour rôle d'assurer la liaison entre le réseau électrique et l'onduleur de tension, ce filtre doit permettre au filtre actif parallèle de se comporter en source de courant vis à vis la source d'alimentation triphasée. Le filtre de sortie est dimensionné pour satisfaire les deux critères suivants [7]:

- assurer la dynamique du courant :

$$\frac{d}{dt} i_{ch_h} = \frac{d}{dt} i_{inj} \quad (\text{II. 8})$$

Avec i_{ch_h} le courant harmonique de la charge et i_{inj} le courant du filtre actif,

- empêcher les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau électrique.

Deux types du filtre de sortie peuvent être employés : un filtre de sortie du premier ordre ou un filtre de sortie du troisième ordre. Un filtre de sortie du premier ordre est le plus souvent utilisé dans la littérature, il est composé d'une inductance L_f et de résistance interne R_f . Une valeur relativement faible de L_f permet d'obtenir une bonne dynamique du FAP en satisfaisant l'égalité (2.8) [7]

II.3.4 Etude de la partie commande :

La stratégie de commande se base sur la méthode de détection des courants perturbateurs. Trois possibilités d'identification des courants perturbateurs ont déjà été proposées [35] [36] :

- Identification des harmoniques à partir de la détection des courants de la charge : Cette méthode détecte les courants de la charge i_{ch} , qui circulent en aval du point de raccordement, et donc extrait les courants harmoniques i_{ch-h} de i_{ch} .
- Identification des harmoniques à partir de la détection des courants de la source : Cette méthode détecte les courants de la source i_s , qui circulent en amont du point de raccordement, et donc extrait les courants harmoniques i_{hs} de i_s .
- Identification des harmoniques à partir de la détection des tensions de la source : Cette méthode détecte les tensions de la source au point de raccordement v_s , et donc extrait les tensions harmoniques v_h de v_s .

Les courants de compensation (i_{inj}) dans le domaine temporel sont représentés par :

- Identification depuis les courants de charge : $i_{inj} = i_{ch-h}$
- Identification depuis les courants de source : $i_{inj} = K_S i_{hs}$
- Identification depuis des tensions de source : $i_{inj} = K_V v_h$

II.3.4.1 Commande de l'onduleur :

Le but de la commande de l'onduleur est le contrôle des courants à la sortie du filtre afin qu'ils suivent leurs références. Le principe est basé sur la comparaison entre les courants à la sortie du filtre actif et leurs références calculées à partir des différentes méthodes d'extraction et de régulation des courants harmoniques et de la tension du condensateur de stockage d'énergie [10]

a) Commande en pleine onde:

C'est la stratégie de commande la plus simple à mettre en œuvre. Par contre la tension de sortie est très riche en harmoniques de rang faible et donc de fréquence basse. Le filtrage est difficile dans ce mode de commande, les interrupteurs travaillent à la fréquence des grandeurs électriques de sortie [7].

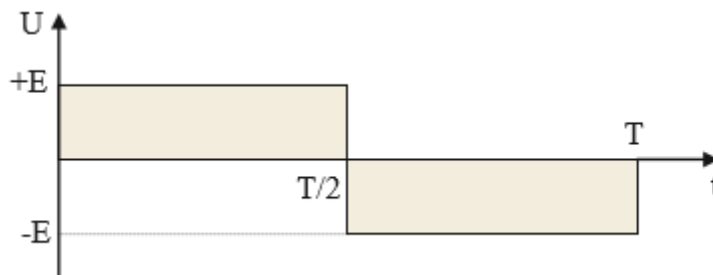


Figure II.17: Allure des potentiels de phase lors d'un fonctionnement en pleine onde

T1 est commandé entre 0 et π , non commandé entre π et 2π . Les commandes de T2 et T3 sont respectivement décalées de $2\pi/3$ et $4\pi/3$ en arrière. Les commandes de T4; T5 et T6: sont respectivement complémentaires de celles de T1; T2; T3.

b) Commande par hystérésis:

La commande par hystérésis modulée a pour objectif de résoudre l'inconvénient majeur de la commande par hystérésis conventionnelle en fixant la fréquence de commutation des semi-conducteurs [12].

L'objectif de la commande par hystérésis, encore connue sous la dénomination de commande en tout ou rien, est de contrôler les courants de compensation en les forçant à suivre ceux de référence. [7].

La commande par hystérésis, appelée aussi commande en tout ou rien, est une commande non linéaire qui utilise l'erreur existante entre le courant de référence et le courant produit par l'onduleur [37]. L'erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis. Dès que l'erreur atteint la bande inférieure ou supérieure, un ordre de commande est envoyé de manière à rester à l'intérieur de la bande. La simplicité de la mise en œuvre, comme le montre la Figure (2.18), est le principal atout de cette technique. En revanche, les commutations évoluant librement à l'intérieur de bande d'hystérésis, on ne peut maîtriser correctement le spectre haut fréquence dû aux fréquences de commutations. Afin de résoudre ce problème de la maîtrise des fréquences de commutation et de sa répercussion sur les interrupteurs, une autre stratégie de commande peut être proposée à savoir la commande par hystérésis à bande adaptative.

Finalement, la rapidité du contrôle par hystérésis donne des performances dynamiques et statiques meilleures. C'est la raison pour laquelle nous avons choisi ce type de commande pour la simulation du filtre actif parallèle.

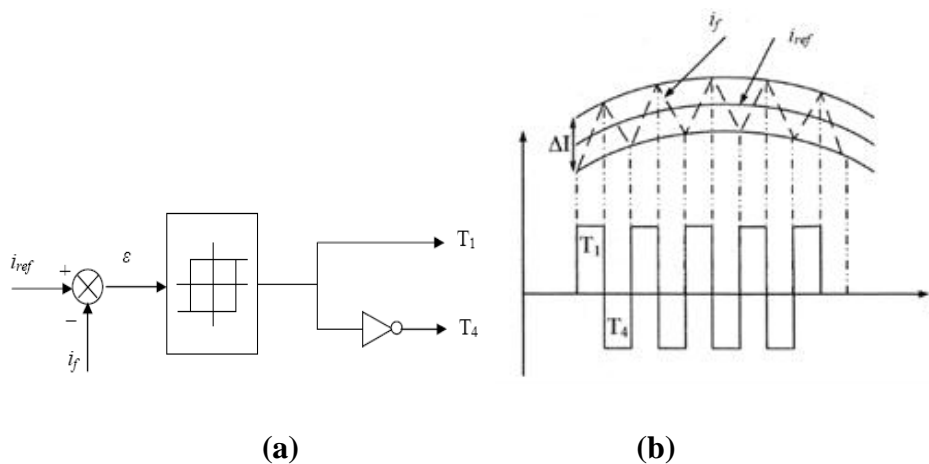


Figure II.18 : contrôle par hystérésis. (a):Principe de contrôle, (b): Commande des interrupteurs

La simplicité de la mise en œuvre, est le principal atout de cette technique. En revanche, les commutations évoluent librement à l'intérieur de bande d'hystérésis, on ne peut [7] maîtriser correctement le spectre de haute fréquence dû aux fréquences de commutations.

c) Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) :

Afin de contourner les problèmes précédents, nous introduirons une deuxième famille de commande de l'onduleur : la commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI). La technique de commande par MLI résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation en fonctionnant avec une fréquence fixe facile à filtrer en aval de l'onduleur.[37]Le schéma de principe de la MLI est donné par la Figure (2.18).

La commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) est la technique de commande la plus utilisée, elle résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation en fonctionnant avec une fréquence fixe facile à filtrer en aval de l'onduleur. La plus simple et la plus connue des modulations de largeur d'impulsion est sans doute la MLI à échantillonnage naturel.

Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur (modulatrice) à partir l'écart entre le courant mesuré et sa référence.[7]

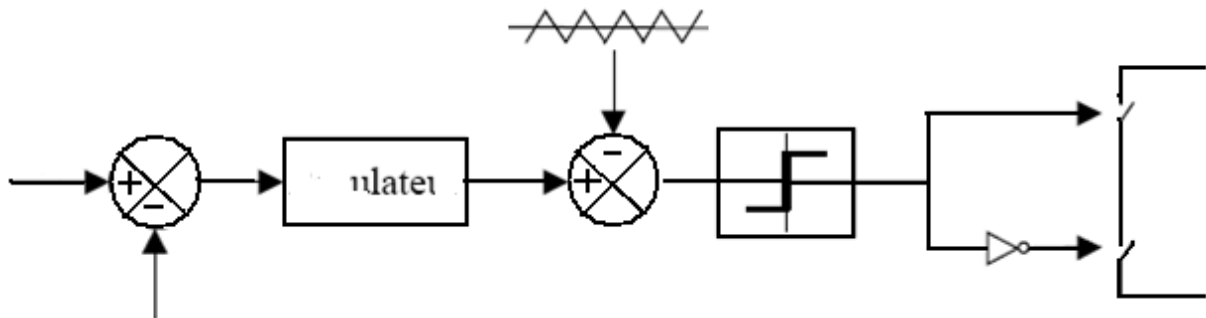


Figure II.19: Principe de commande des courants par MLI

D'autres techniques de MLI existent également dans la littérature comme la MLI à échantillonnage régulier où on peut distinguer deux méthodes :

- la MLI à échantillonnage régulier symétrique où la référence est échantillonnée à chaque période de la porteuse,
- la MLI à échantillonnage régulier asymétrique où la référence est échantillonnée à la demi-période de la porteuse.

d) Commande par MLI vectorielle :

Cette technique de commande divise le référentiel α - β des courants et des tensions en six régions avec un décalage courant/tension de 30° comme il est illustré sur la Figure(2.20).

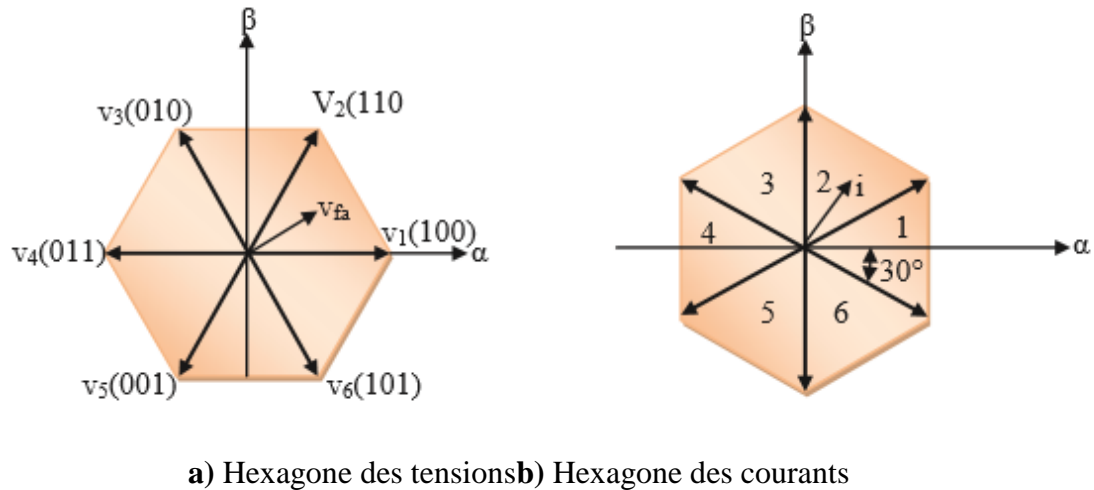


Figure II.20: Hexagones des tensions et courants définis dans le plan α - β

Ensuite, l'algorithme de commande doit identifier la région, parmi les six régions de l'hexagone de courant où l'erreur de courant Δi se situe, puis sélectionner le vecteur de tension de sortie du filtre actif v_{FA} appartenant à l'hexagone de tension ceci a pour rôle de forcer l'erreur Δi à varier dans la direction opposée, afin de maintenir le courant de sortie proche de sa consigne.[7]

II.3.4.2 Commande du filtre actif parallèle :

A l'heure actuelle, les chercheurs continuent toujours à améliorer les méthodes de commande des filtres actifs parallèles à fin d'obtenir des meilleurs résultats, tant du point de vue d'une meilleure extraction des perturbations, amélioration du régime dynamique, diminution du THD...etc., que de développement des nouvelles stratégies de commande pour une meilleure adaptation et robustesse de ces dernières face aux différents types des charges non-linéaires. Il existe principalement deux stratégies de commande pour supprimer les courants harmoniques du réseau dépendant du courant mesuré ; [10]

La première méthode est la plus appropriée au filtre actif parallèle installé par le consommateur pour compenser les courants perturbateurs causés par ses charges polluantes. La commande est mise en œuvre en trois étapes. Dans la première étape, la tension de réseau et le courant de la charge sont détectés à l'aide de transformateurs de mesures (le TC et le TP). Dans la deuxième étape, on détermine le courant de référence à partir des méthodes d'identifications approuvées. Dans la troisième étape de commande, les signaux de commutation de semi-conducteur de l'onduleur de l'FAP sont générés en utilisant, l'hystérésis, MLI classique ou vectorielle, en mode glissant, ou des techniques de contrôle à base de logique floue [7].

La commande du filtre actif parallèle est basée sur la nature de l'onduleur qui produit le courant à injecter dans le réseau et la commande choisi pour contrôler cet onduleur.

a) Méthode directe : Cette méthode est basée sur la mesure du courant de la charge polluante puis, de l'extraction des composantes harmoniques de ce courant [10]. La figure (2.21) représente le schéma de la stratégie de commande directe. De cette manière, le filtre actif injecte les courants de compensation sans information sur les courants du réseau. Toutes les erreurs dans le système comme l'incertitude des paramètres, les erreurs de mesure ou de commande apparaitront dans le réseau sous formes des harmoniques non-filtrés.

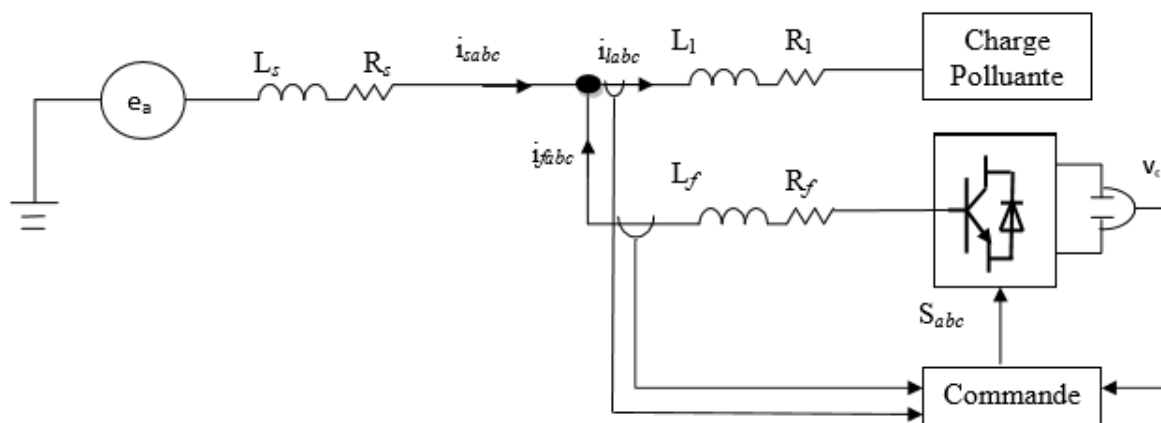


Figure II.21 : Schéma de la commande directe

b) Méthode indirecte : Cette méthode consiste à mesurer les courants du côté source, et d'imposer la forme sinusoïdale sur ces courants. L'algorithme de commande est plus moins compliqué et demande moins capteurs que celui dans la méthode directe. La figure (2.22) montre le schéma de la commande indirecte du filtre actif. Dans notre travail on à étudié la commande directe [10]

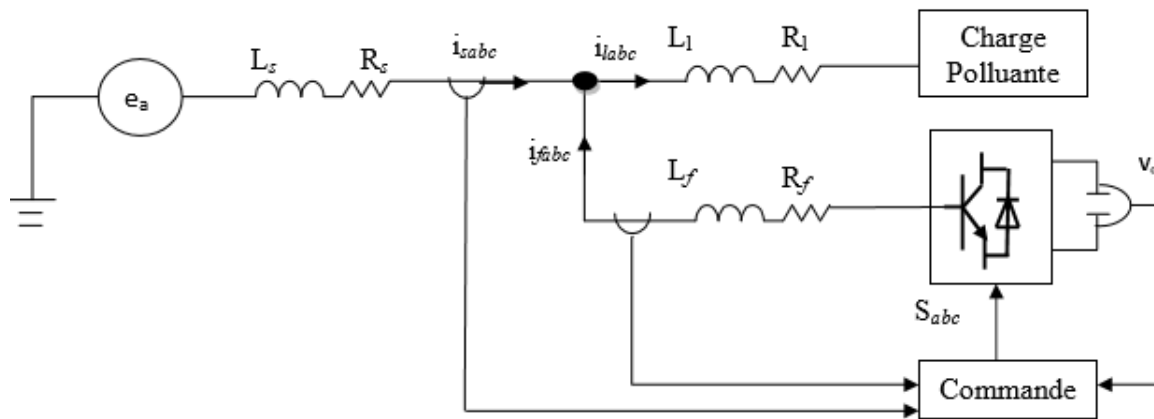


Figure II.22 : Schéma de la commande indirecte

II.4 Points d'insertion du filtre actif parallèle :

On peut connecter le filtre actif parallèle à différents points du réseau de distribution électrique:

- près des charges générant un niveau élevé d'harmoniques, afin d'assurer une correction locale des courants harmoniques ;
- de façon centralisée, au niveau du PCC, pour une compensation globale des courants harmoniques.

Dans l'idéal, la correction des harmoniques doit être effectuée à leur point d'origine. Un certain nombre de critères financiers et techniques sont pris en compte pour assurer le choix optimal.

Principaux avantages d'une compensation locale :

- évite la circulation des courants harmoniques dans l'installation électrique ;
- diminue l'effet des pertes par effet de Joule dans les câbles, et réduit la charge apparente sur le transformateur principal ;
- réduit la section des câbles nécessaires dans les nouvelles installations ;
- permet à l'installation d'être conforme aux normes en vigueur concernant les Harmoniques. [38].

II.4.1 Comparaison entre le FAP et le filtre passif shunt :**Tableau II.2 :** Comparaison entre le filtre actif parallèle et le filtre passif shunt

	Filtre Passif shunt	Filtre Actif Parallèle (FAP)
action sur les courants harmoniques	nécessite un filtre pour chaque fréquence (encombrant)	agit simultanément sur plusieurs fréquences
influence d'une variation de fréquence	efficacité réduite	aucune conséquence
influence d'une modification de l'impédance du réseau au PCC	risque de résonance	aucune conséquence
influence d'une augmentation de courant	risque de surcharge et de détérioration	aucun risque de surcharge, mais efficacité diminuée
ajout de matériel (augmentation de charge)	nécessite des modifications sur le filtre, dans certains cas	aucun problème si I du FAP $>$ I harmoniques de la charge
action sur les harmoniques suivant leur ordre	très difficile	possible, grâce au paramétrage
modification de la fréquence fondamentale	modification impossible	possible, grâce à la reconfiguration
Encombrement	Important	Faible
Poids	Important	Faible

II.4.2 Coût du filtre actif parallèle :

Grâce à l'utilisation de technologies de pointe (DSP, CMS, microcontrôleur), et l'utilisation de sous-ensembles convertisseurs de variateurs de vitesse produits en grande quantités, le coût a été réduit de manière très significative. L'objectif de prix marché varie de 200 à 300 \$ par ampère d'harmonique compensé, en fonction du calibre de l'appareil. Cette nouvelle génération de filtre actif parallèle s'affirme donc comme une solution très compétitive face aux filtres passifs [39]

II.5 Avantage des filtres harmoniques:

- Soulager les transformateurs et augmenter leur capacité du réseau en KVA.-
- Réduire les pertes par effets Joules, économie d'énergie en KWH .

- S'aligner aux normes internationales pour la distorsion du courant ($\text{THD-I} < 10\%$) et la distorsion de la tension ($\text{THD-V} < 5\%$).
- Réduire la puissance réactive en KVAR.
- Améliorer le facteur de puissance PF en le portant à des valeurs proches de 1.
- Protéger complètement les charges traitées.
- Supprimer les transitoires causée par les batteries de condensateurs automatiques et par le changement de la charge.
- Améliorer les capacités du variateur de vitesse à supporter les hausses et les chutes de tension.
- 99% d'Efficacité (Consommation négligeable). [11]

II.6 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 pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive. Le filtre actif série pour compenser toutes les [9] perturbations de tension comme les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension.

Nous avons aussi présenté le principe du filtre actif parallèle comme une solution de dépollution des réseaux électriques des courants perturbateurs comme le courant harmonique, la partie puissance et la partie commande ont été présenté d'une manière détaillé. Nous avons présenté successivement l'onduleur de tension deux niveaux ainsi que l'élément de stockage et le filtre de sortie pour la partie puissance et les techniques de commandes de l'onduleur pour la partie commande. [7] Comme nous avons déjà dit précédemment, que le rôle de la commande est la génération de courants harmoniques produits par le filtre actif afin qu'ils suivent en temps réel leurs références harmoniques, et nous avons étudié la partie commande du FAP à structure tension, afin d'injecter les courants permettant d'éliminer la pollution harmonique générée par les charges non linéaires. Où nous avons trouvé quatre blocs de commande nécessaires pour rendre ce type de compensateur efficace. [12]

Chapitre III :

Réseaux de Neurones

III.1 Introduction :

Les réseaux de neurone artificiels sont apparus dans les années 40 lors d'essais de modélisation du neurone biologique. Les applications concrètes basées sur les Réseaux de Neurones (RN) se sont vulgarisées dans les années 90 grâce aux progrès réalisés dans le domaine du calcul numérique. Depuis, ils ont attiré l'attention des chercheurs et des communautés scientifiques dans plusieurs autres domaines : l'automatique, le diagnostique, la médecine, l'aéronautique, l'informatique, l'électronique, l'électronique de puissance, etc. Dans l'idéal, l'objectif est d'implanter un cerveau humain dans une machine pour qu'elle puisse réagir intelligemment vis-à-vis des problèmes à résoudre.

Un RN est constitué d'un certain nombre de neurones interconnectés ensemble. La structure d'un neurone biologique est décrite par la figure 3 .1. Les neurones sont des cellules distinctes. Chaque neurone a un corps cellulaire complet, un axone et éventuellement une ou plusieurs dendrites. L'axone d'un neurone est lié à une dendrite d'un autre

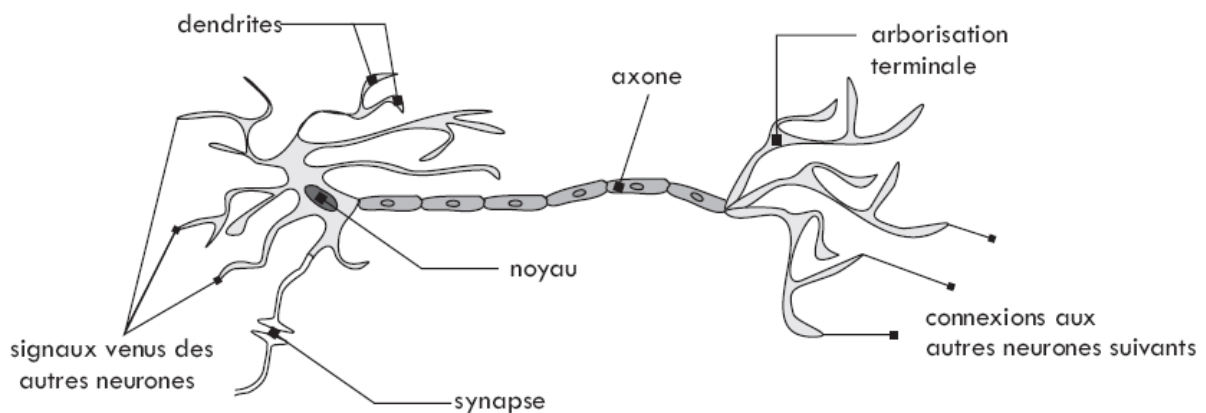


Figure III .1 : Structure d'un neurone biologique

III.2 Le neurone artificiel :

III.2.1 Définition :

Les réseaux de neurones artificiels sont des réseaux fortement connectés de processeurs élémentaires fonctionnant en parallèle. Chaque processeur élémentaire calcule une sortie unique sur la base des informations qu'il reçoit. Toute structure hiérarchique de réseaux est évidemment un réseau. L'élément de base d'un réseau de neurones est le neurone artificiel ou «perceptron». Le modèle mathématique du perceptron est présenté par la figure 3.2.

Soit un neurone k , on lui présente en entrée les signaux $x_1, x_2 \dots x_p$. Ils sont respectivement multipliés par des coefficients, appelés poids synaptiques, $w_{k1}, w_{k2} \dots w_{kp}$. On définit alors le champ induit local k comme suit :

$$V_k = \sum_{j=1}^p w_{kj} x_j \quad (\text{III.1})$$

Ce champ est additionné d'une constante, appelée biais b_k , puis traité par une fonction d'activation φ pour donner la sortie du neurone:

$$y_k = \varphi(v_k + b_k) \quad (3.2)$$

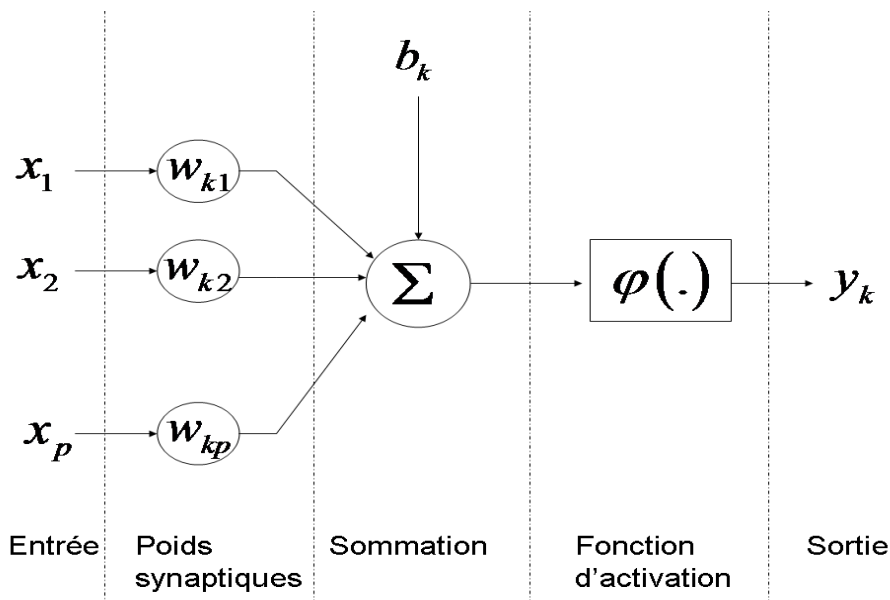


Figure III.2 : Modèle non linéaire d'un neurone

La fonction d'activation peut être linéaire ou non, la figure 3.2 illustre les types les plus répandus. Le choix des fonctions à utiliser est intimement lié au problème à résoudre.

Les RNA sont une formulation mathématique simplifiée des neurones biologiques. Ils ont la capacité de mémorisation, de généralisation et surtout d'apprentissage qui est le phénomène le plus important.

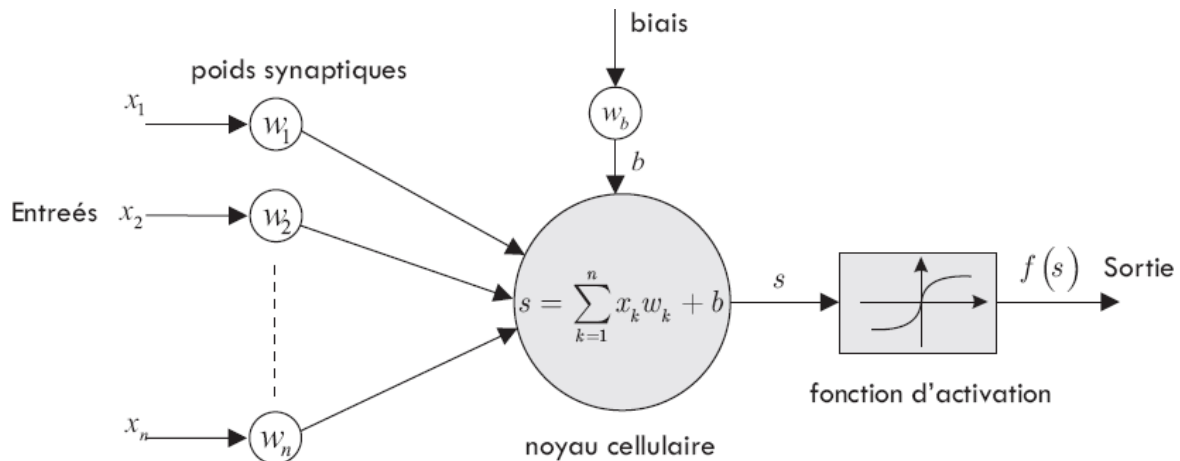


Figure III.3 : Modèle mathématique d'un neurone biologique

III.2.2 Types et structures des réseaux de neurones artificiels (RNA) :

III.2.2.1 Types de RNA:

Pour concevoir un réseau de neurones, nous devons établir des connexions entre les neurones.

Nous avons quatre types principaux de connexion: directe, récurrente, latérale et à délais.

a) connexion directe :

Tous les réseaux de neurones utilisent la connexion directe pour acheminer l'information de l'entrée vers la sortie.

b) connexion récurrente :

La connexion récurrente permet d'acheminer l'information de la sortie des neurones des couches supérieures vers les entrées des neurones précédents.

c) la connexion latérale :

Les réseaux de neurones qui doivent choisir un neurone gagnant utilisent la connexion latérale pour établir une relation entre les neurones de sortie et la maintenir.

d) la connexion à délais :

Finalement, les problèmes temporels sont résolus par les modèles de réseaux dynamiques avec des connexions à délais [45].

Les connexions entre les neurones peuvent être complètes ou partiellement complètes. Une connexion est complète lorsque les neurones d'une couche inférieure sont reliés à ceux de la supérieure et elle est locale lorsque les deux couches de neurones ne sont pas complètement reliées. Une couche est définie comme un ensemble de neurones situé au niveau d'un réseau de neurones. Nous avons, par exemple, une couche de neurones de sortie avec des couches situées entre les entrées-sorties appelées couches cachées. Les réseaux de neurones possèdent une ou plusieurs couches de neurones et leur dimension dépend du nombre de couches et du nombre de neurones par couche.

III.2.3 Perceptron:

Le perceptron est la forme la plus simple d'un réseau de neurones, il modélise la perception visuelle. Il comprend trois principaux éléments: la rétine, les cellules d'association et les cellules de décision. La fonction d'activation utilisée dans ce réseau est de type tout ou rien (0 ou 1). L'apprentissage du perceptron peut se faire avec plusieurs méthodes déjà utilisées, il n'y a qu'une seule couche de poids modifiables entre les cellules d'association et les cellules de décision. Le perceptron est limité dans ses applications. Premièrement, il ne peut être applicable que dans la classification dont les variables sont linéairement séparables et deuxièmement la sortie ne peut être que 0 ou 1.

III.2.3.1 Perceptron multicouche:

Cette classe est la plus importante des réseaux de neurones car elle représente la généralisation du perceptron monocouche avec une fonction d'activation de type sigmoïde et une ou plusieurs couches cachées. Le vecteur d'entrée se propage dans le réseau de couche en couche jusqu'à la sortie, l'entraînement de celui-ci se fait avec l'algorithme par la rétro-propagation de l'erreur [45] [46].

Ce réseau est caractérisé par son modèle du neurone traitant les non-linéarités. Il peut comporter une ou plusieurs couches cachées et un plus grand nombre de connexions permettant de résoudre la majorité des problèmes.

Même avec les avantages des couches cachées et la performance de l'algorithme d'apprentissage, il reste plusieurs problèmes non réglés comme le choix du nombre de couches, le nombre de neurones par couche et le problème des minimums locaux où le réseau peut converger.

III.2.3.2 Réseau de neurones linéaire:

Cette classe de réseaux diffère du perceptron car elle possède un neurone dont la fonction d'activation est linéaire. L'une des règles d'apprentissage permet d'effectuer une descente de gradient de l'erreur sur une mesure d'erreur quadratique [47] [45] [48]. Les domaines d'application comprennent la commande, le contrôle, et le traitement du signal. L'avantage de ce réseau est qu'il converge sur un seul minimum si la solution existe, sinon l'ajout de couches n'a aucun effet. Parmi ses inconvénients, il est limité à une Coluche de sortie et ne peut résoudre que les problèmes dont la relation entrées/sorties est linéaire.

III.2.3.3 Réseau Hopfield:

Ce réseau est basé sur les principes de la physique statistique et il est fondamentalement une mémoire adressable par son contenu. Les neurones, basés sur le modèle étudié en [49], sont tous interconnectés. Plusieurs domaines d'application sont possibles, en particulier: les mémoires associatives et l'économie. La principale limitation est qu'il n'y a pas de couches cachées.

III.3 Structure d'un neurone:

Le neurone est la cellule fondamentale d'un réseau de neurones artificiels. Par analogie avec le neurone biologique, le neurone doit être apte à accomplir les tâches suivantes: collecter, traiter les données qui viennent des neurones émetteurs et transmettre les messages aux autres neurones. La relation entre l'entrée et la sortie du neurone peut être donnée par l'équation suivante:

$$S_i = F(a) \quad (\text{III.3})$$

$$a = \sum_{j=0}^N W(i,j) \cdot x(j) \quad (\text{III.4})$$

Les variables N , S_i , F , x et W désignent respectivement le nombre d'entrées du réseau de neurones, le vecteur de sortie du réseau, la fonction d'activation, le vecteur des entrées du réseau de neurones et la matrice des poids. Nous présentons dans la figure 3.4 la structure d'un neurone simple.

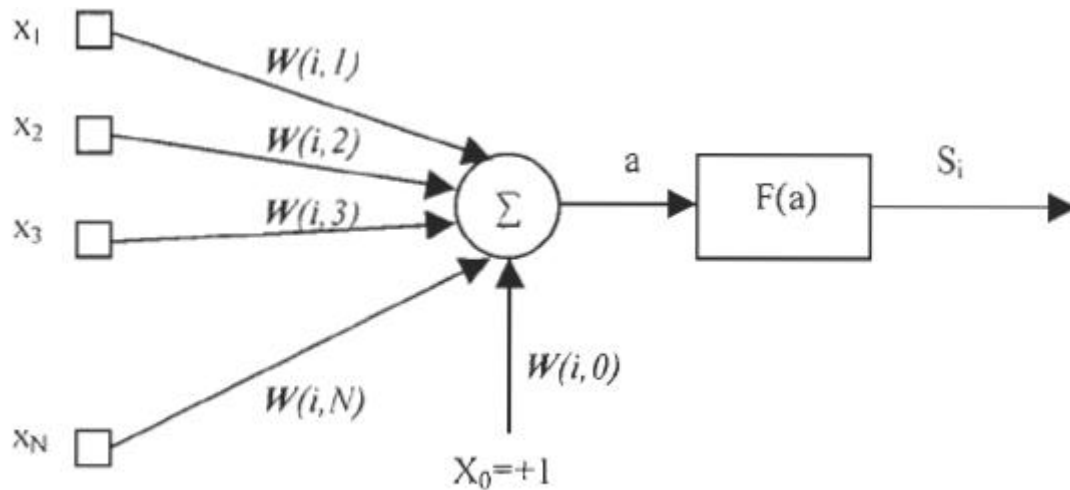


Figure III.4: Structure d'un neurone simple.

III.3.1 Structure d'un réseau de neurones à couches simples:

Le réseau à couches est un réseau dont les neurones sont organisés en couches, la forme-la plus simple est le réseau à une seule couche. Tous les signaux d'entrées sont propagés des nœuds d'entrée vers la couche de neurones de sortie.

Le nombre de neurones d'entrée (nœuds) et de sortie est en général lié au problème à résoudre. Les entrées seront propagées à travers la matrice des poids W pour ensuite obtenir la réponse de sortie (figure 3.5). L'équation équivalente peut s'écrire sous la forme:

$$y(j) = \sum_{i=0}^N W(i,j) \cdot x(i) \quad (\text{III.5})$$

Où:

$x(i)$: Vecteur d'entrée.

$Y(j)$: Vecteur de sortie.

$W(i,j)$: Poids du réseau de neurones.

$W(0,j)$ représente le biais $b(j)$.

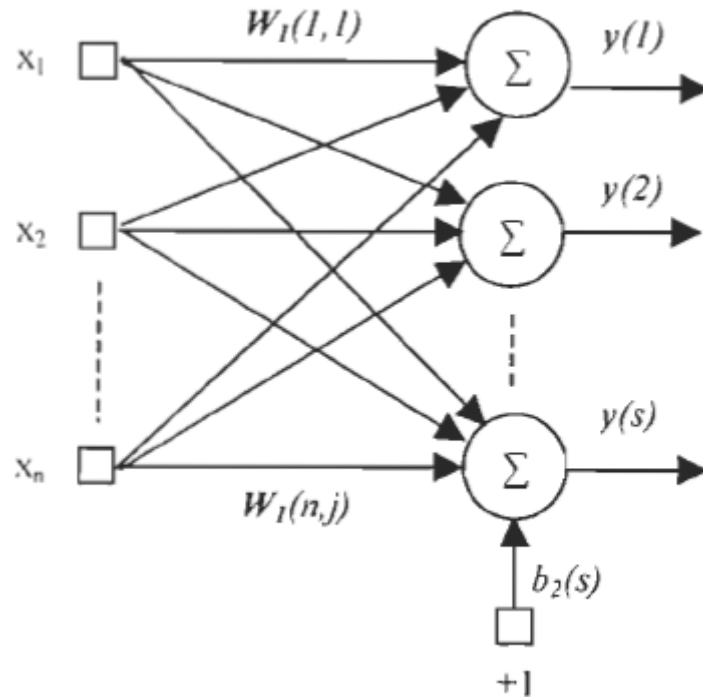


Figure III.5 : Réseau de neurones monocouche.

III.3.2 Structure des réseaux de neurones multicouches:

Cette structure est caractérisée par une ou plusieurs couches. À chaque couche correspond une matrice de poids W et un vecteur de seuils b , et on peut avoir aussi des fonctions d'activation différentes pour chaque couche. La fonction des couches cachées intervient entre les entrées x et la couche de sortie y . Elle permet de résoudre des problèmes plus complexes que le réseau à couche simple.

Les réseaux de neurones utilisant un apprentissage par rétro propagation [46] [50] sont constitués de plusieurs couches (multicouches) qui comportent chacune plusieurs neurones. Ces derniers sont reliés entre eux par des matrices de poids qui caractérisent le réseau. Dans ce type de réseau de neurones, chaque neurone a d'abord le rôle de sommer les différentes entrées pondérées par leurs poids respectifs, puis de passer la somme obtenue dans une fonction F_2 linéaire ou non-linéaire et finalement, de transmettre le résultat aux neurones de la couche suivante.

$$S(z) = F_2(y_s(z)) \quad (\text{III.6})$$

$$y_s(z) = \sum_{i=0}^j W_2(i, z) \cdot f_1(y(i)) \quad (\text{III.7})$$

$$y(s) = \sum_{i=0}^n W_1(i, s) \cdot x(i) \quad (\text{III.8})$$

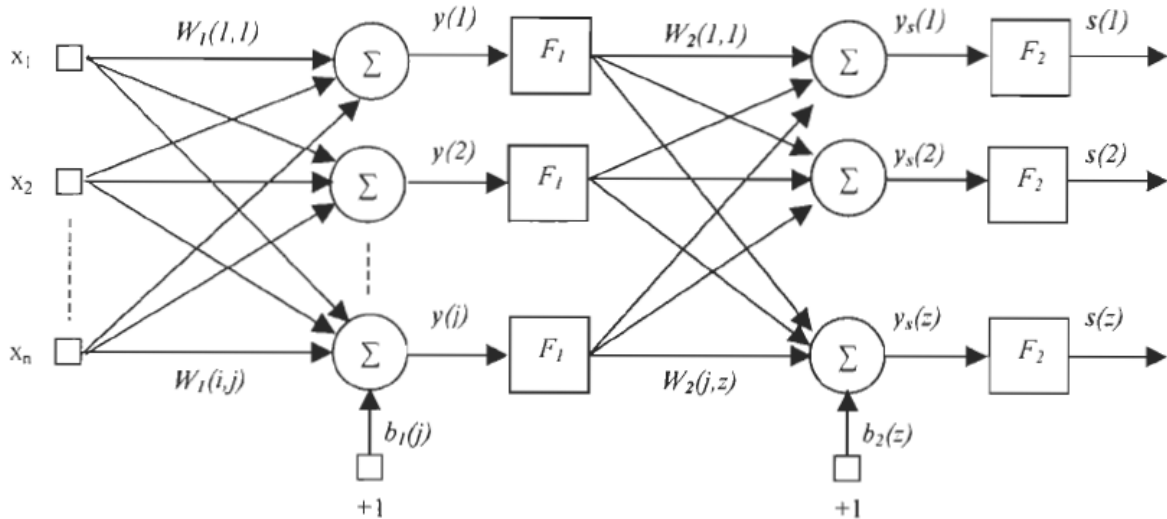


Figure III.6: Réseau de neurones multicouches.

III.4 Fonctions d'activation de RNA:

Les fonctions d'activation utilisées dans les modèles connexionnistes d'aujourd'hui sont variées. On peut identifier trois principaux types de fonctions les plus connues: binaire à seuil, rampe avec saturation, et la sigmoïde

III.4.1 Fonction binaire à seuil:

La figure 3.7 présente la fonction d'activation qui a été utilisée dans [51]. Le seuil introduit une non-linéarité dans le comportement du neurone, c'est le modèle tout ou rien.

Tapez une équation ici

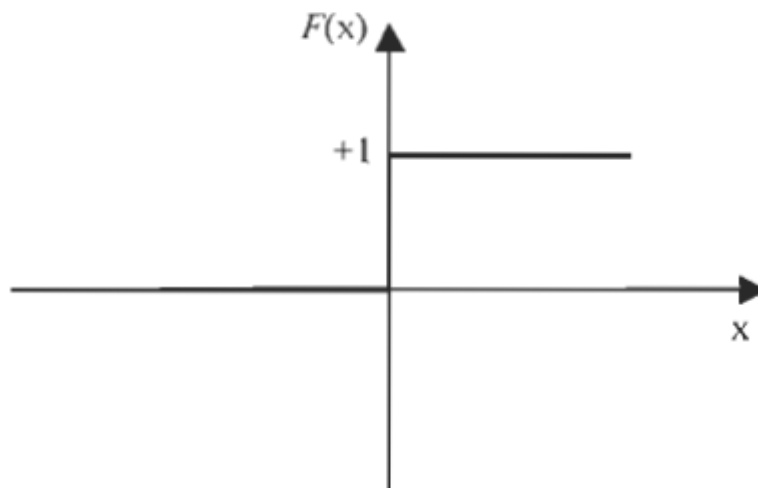


Figure III.7: Fonction d'activation binaire à seuil.

III.4.2 Fonction à rampe avec saturation:

Cette fonction représente un compromis entre la fonction linéaire et la fonction seuil: entre ses deux bornes, elle confère au neurone une combinaison linéaire de l'entrée. À la limite, la fonction linéaire est équivalente à la fonction seuil (Figure.3.8).

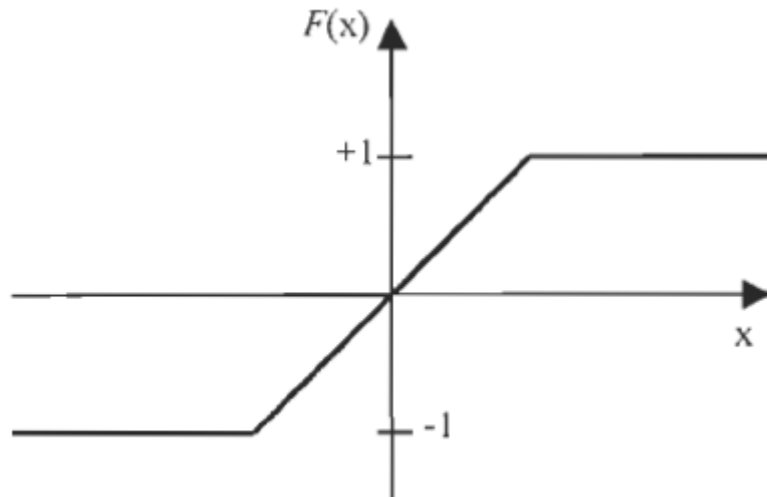


Figure III.8 : Fonction d'activation à rampe avec saturation.

III.4.3 Fonction sigmoïde :

La fonction sigmoïde est une fonction continue qui maintient la sortie dans l'intervalle $[0,1]$ (Figure 3.9). Son avantage principal est l'existence de sa dérivée en tout point. Elle est employée en général dans le perceptron multicouche [45].

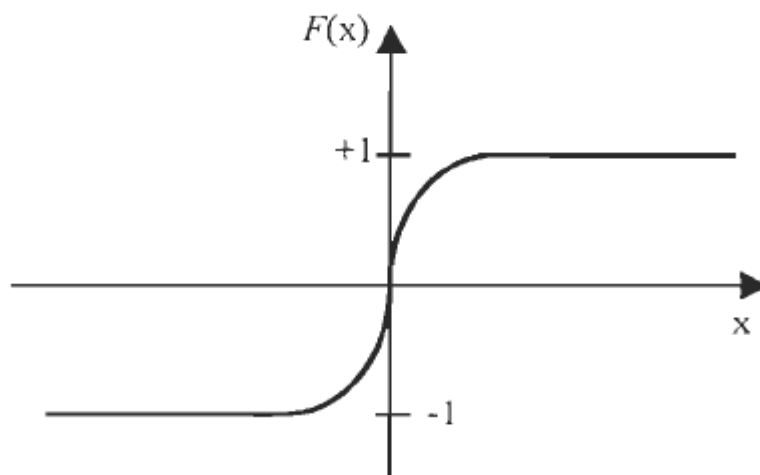


Figure III.9 : Fonction d'activation sigmoïde

III.5 Apprentissage :

L'apprentissage est une phase du développement d'un réseau de neurones durant laquelle le comportement du réseau est modifié jusqu'à l'obtention du comportement désiré.

On distingue deux grandes classes d'algorithmes d'apprentissage :

- L'apprentissage supervisé
- L'apprentissage non supervisé.

III.5.1 Modes d'apprentissage des réseaux de neurones artificiels (RNA) :

Un RN est toujours immergé dans un environnement avec l'interface des connaissances. L'apprentissage supervisé est effectuée par un « superviseur » qui a pour rôle de surveiller la réponse du réseau. Par contre, l'apprentissage par renforcement est basé sur une procédure d'essai-erreur au moyen d'un signal critique. L'apprentissage non-supervisé n'a pas besoin de superviseur, ni de signal critique pour générer les signaux d'entrées du réseau [65]. Dans cette section, les trois méthodes seront abordées.

III.5.1.1 Apprentissage supervisé :

Le principe de l'apprentissage supervisé est montré par la figure 3.10 .L'environnement est représenté par un ensemble de variables placé en entrée du superviseur et du RN. Supposons que pour une entrée donnée, le superviseur puisse donner en sortie une réponse exacte, celle-ci est la sortie désirée correspondant à l'entrée donnée. Le RN a besoin des informations « entrée-sortie » produites par le « superviseur » pour pouvoir émuler le plus correctement possible son superviseur en adaptant ses poids. Cette procédure est appelée le « processus d'apprentissage ».

A chaque instant t (temps continu) ou k (temps discret), une entrée x est donnée tant pour le superviseur que pour le RN. Le superviseur produit une sortie désirée y_d tandis que le RN donne une réponse y . La différence entre ces deux sorties, appelée « erreur », est utilisée pour modifier la structure interne (mise à jour des poids) du RN pour que l'erreur diminue et atteigne la valeur la plus petite possible. Le calcul de la sortie et la mise à jour des poids est réalisé dans une itération. A chaque itération, l'erreur se doit de diminuer, le RN reproduit le comportement du superviseur en fournissant une estimation de la relation entre les entrées et les sorties dans le domaine de variation des variables dans lequel se trouvent les exemples d'apprentissage. Une fois que l'erreur attendue est obtenue (après certaines itérations), le RN peut remplacer le superviseur et travailler de manière autonome. Il saura également et dans certaines limites, calculer la sortie pour une entrée qui ne lui a jamais été présentée, cette entrée doit cependant être proche des entrées de la base d'apprentissage. Si cette propriété

de généralisation est acquise, on a alors un apprentissage correct. Le nombre d'itérations est fixé par le concepteur, il dépend de la complexité de la structure, du nombre de variables, de l'environnement et d'un autre facteur important, le temps d'apprentissage. En général, plus le nombre d'itérations est grand, plus l'erreur est petite [52] [53].

Ce type d'apprentissage est souvent utilisé pour l'identification des systèmes dynamiques (linéaires ou non linéaires, variant ou invariants dans le temps) [54] [55] et pour la commande des systèmes [55] [56] [57] [58] [40].

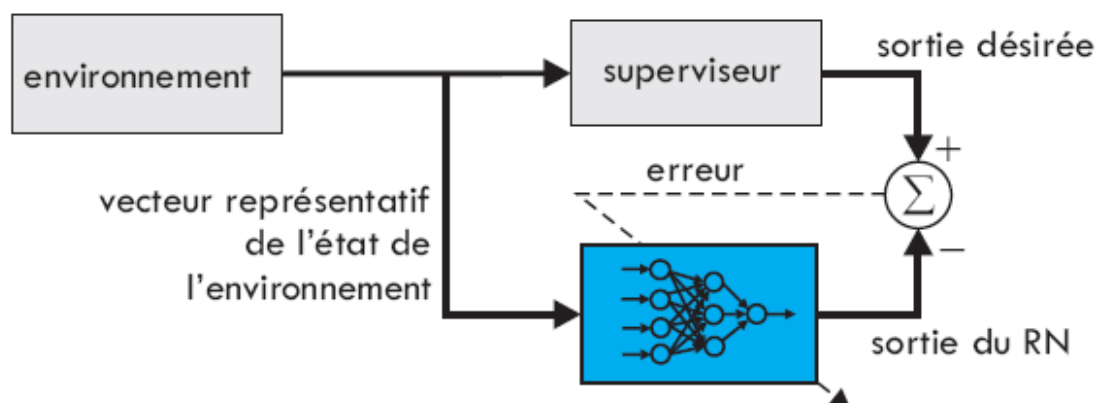


Figure III.10: Méthode d'apprentissage supervisé

Dans l'apprentissage supervisé, un superviseur représenté par les équations dynamiques du modèle à commander ou à identifier doit être disponible. Dans le cas où nous ne disposons pas des signaux désirés fournis par le superviseur, nous ne pouvons pas utiliser cette approche. Pour contourner cette contrainte, un autre type d'apprentissage, appelé « apprentissage par renforcement », est présenté dans [52] [59]. Nous présenterons le principe (sans détails) de ce type d'apprentissage dans la section suivante.

III.5.1.2 Apprentissage par renforcement :

L'apprentissage par renforcement est mathématiquement un problème d'optimisation dont l'objectif est de chercher les bonnes actions affectant un système afin de produire asymptotiquement les sorties désirées [52] [59].

L'apprentissage par renforcement peut se faire de trois manières différentes :

- par apprentissage non-associé,
- par apprentissage associé,
- par apprentissage séquentiel

La figure (3.11) montre la procédure d'apprentissage par renforcement non-associé. Le signal de sortie du processus, appelé « signal critique », sera transformé en « signal de renforcement » via un organisme « critique ». Par la suite, ce signal de renforcement jouera le rôle d'entrée du RN pour générer les actions en sortie. Le processus est répété jusqu'au moment où l'erreur entre la sortie du système et la sortie désirée devient acceptable. Avec la méthode d'apprentissage associé montrée par la figure 3.b, il y a, en plus, des signaux appelés « signaux de stimulation » (stimulus pattern) en entrée du RN pour prendre en compte la dynamique et la flexibilité de la procédure (le réseau peut travailler avec différents états du processus). Les détails sont à consulter dans les références [52] [59] [57].

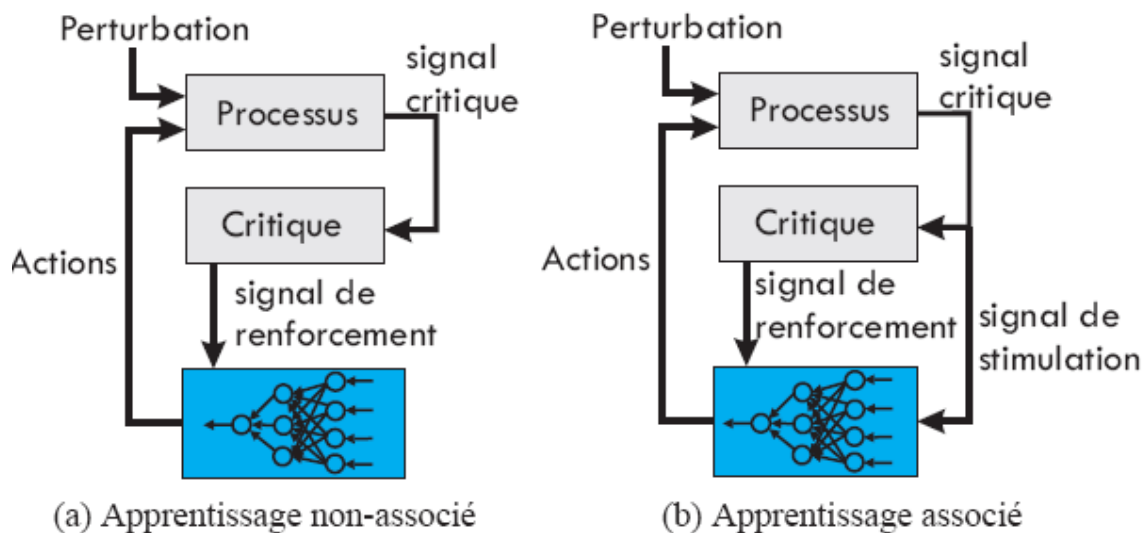


Figure III.11 : Modèle d'apprentissage par renforcement

III.5.1.3 Apprentissage non-supervisé :

Dans l'apprentissage non-supervisé, il n'y a ni observateur, ni mécanisme critique externe pour surveiller le processus d'apprentissage. Cette méthode d'apprentissage est montrée par la figure (3.12). Les mesures indépendantes de l'environnement (vecteur représentatif de l'environnement) sont envoyées à l'entrée du réseau et les poids évoluent en respectant ces mesures pour être optimaux. La structure du réseau change afin de coder les informations à l'entrée et créer de nouvelles classes [52]. L'algorithme d'apprentissage compétitif peut être utilisé pour la méthode d'apprentissage non-supervisé. Par exemple, considérons un réseau à 2 couches : une couche d'entrée et une couche compétitive de sortie. La couche d'entrée reçoit les informations disponibles, la couche compétitive comporte les neurones qui sont en concurrence. Le neurone qui gagne la compétition vaut 1 (turn on) et les autres valent zéro (turn off). Ce principe est très approprié pour les applications de classification.

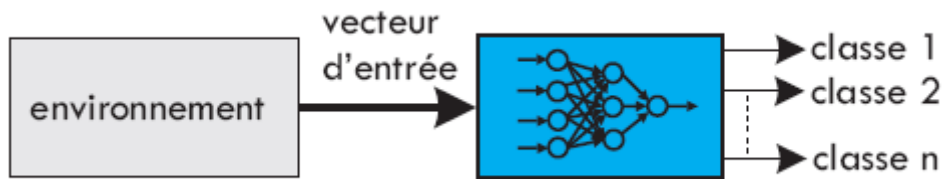


Figure III.12: Modèle d'apprentissage non-supervisé

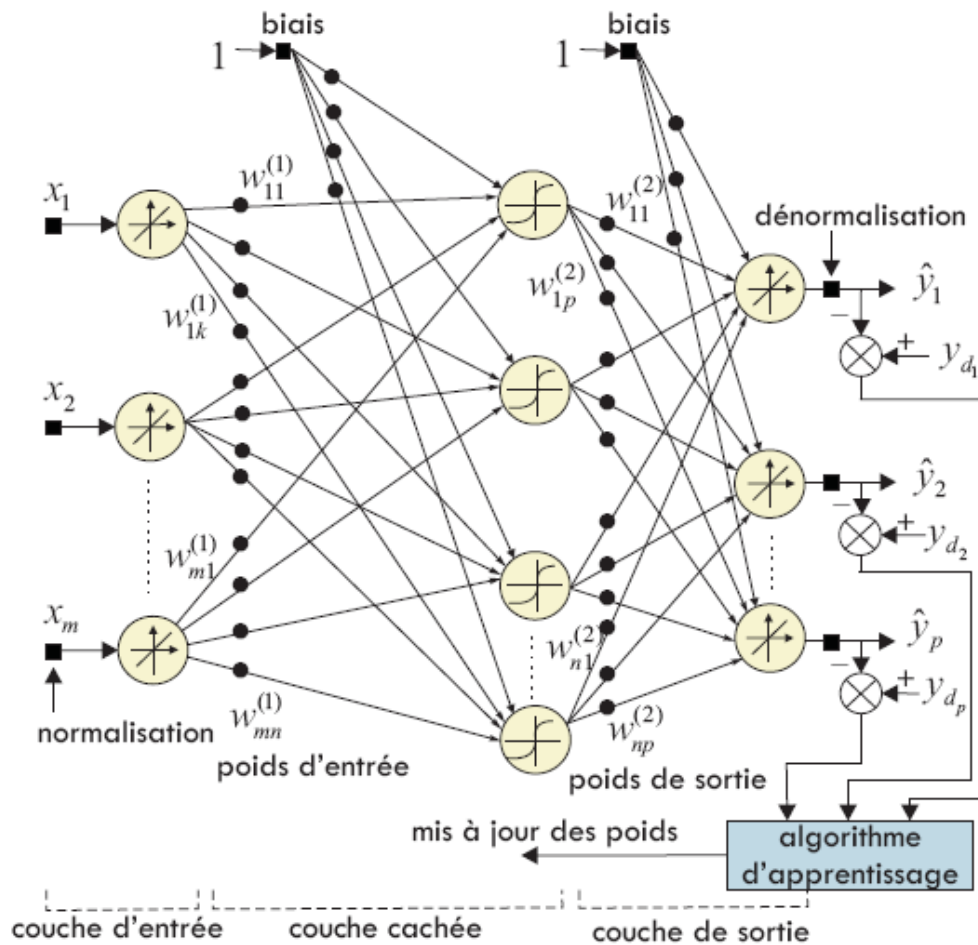


Figure III.13 : Structure d'un réseau de neurones (à une seule couche cachée)

III.6 Réseau de neurones type ADALINE :

En 1960, Bernard Widrow, un automaticien, développe le modèle Adaline, qui est une abréviation de (Adaptative Linear Element) [66]. Sa structure est une extension du perceptron simple: un perceptron linéaire sans couche cachée donc à un seul neurone. [42, 43, 44, 60, 61 et 62]. L'idée est de remplacer la fonction seuil sur les cellules de sortie par la fonction identité

($f(x)=x$). Cependant, l'apprentissage est supervisé et va être défini comme la minimisation de l'erreur quadratique du système donné par l'équation ($f(x)=x$).

En donnant à l'ADALINE un signal d'entrée, les poids du réseau seront ajustés en comparant la valeur du signal de sortie avec celle désirée. L'apprentissage pour l'ajustement du poids s'effectue jusqu'à ce que le taux d'erreur soit plus petit que notre tolérance.

Il existe plusieurs fonctions d'adaptation pour minimiser l'erreur quadratique. On note par exemple: la méthode des moindres carrés Moyens (en anglais Least Mean Square LMS (error)).

La structure du réseau de neurone ADALINE est représentée sur la figure 3.14 :

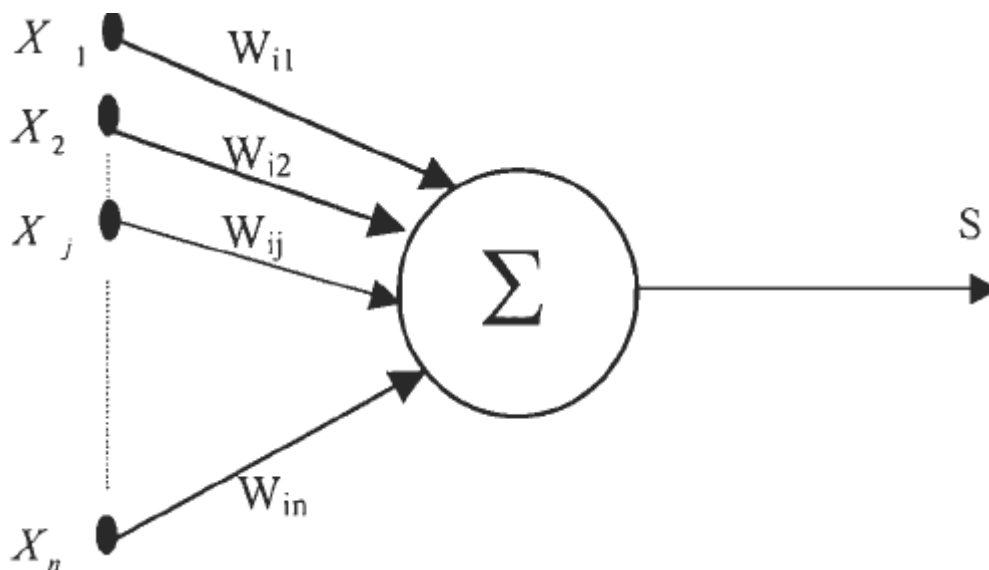


Figure III.14 : Représentation d'un ADALINE

III.6.1 Application des RNAs à l'estimation du contenu harmonique :

Cette section porte sur les différentes techniques d'adaptations du réseau de neurones artificiels (RNA) de type ADALINE (Adaptive linear Element) pour l'estimation des contenus harmoniques [42, 43, 44, 41, 62 et 63].

Pour estimer le contenu harmonique du signal $y(t)$, nous avons utilisé le réseau de neurone ADALINE illustré à la figure (3.15). Ce réseau de neurones comprend deux sous RN s. Le premier sous RN comprend $(2n+ 1)$ entrées définies par le vecteur $\mathbf{h}(\mathbf{k})$ donné par l'équation (3.10) et une seule sortie qui représente le signal estimé, ses poids d'adaptation représentent les amplitudes harmoniques en quadratique du signal mesuré. Tandis que le deuxième sous RN comprend $(2n + 1)$ entrées définies par le vecteur $\mathbf{n}(\mathbf{k})$ donné par l'équation (3.11) et une seule

sortie qui représente le scalaire $r(k)$; son poids d'adaptation représente la fréquence fondamentale.

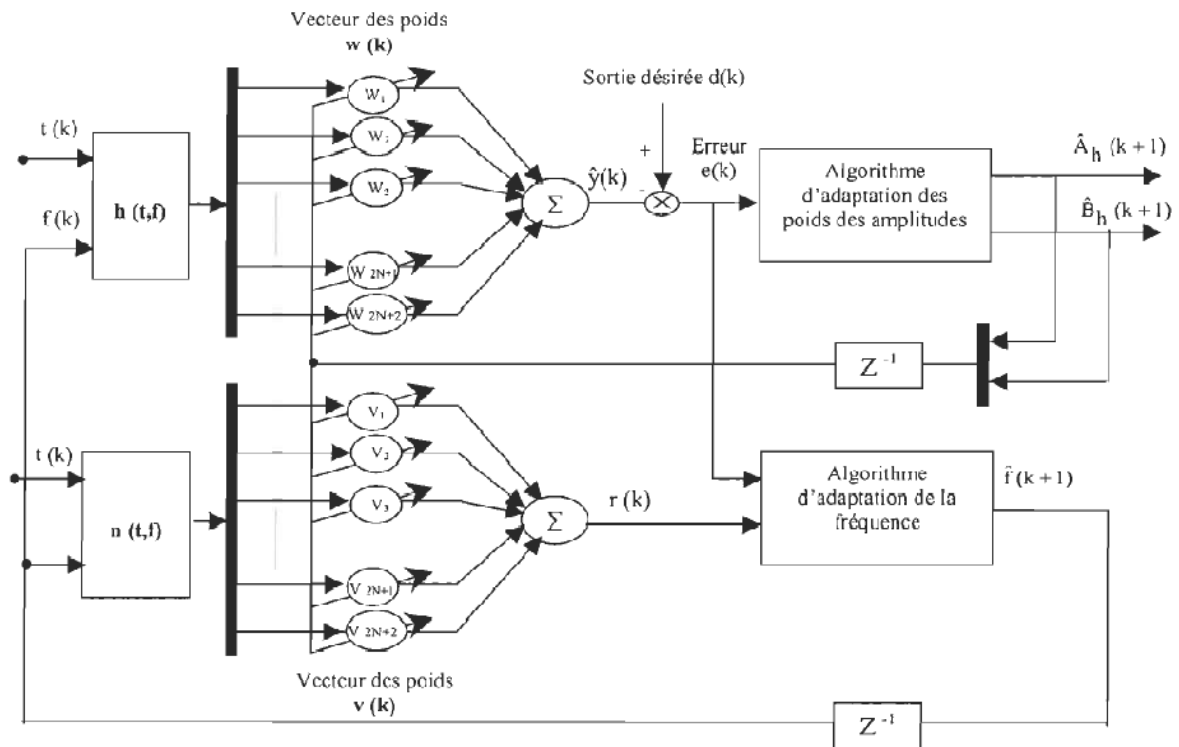


Figure III.15 : Réseau de neurone étudié type ADALINE

Ce RN type ADALINE utilise deux algorithmes pour faire la mise à jour de ses poids. En effet, nous avons utilisé deux algorithmes, le premier pour faire adapter les poids des amplitudes harmoniques tandis que le deuxième est utilisé pour faire l'adaptation de la fréquence fondamentale.

La performance de l'ajustement des poids de l'amplitude est caractérisée par l'algorithme utilisé pour faire l'apprentissage en ligne du RN en minimisant l'erreur quadratique suivante:

$$E = \sum_{i=0}^m (y_i - \sum_{h=1}^N (A_h \cdot \sin(h \cdot \omega \cdot t_i) + B_h \cdot \cos(h \cdot \omega \cdot t_i)))^2 \quad (III.9)$$

Où m représente le nombre d'échantillons mesurés.

Dans ce qui suit, nous allons développer et présenter les paramètres du RN étudié. L'entrée de l'ADALINE est donnée par l'équation (3.10) avec une composante continue nulle i.e. ($B_0=0$):

$$h(K) = [1 \sin \omega t(k) \cos \omega t(k) \dots \sin(N\omega \cdot t(K)) \cos N\omega \cdot t(K)]^T \quad (III.10)$$

Où T représente la transposée. Avec une composante continue variable, B_a est exprimée comme $B_{dc} \exp(-\alpha \cdot t)$. Le vecteur $h(k)$ est devenu [43, 44, 61]:

$$h(K) = [1 - KT_s \sin(\omega t(K)) \cos(\omega t(K)) \dots \sin(N\omega t(K)) \cos(N\omega t(K))]' \quad (III.11)$$

où T_s représente la période d'échantillonnage. La composante continue est modélisée en prenant les deux premiers termes de la série de Taylor:

$$B_0 \exp(-\alpha.K.T_s) = B_0 - B_0 \alpha.K.T_s \quad (III.12)$$

Le vecteur d'adaptation w est donné:

- pour une composante continue nulle:

$$W(K) = [A_1 B_1 A_2 B_2 \dots A_N B_N]' \quad (III.13)$$

- pour composante continue variable:

$$W(K) = [B_0 B_0 \alpha A_1 B_1 A_2 B_2 \dots A_N B_N]' \quad (III.14)$$

Par l'estimation du vecteur w à l'instant k , nous pouvons facilement obtenir le signal estimé donner par l'équation suivante:

$$\hat{Y}(K) = W(K)^T h(K) \quad (III.15)$$

Par l'estimation de A_h et B_h , Y_h et ϕ_h peuvent être calculer comme suit :

$$Y_h = \sqrt{A_h^2 + B_h^2} \text{ et } \phi_h = \tan^{-1} \frac{B_h}{A_h} \quad (III.16)$$

Ainsi, l'adaptation de la fréquence fondamentale (ou la pulsation fondamentale) est obtenue en minimisant l'erreur quadratique donnée par l'équation (3.9). En développant les équations, nous obtenons:

$$\hat{W}(K+1) =$$

$$\hat{w}(K) + \mu_\omega (d(K) y(K) \cdot t(K) \cdot \sum_{h=1}^N h \cdot (A_h(K) \cdot \cos(h \cdot \omega(K) \cdot t(K)) B_h(K) \sin(h \cdot \omega(K) \cdot t(K)))$$

$$(3.17)$$

Où μ_ω représente le coefficient de relaxation du paramètre ω (entre 0 et 1) et $t(k)$ représente l'instant k . L'équation (3.18) peut être exprimée comme suit:

$$\hat{W}(K) = \hat{w}(K-1) + \mu_\omega e(K) r(K) \quad (III.18)$$

$$\text{Ou: } r(K) = v(K)^T \cdot n(K) \quad (III.19)$$

$$v(K) = t(K) W(K) \quad (III.20)$$

Et le vecteur $n(k)$ est donné par :

- Pour une composante continue nulle:

$$n(K) = [\cos(\hat{w} \cdot t(K)) - \sin(\hat{w} \cdot t(K)) \dots N \cdot \cos(N \cdot (\hat{w} \cdot t(K)) - N \cdot \sin(N \hat{w} \cdot t(K))]^T \quad (III.21)$$

- Pour une composante continue variable:

$$n(K) = [0 \quad 0 \cos(\hat{w} \cdot t(K)) \quad - \sin(\hat{w} \cdot t(K)) \quad \dots \quad N \cos(N \hat{w} \cdot t(K)) \quad - N \sin(N \hat{w} \cdot t(K))]^T \quad (\text{III.22})$$

D'après l'équation (3.18), la mise à jour de la fréquence fondamentale s'effectue en utilisant l'algorithme LMSS. On peut aussi développer cet algorithme en utilisant l'algorithme RLS.

III.7 Conclusion :

Les RNA sont une formulation mathématique simplifiée des neurones biologiques. Ils ont la capacité de mémorisation, de généralisation et surtout d'apprentissage qui est le phénomène le plus important.

Les principales qualités des réseaux de neurones sont leur capacité d'adaptabilité et d'auto-organisation et la possibilité de résoudre des problèmes non-linéaires avec une bonne approximation [63] [64]. Ils ont une bonne immunité aux bruits et se prêtent bien à une implantation parallèle. La rapidité d'exécution est une qualité importante et elle justifie souvent à elle seule le choix d'implanter un réseau de neurones. Ces qualités ont permis de réaliser avec succès, plusieurs applications : classification, filtrage, compression de données, contrôleur, ...etc.

CHAPITRE IV :
Simulations
et discussions

IV.1 Introduction

Les différentes parties du filtre actif parallèle à structure tension étudiées précédemment sont modélisées et simulées sous MATLAB-SIMULINK. La partie de puissance et de commande en sont réalisées avec les composants disponibles dans la librairie de ce logiciel. Ce dernier, supporte les systèmes linéaires et non linéaires modélisés en temps échantillonné. Les systèmes dynamiques sont simulés par des diagrammes donnés sous forme de bloc. Le logiciel présente les avantages suivants :

- Utilisation des routines sophistiquées.
- Résolution rapide des équations.
- Utilisation d'un espace mémoire réduit.

IV.2 Problématique :

Nous venons de voir dans le premier chapitre les différentes perturbations susceptibles de nuire au bon fonctionnement des systèmes électriques, en particulier les harmoniques, ainsi que les solutions appropriées pour la dépollution notamment le filtrage actif.

Dans ce chapitre nous entamerons l'étude d'un cas particulier de ces solutions qui est le filtre actif Parallèle basé sur un onduleur de tension. L'objectif est de confronter les performances du filtre actif parallèle (FAP) d'une part avec l'utilisation de la méthode des puissances instantanées p-q et d'autre part avec la méthode p-q modélisée par un réseau de neurone artificiel (ANN). La simulation se fait avec l'utilisation de deux réseaux Indépendant, le premier est une source de tension sinusoïdale normale, le deuxième avec une intervalle de perturbation de 0.3s à 0.5s. afin d'atteindre la meilleure flexibilité et fiabilité.

IV.3 Résultats de simulation et discussions :

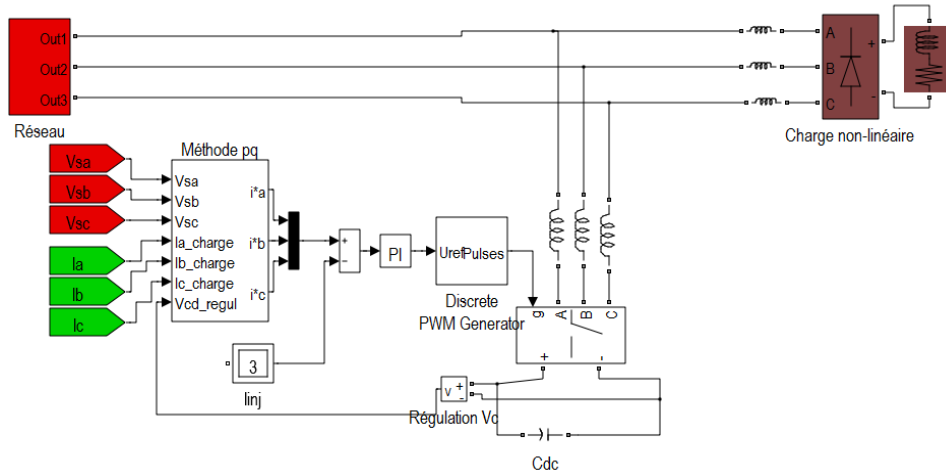


Figure IV.1 : Structure générale du filtre actif parallèle étudié

La Figure 4.1 présente l'ensemble de la structure du filtre actif parallèle et de son environnement fonctionnel, lequel se compose :

- d'un réseau électrique triphasé à trois fils.
- d'un pont redresseur à diodes triphasé alimentant une charge (R_{ch} - L_{ch}) pour la représentation d'une charge non linéaire génératrice des courants harmoniques.
- d'un filtre actif parallèle.

Tableau IV.1 : Les paramètres du système.

Grandeur	Valeur
La tension de phase U	220 V
La fréquence de source f_s	50 Hz
L'inductance de filtre L_f	0.1Mh
Dc condensateur C_{dc}	4.4mF
Redresseur R_s, C_s, V_f	100Ω, 0.1×10^{-6} , 0,8V
La charge R,L	10 Ω / $3,60 \times 10^{-3}$ H

IV.4 Simulation une tension sinusoïdale :

IV.4.1 Fonctionnement sans filtre actif FAP :

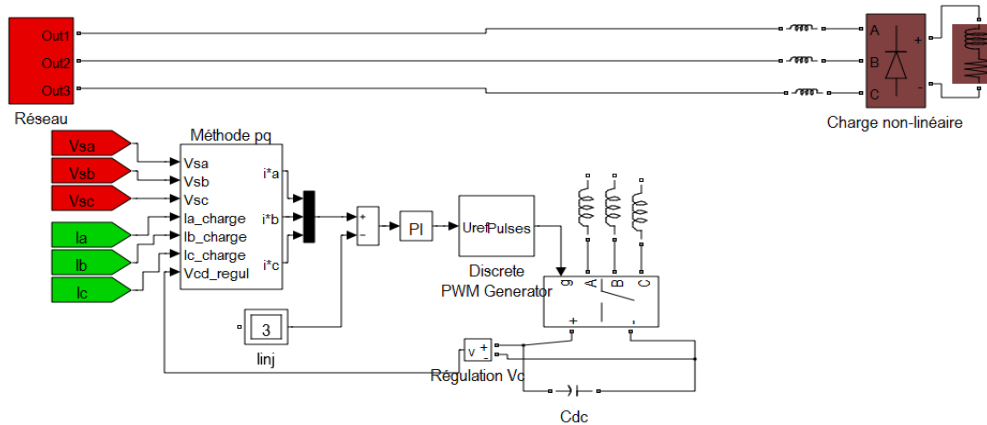
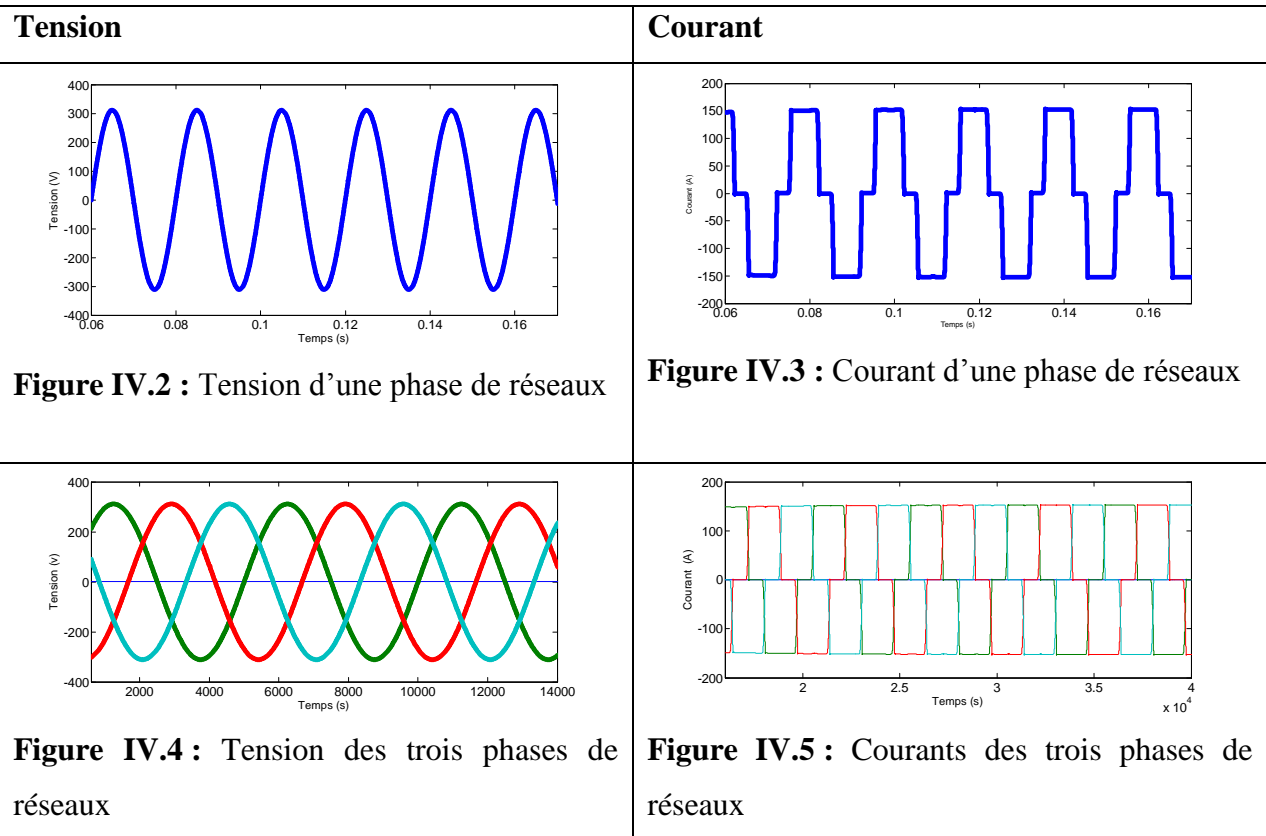
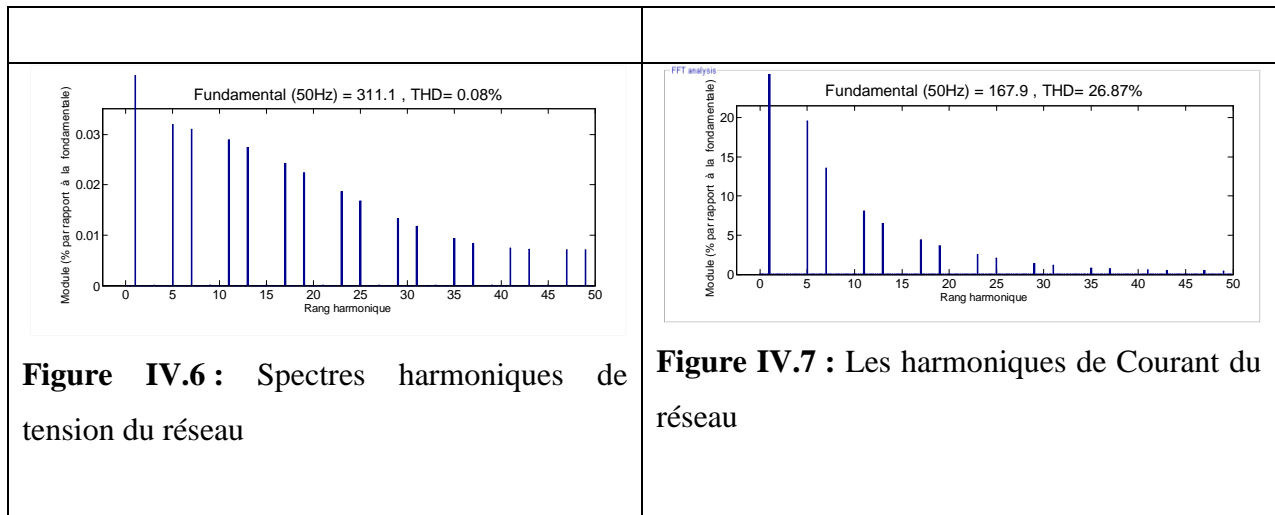


Figure IV. 1(a) : Structure sans filtre actif parallèle.

On simule sans filtre actif Figure 4.1(a).et on relève les figures représentons les courbes du courants, tensions, les spectres harmoniques tension et courant.

a) Les courbes de la simulation :





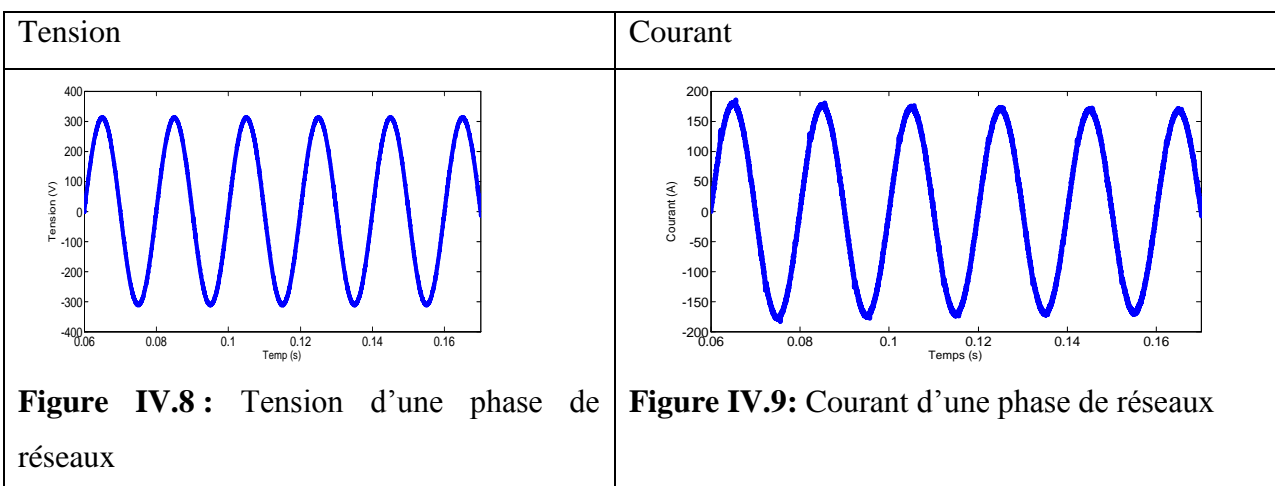
b) Discussions:

1. On voit clairement que le a courant dépasse largement les limites imposées par le standard IEEE std 519 ($THD_V < 5\%$ et $THD_I < 5\%$).
2. Un taux de distorsion harmonique qui dépasse 26,86%.
3. Une allure de courant qui n'est pas sinusoïdale.
4. Une allure de tension sinusoïdale.

IV.4.2 Fonctionnement avec FAP :

IV.4.2.1 Simulation avec la Méthode des puissances instantanées p-q :

a) Les courbes de la simulation :



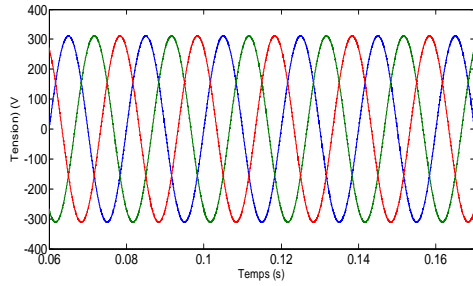


Figure IV.10 : Tension des trois phases de réseaux

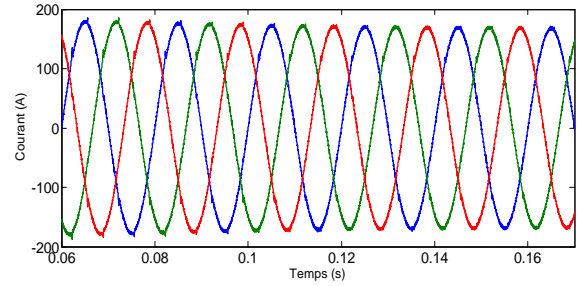


Figure IV.11 : Courants des trois phases de réseaux

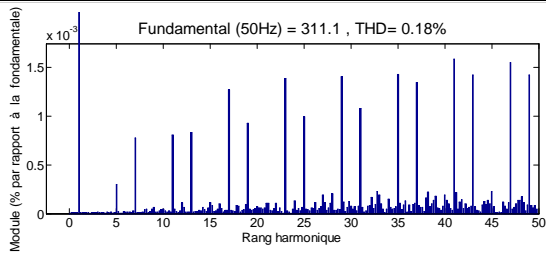


Figure IV.12 : Les Spectres harmoniques de tension du réseau

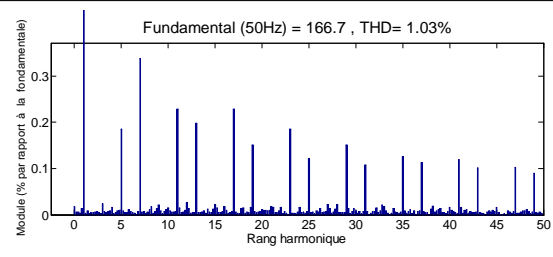


Figure IV.13 : Les Spectres harmoniques de Courant du réseau

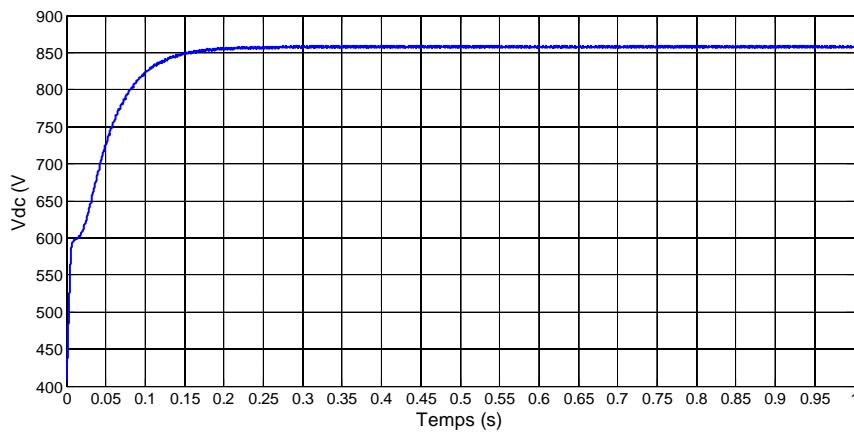
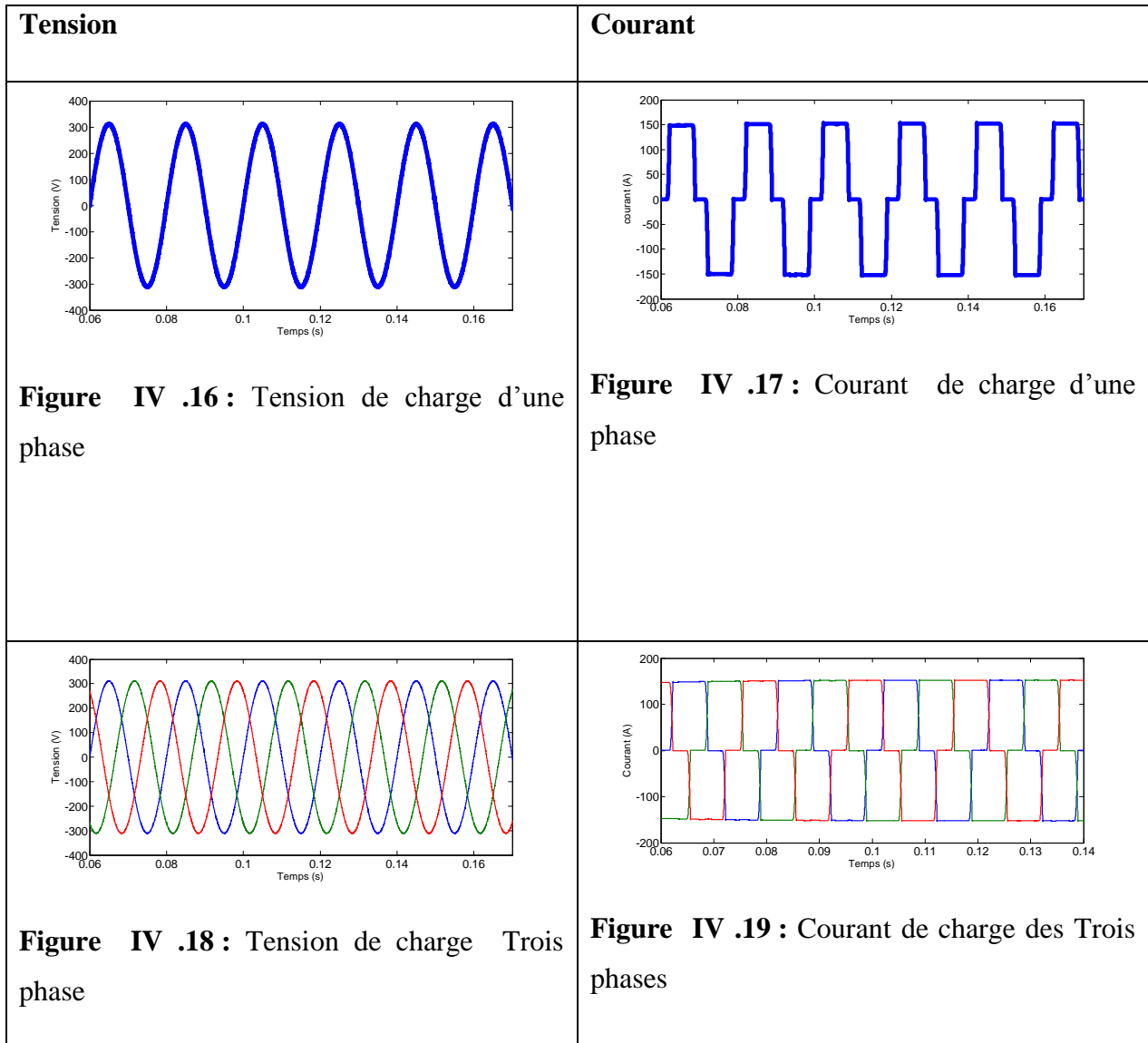
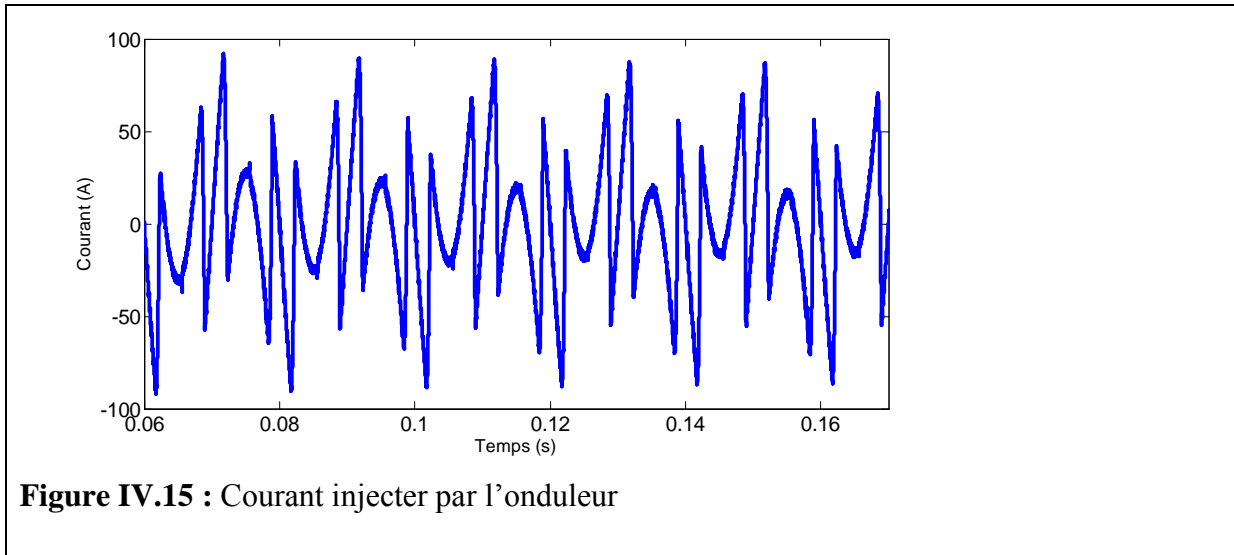


Figure IV.14 : Tension aux bornes du condensateur



b) Discussions:

1. Les rangs harmoniques (h5, h7) sont améliorés
2. Selon les figures 4.7et, figures 4.13, il ya une amélioration remarquable de THDi (de 26,87% à 0,98%).
3. Selon les figures 4.6 et figures 4.12, il ya une augmentation modeste de THDV (de 0,08% à 0,19%).
4. On voit clairement que le courant et la tension ne dépassent pas les limites imposées par le standard IEEE std 519 (THDV < 5% et THDi < 5%).
5. Un taux de distorsion harmonique qui dépasse 26,86% à été éliminé à l'environ de 2%.
6. Une allure de courant sinusoïdale.
7. Les harmoniques 5^{eme} et 7^{eme} ne sont pas complètement éliminées, mais elles sont fortement atténuées (figures 4.13).

IV.4.2.2 Simulation avec méthode p-q modélisée par un réseau de neurone :

Dans ce travail, la méthode p-q est modélisée par un réseau de neurone artificiel (ANN), comme la représente la figure 4.1. Ce (ANN) contient deux couches cachées,

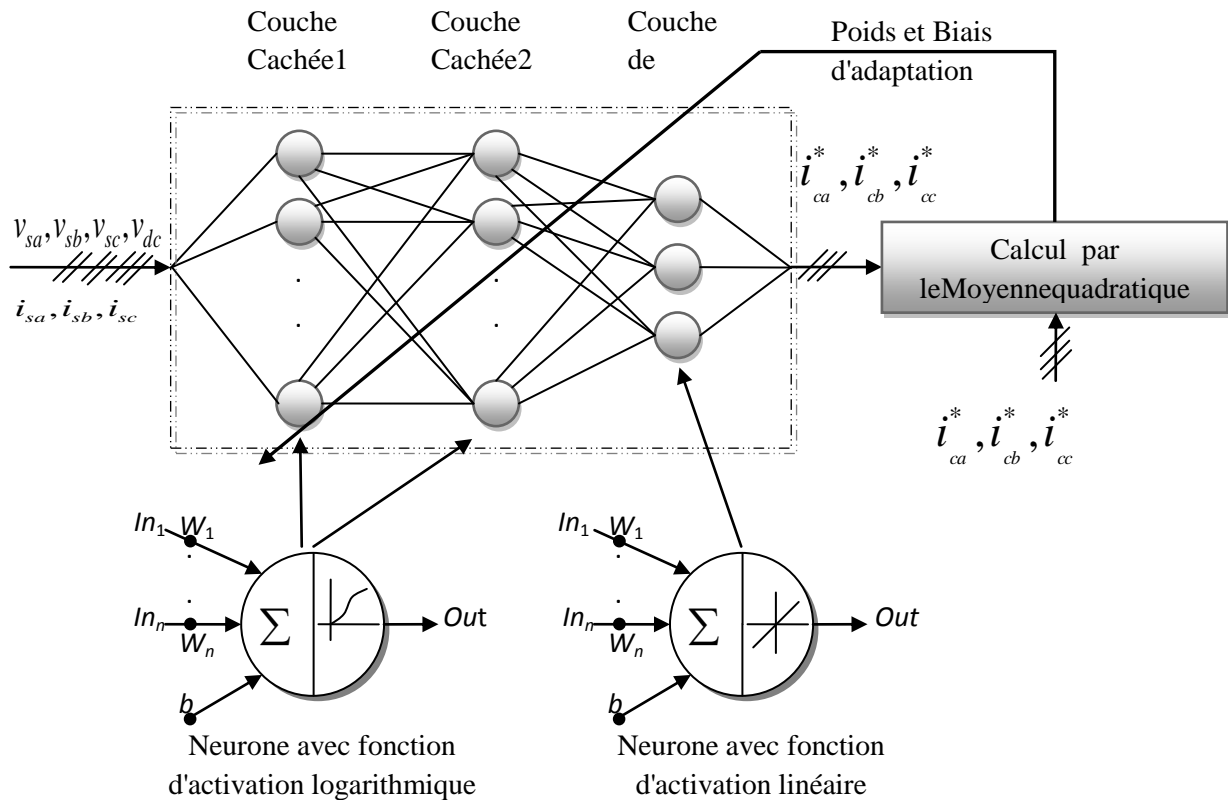
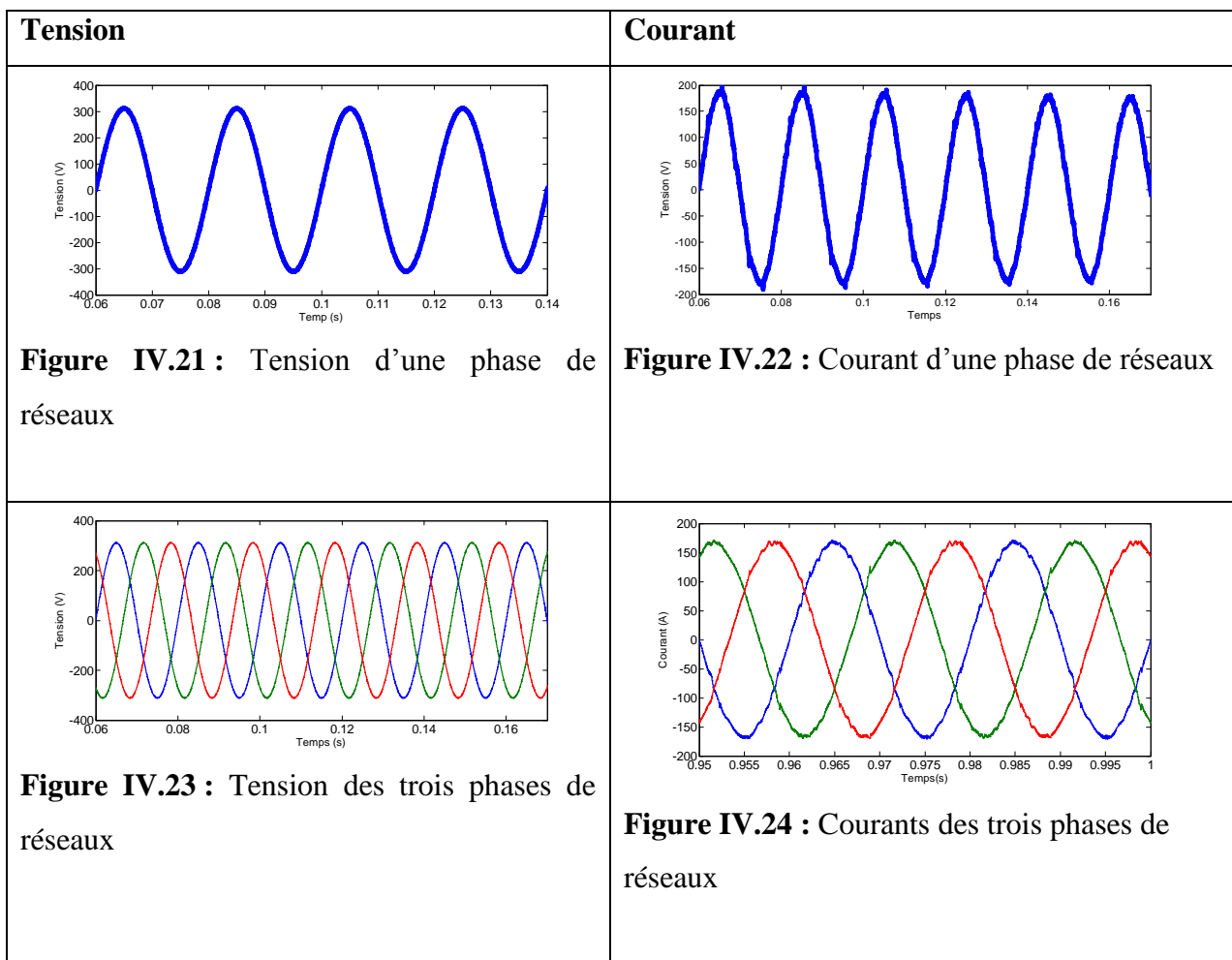


Figure IV.20 : Modélisation du (p-q théorie) par un réseau de neurone.

Chacune a 12 neurones, et une couche de sortie avec 3 neurones. La fonction d'activation est tangente hyperbolique pour les deux couches cachées neurones et fonction d'activation linéaire pure pour les neurones de couche de sortie.

Le ANN a sept entrées ($v_{sa}, v_{sb}, v_{sc}, v_{dc}; i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$) et trois sorties ($i_{ca}^*, i_{cb}^*, i_{cc}^*$), comme dans la méthode de p-q. Le modèle neuronique des couches cachées est représenté en figure 4.20, d'où chaque neurone comporte n entrées. Ce paramètre varie en fonction de la couche cachée choisie, où n est égal à 7. Si le neurone de la couche cachée appartient à 1 et n est égal à 12, le neurone de la couche cachée appartient à 2. Pour les neurones de la couche de sortie, n est égal à 12.

a) Les courbes de la simulation (ANN) :



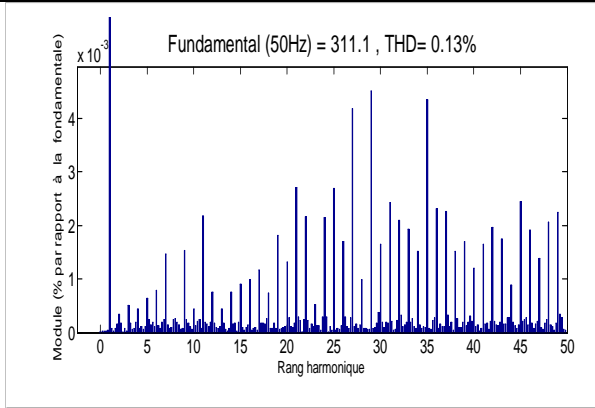


Figure IV.25 : Les Spectres harmoniques de tension du réseau

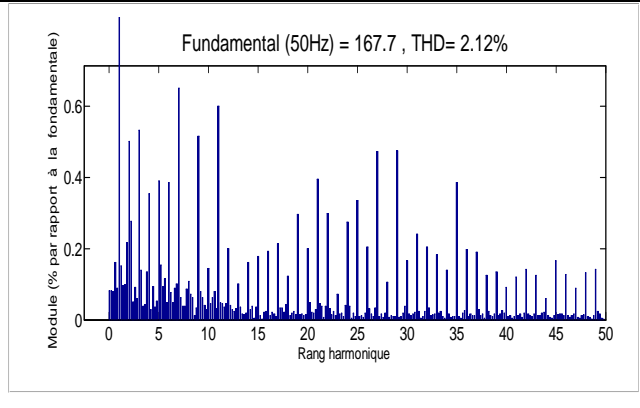


Figure IV.26 : Les Spectres harmoniques de Courant du réseau

Tension

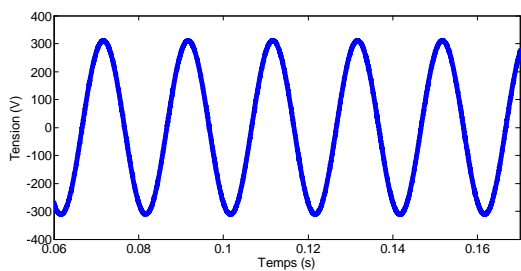


Figure IV.27 : Tension de charge d'une phase

Courant

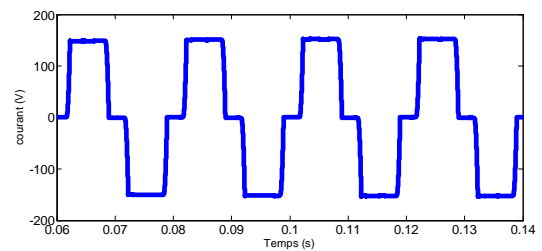


Figure IV.28 : Courant de charge d'une phase

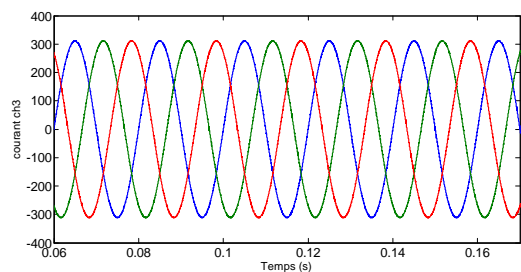


Figure IV.29 : Tension de charge Trois phase

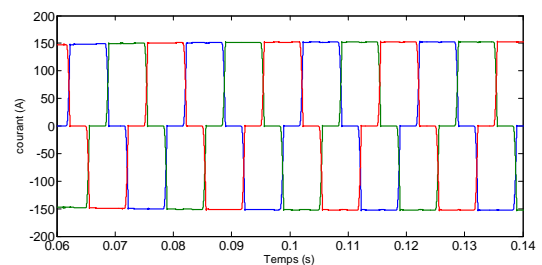
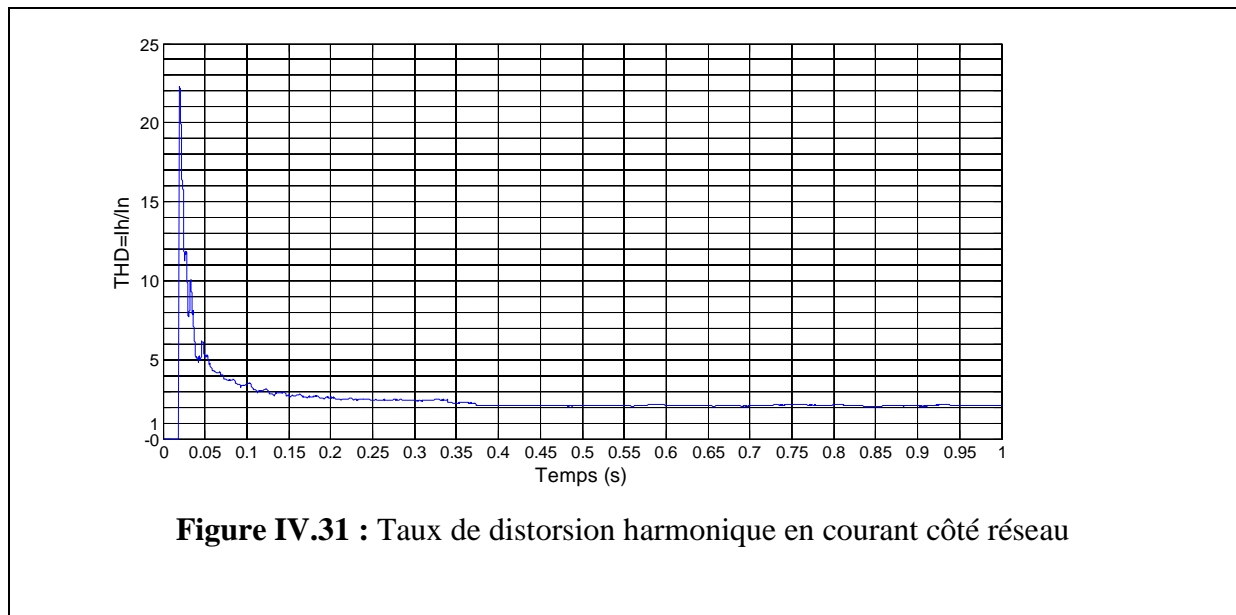


Figure IV.30 : Courant de charge des Trois phases



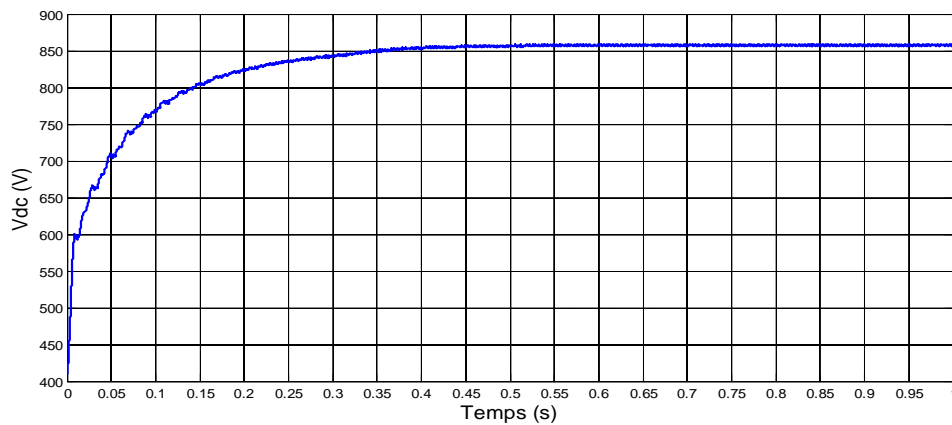


Figure IV .32 : Tension aux bornes du condensateur

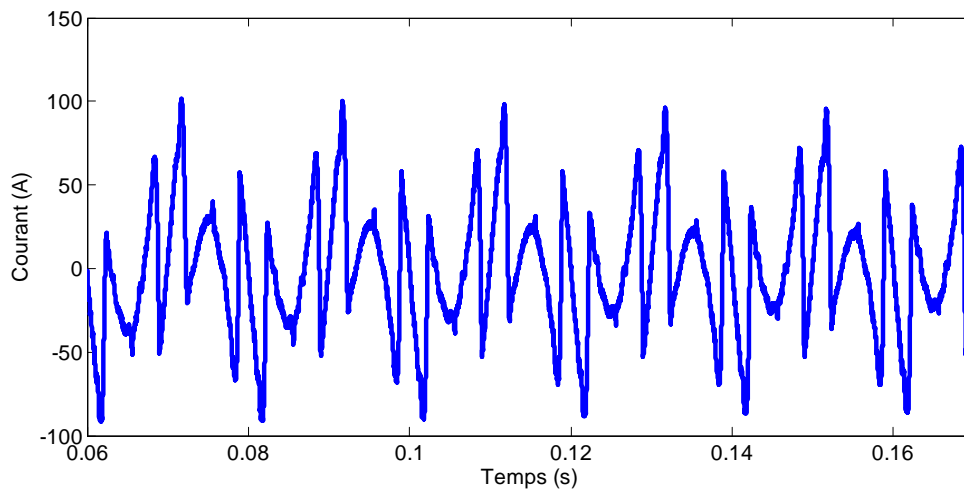


Figure IV .33 : Courant injecter par l'onduleur

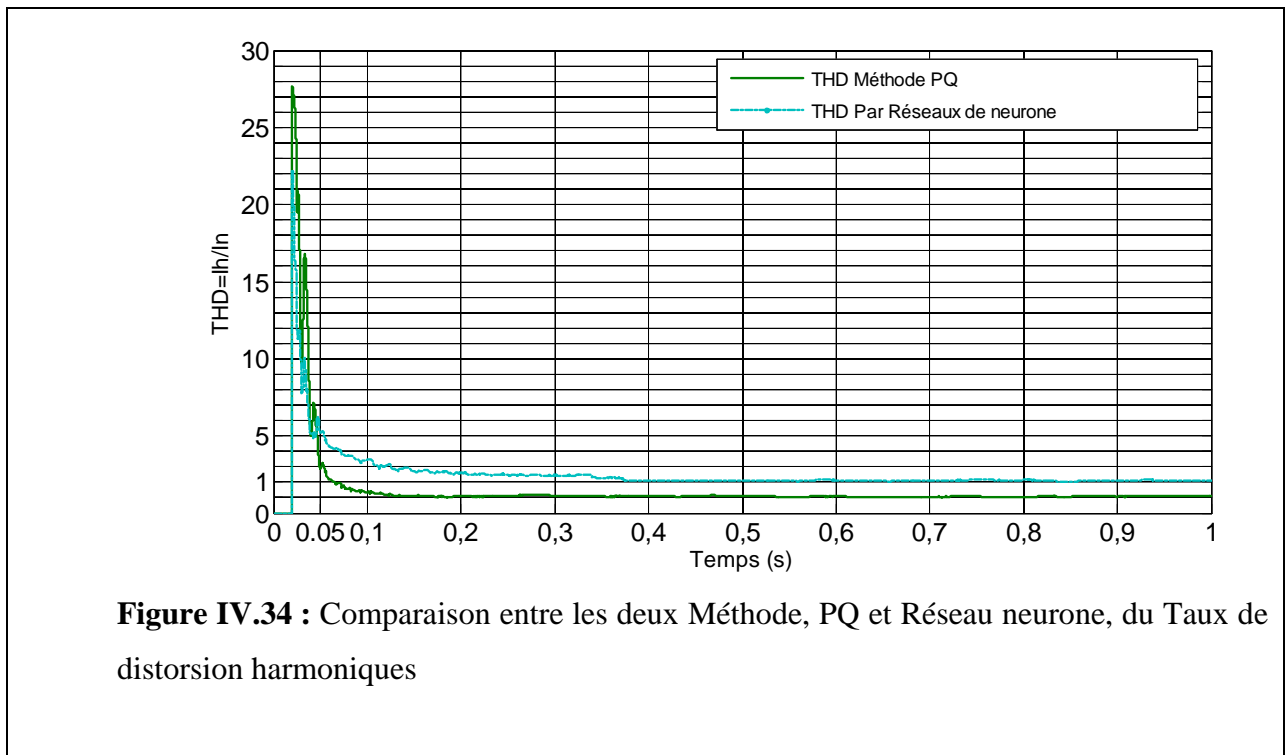
b) Discussions:

1. Les rangs harmoniques (h5, h7, h11, h13) sont améliorés mes a partir de rang h17 une modeste augmentation apparaitre mais en dessous de 5%.
2. Selon les figures 4.7 et, figures 4.26, il ya une amélioration remarquable de THDi (de 26,87% à 0,19%).
3. Selon les figures 4.6 et figures 4.25, il ya une augmentation modeste de THDV (de 0,08% à 0,14%).
4. On voit clairement que le courant et la tension ne dépassent pas les limites imposées par le standard IEEE std 519 ($THDV < 5\%$ et $THDi < 5\%$).

5. Une diminution remarquable de la chute de tension.
6. Un taux de distorsion harmonique qui dépasse 26,86% a été éliminé à l'environ de 3%.
7. Une allure de courant sinusoïdale.
8. Les harmoniques 5^{eme} et 7^{eme} ne sont pas complètement éliminées, mais elles sont fortement atténuées (les figures 4.25 et figures 4.26).

IV.4.2.3 Comparaison entre les deux Méthode, PQ et Réseau de neurone :

a. Les deux courbes rassemblées :



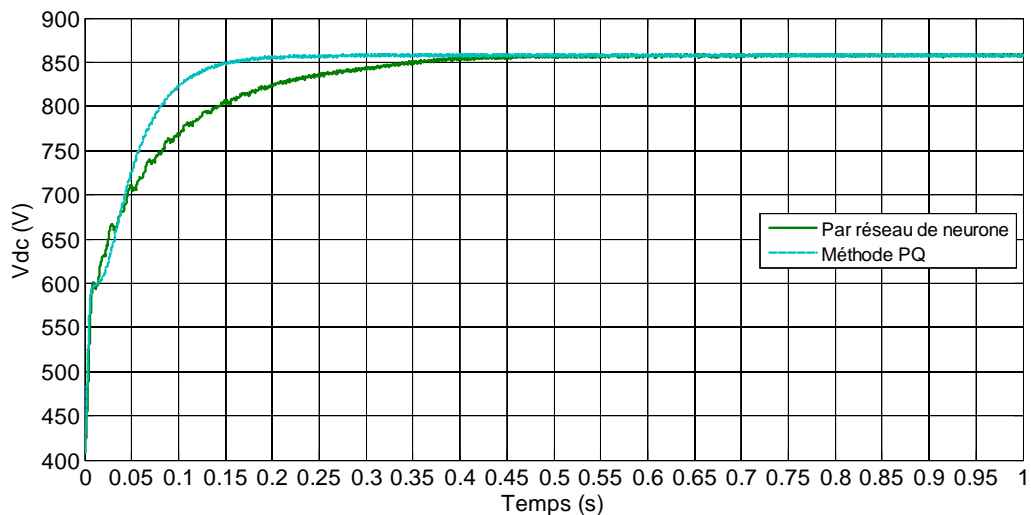


Figure IV.35 : Comparaison entre les deux Méthode, PQ et Réseau neurone, de la tension de condensateur de stockage

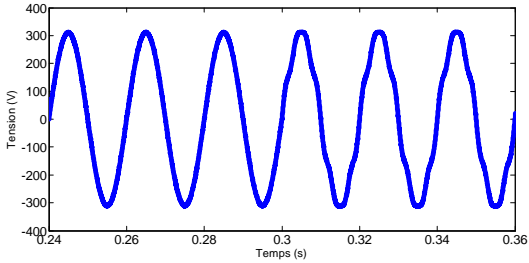
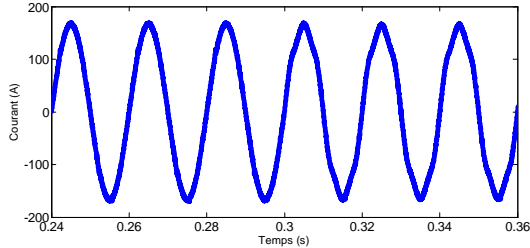
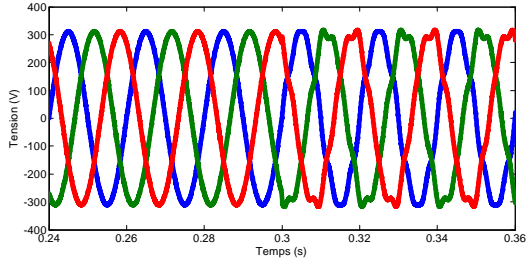
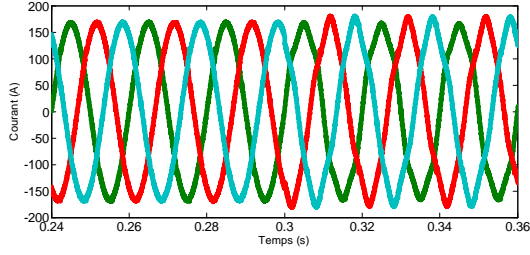
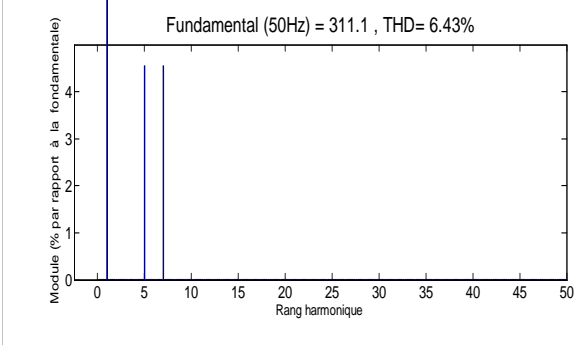
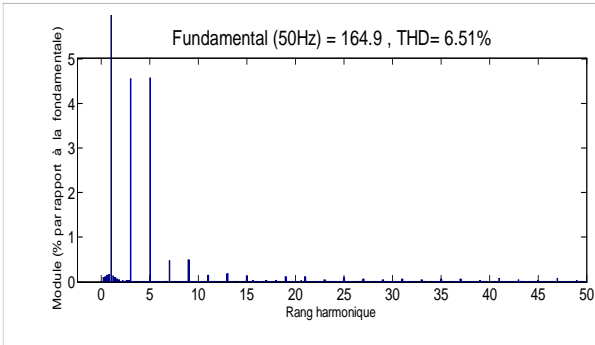
b. Discussions:

1. La méthode p-q ($h_5 + h_7$) a amélioré davantage le fonctionnement du FAP modélisée par un réseau de neurone artificiel.
2. Selon figures 4.12 (p-q) et 4.25 (ANN), il ya une augmentation modeste THD_V (de 1.14% (ANN) à 0.19% (p-q))
3. Selon figures 4.13 (p-q) et 4.24 (ANN), il y a une amélioration remarquable de THD_I (de 0.19% (p-q) à 0.98% (ANN)).
4. La 5^{ème} et la 7^{ème} harmoniques ne sont pas complètement éliminées mais elles sont fortement atténuées (Fig. 4.13 et 4.26).
5. Dans la figure 4.34 il est bien clair que la méthode p-q a une atténuation THD_i presque de 2% par rapport à la méthode p-q modélisée par réseau de neurone artificiel.
6. Dans la figure 4.35 la méthode p-q la précision et stabilité commence 0.15s par rapport à ANN qui commence 0.4s
7. dans la figure 4.33 Il est bien clair qu'il y a une rapidité de la méthode p-q par rapport à ANN.

IV.5 Simulation avec un intervalle de tension source perturbée :

IV.5.1 Fonctionnement du FAP avec méthode p-q :

a) Les courbes de la simulation :

<p>Tension</p>  <p>Figure IV.36 : Tension d'une phase de réseaux</p>	<p>Courant</p>  <p>Figure IV.37 : Courant d'une phase de réseaux</p>
 <p>Figure IV.38 : Tension des trois phases de réseaux</p>	 <p>Figure IV.39 : Courants des trois phases de réseaux</p>
 <p>Figure IV.40 : Les Spectres harmoniques de tension du réseau</p>	 <p>Figure IV.41 : Les Spectres harmoniques de Courant du réseau</p>

Tension

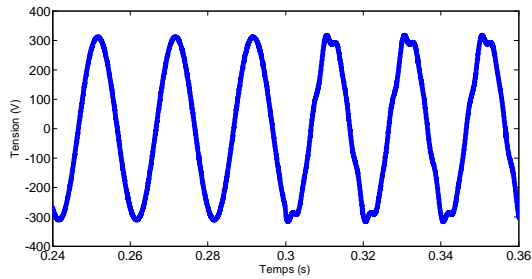


Figure IV.42 : Tension de charge d'une phase

Courant

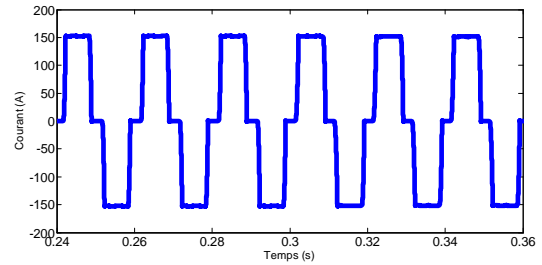


Figure IV.43 : Courant de charge d'une phase

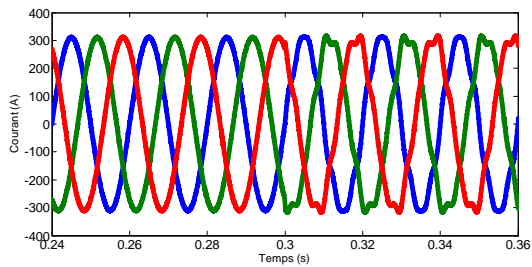


Figure IV.44 : Tension de charge Trois phase

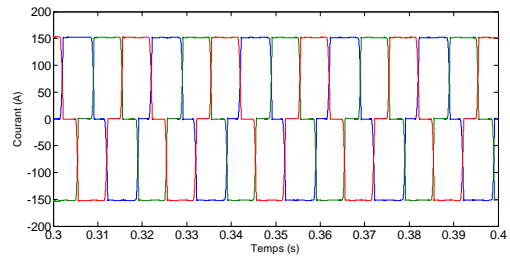


Figure IV.45 : Courant de charge des Trois phases

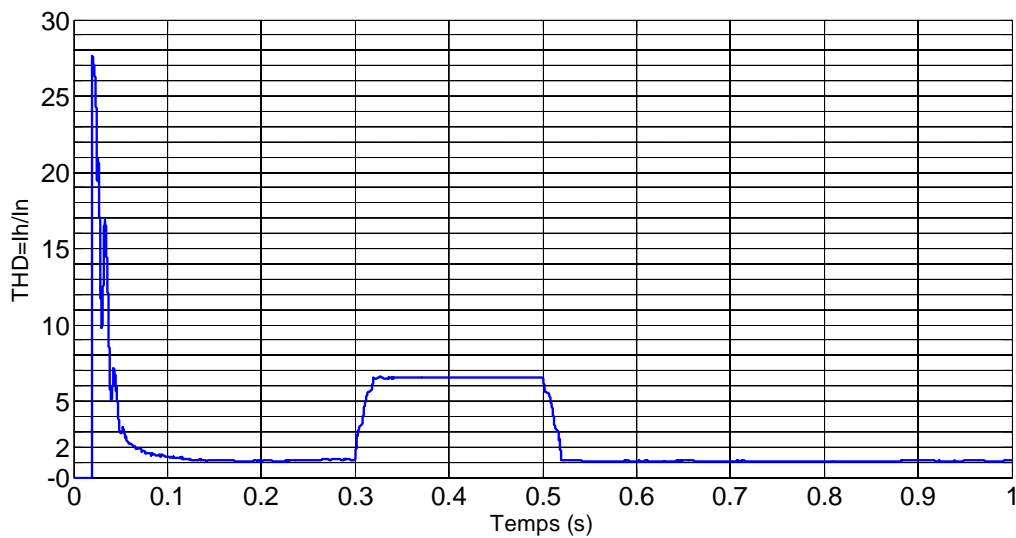


Figure IV .46 : Taux de distorsion harmonique en courant côté réseau

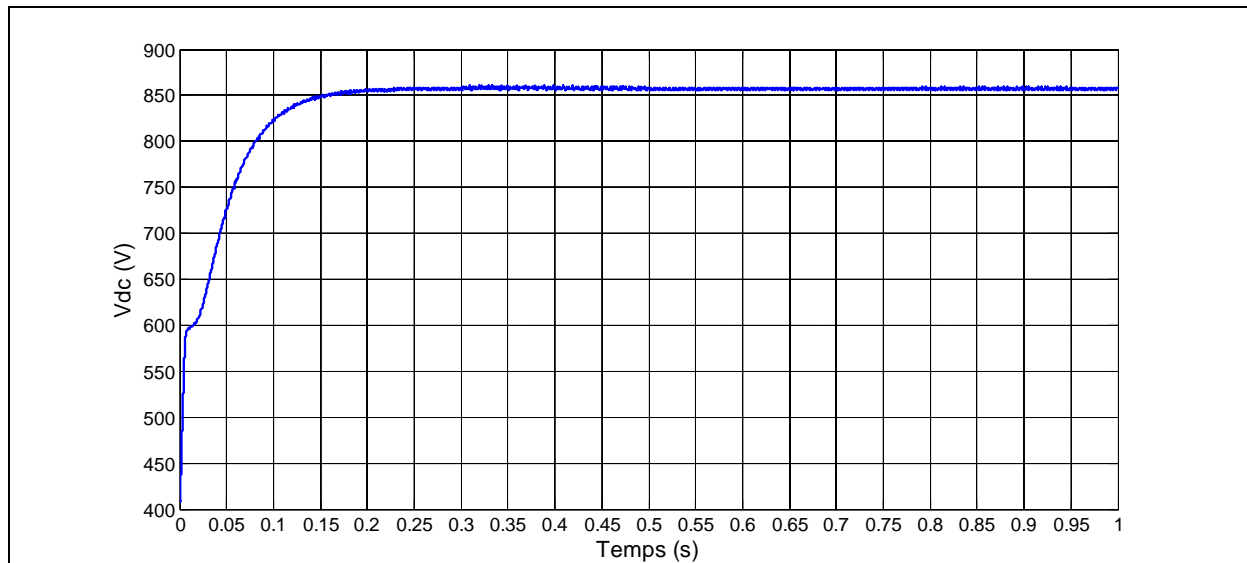


Figure IV .47 : Tension aux bornes du condensateur

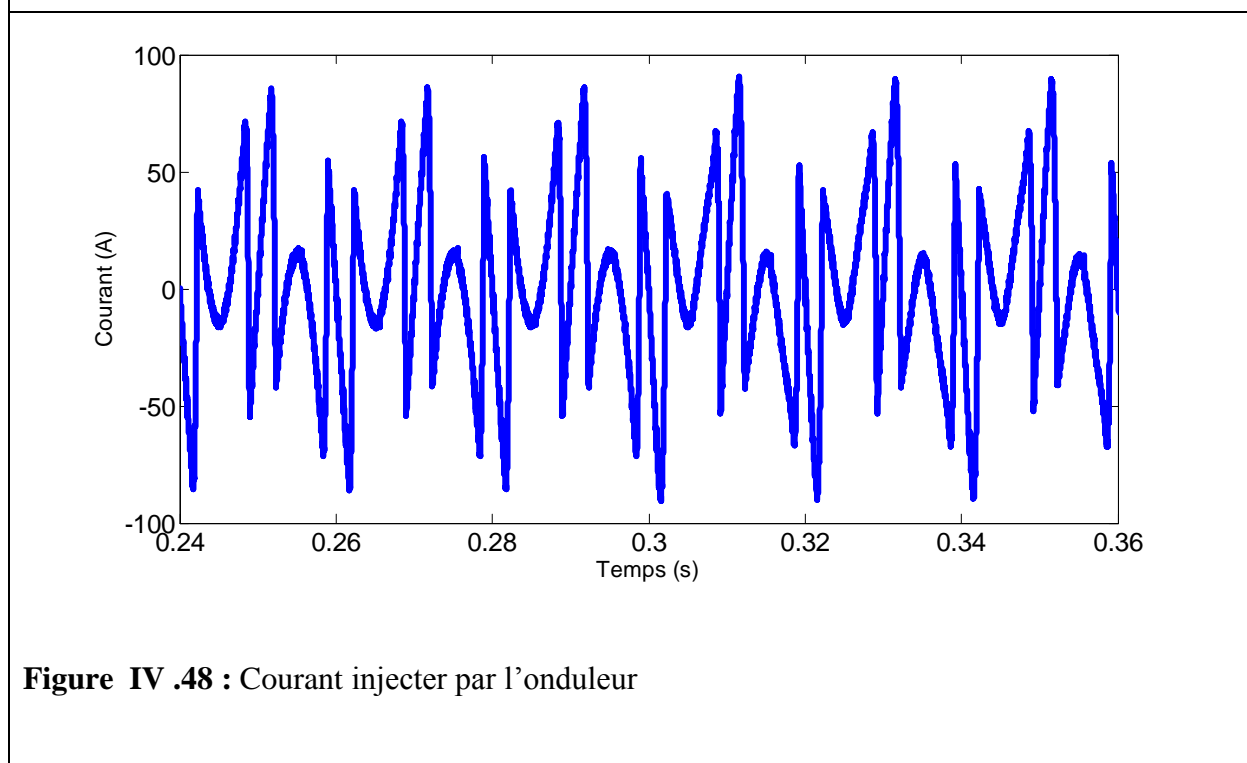
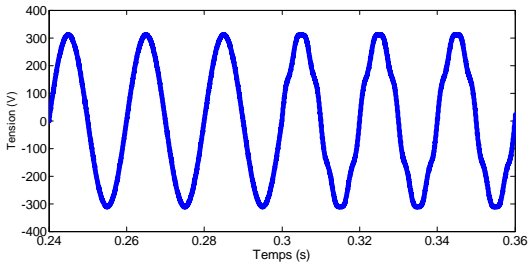
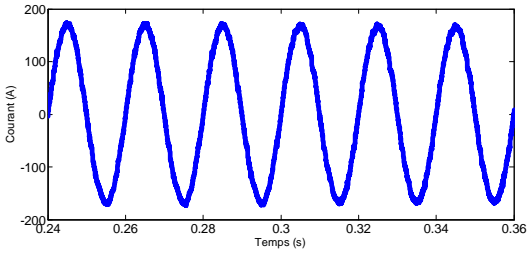


Figure IV .48 : Courant injecter par l'onduleur

b) Discussions:

1. Les rangs harmoniques (h3, h5) il y a un dépassement.
2. Selon les figures 4.45 et, figures 4.19, il ya une augmentation remarquable de THDi (de 0.98% à 6.51%).
3. Selon les figures 4.44 et figures 4.18, il ya une augmentation remarquable de THDV (de 0.19% à 6.43%).
4. On voit clairement que le courant et la tension dépassent les limites imposées par le standard IEEE std 519 (THDV < 5% et THDi < 5%).
5. Un taux de distorsion harmonique qui dépasse 26,86% à été éliminé à l'environ de 2% dans la phase normale par contre dans la phase transitoire de 0.3s à 0.5 une augmentation démesuré qui approche à 7%.
6. Une allure de courant et de tension se déforme au période perturbée.
7. Courant injecter reste d'allure stable même dans la période perturbée.

IV.5.2 Fonctionnement du FAP méthode p-q modélisée par un réseau de neurone :**a) Les courbes de la simulation (ANN) :**

Tension	Courant
 <p>Figure IV.49 : Tension d'une phase de réseaux</p>	 <p>Figure IV.50 : Courant d'une phase de réseaux</p>

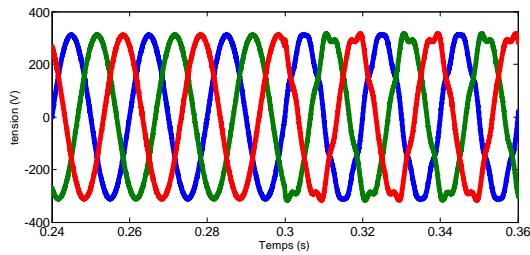


Figure IV.51 : Tension des trois phases de réseaux

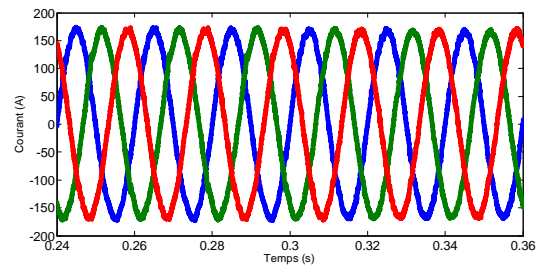


Figure IV.52 : Courants des trois phases de réseaux

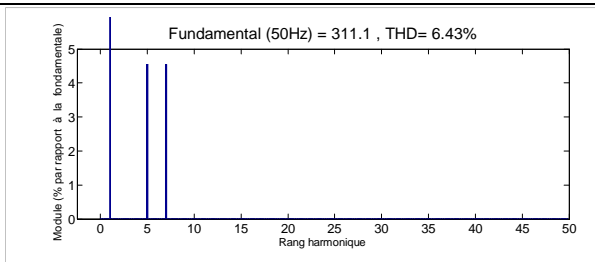


Figure IV.53 : Les Spectres harmoniques de tension du réseau

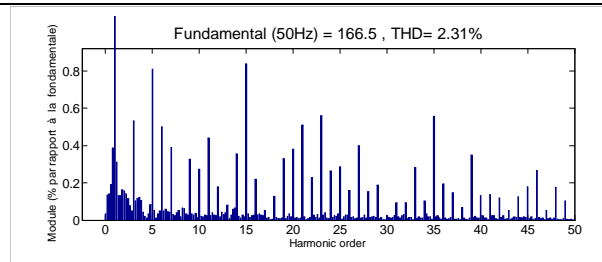


Figure IV.54 : Les Spectres harmoniques de Courant du réseau

Tension

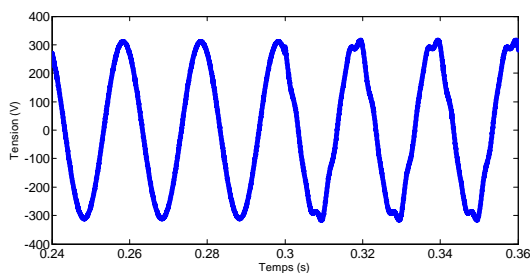


Figure IV .55 : Tension de charge d'une phase

Courant

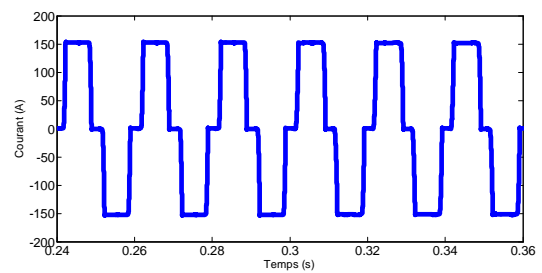


Figure IV .56 : Courant de charge d'une phase

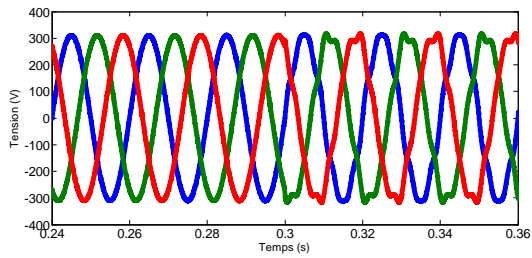


Figure IV.57 : Tension de charge Trois phase

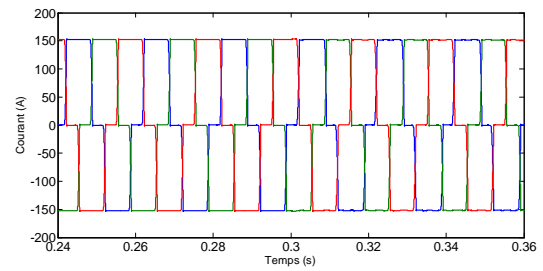


Figure IV .58 : Courant de charge des Trois phases

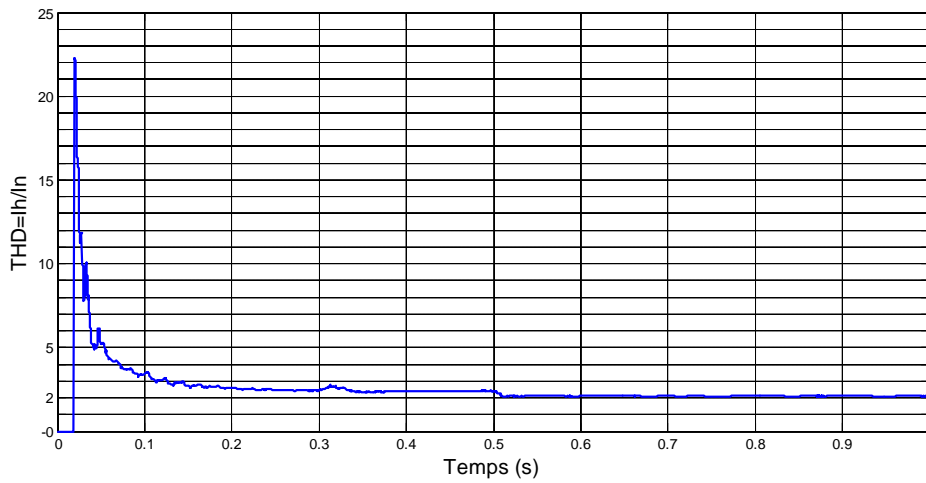


Figure IV.59 : Taux de distorsion harmonique en courant côté réseau

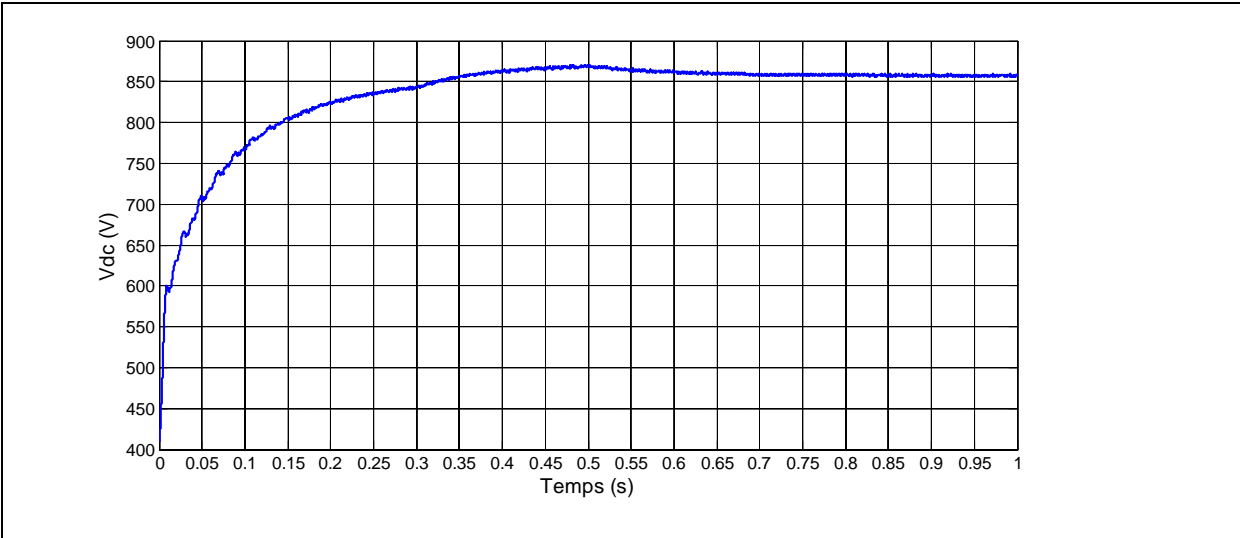


Figure IV.60 : Tension aux bornes du condensateur

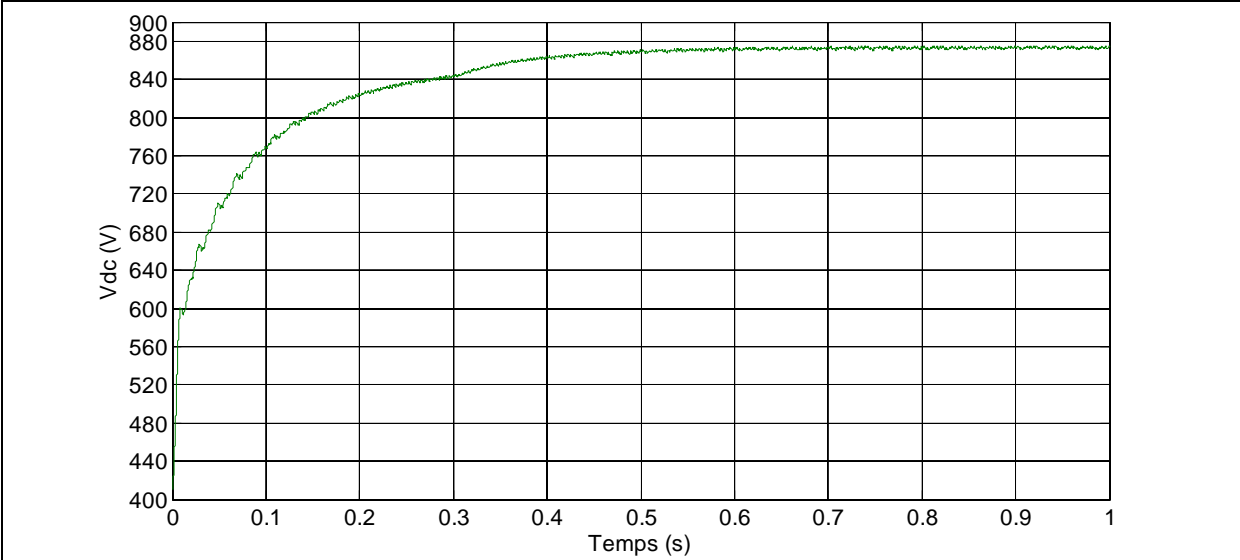
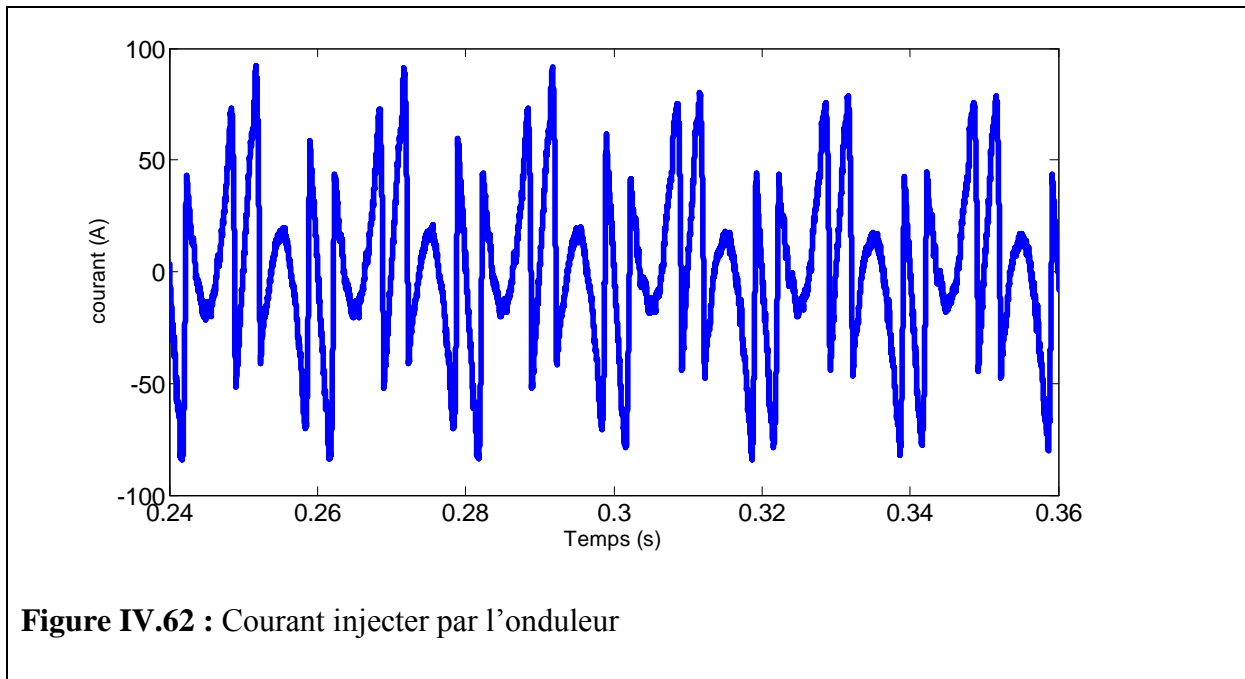


Figure IV.61 : Tension aux bornes du condensateur 0.3s 1s



b) Discussions:

1. Les rangs harmoniques sont améliorés.
2. Selon les figures 4.26 et, figures 4.54, il ya une augmentation modeste de THDi (de 0.19% à 2,31%).
3. Selon les figures 4.25 et figures 4.53, il ya une augmentation importante de THDV (de 0,14% à 6.36%).
4. On voit clairement que le courant ne dépasse pas les limites imposées par le standard IEEE std 519 ($THDV < 5\%$ et $THDi < 5\%$) mais la tension a un dépassement de plus de 1.36%.
5. Un taux de distorsion harmonique qui dépasse 26,86% a été éliminé à l'environ de 2.31%.
6. Une allure de courant de source sinusoïdale et une petite déformation de l'allure de la tension source.
7. Les harmoniques 5^{eme} et 7^{eme} ne sont pas complètement éliminées, mais elles sont fortement atténuées (les figures 4.54).

IV.6 Comparaison entre les deux Méthode, PQ et Réseau de neurone :

a. Les deux courbes rassemblées :

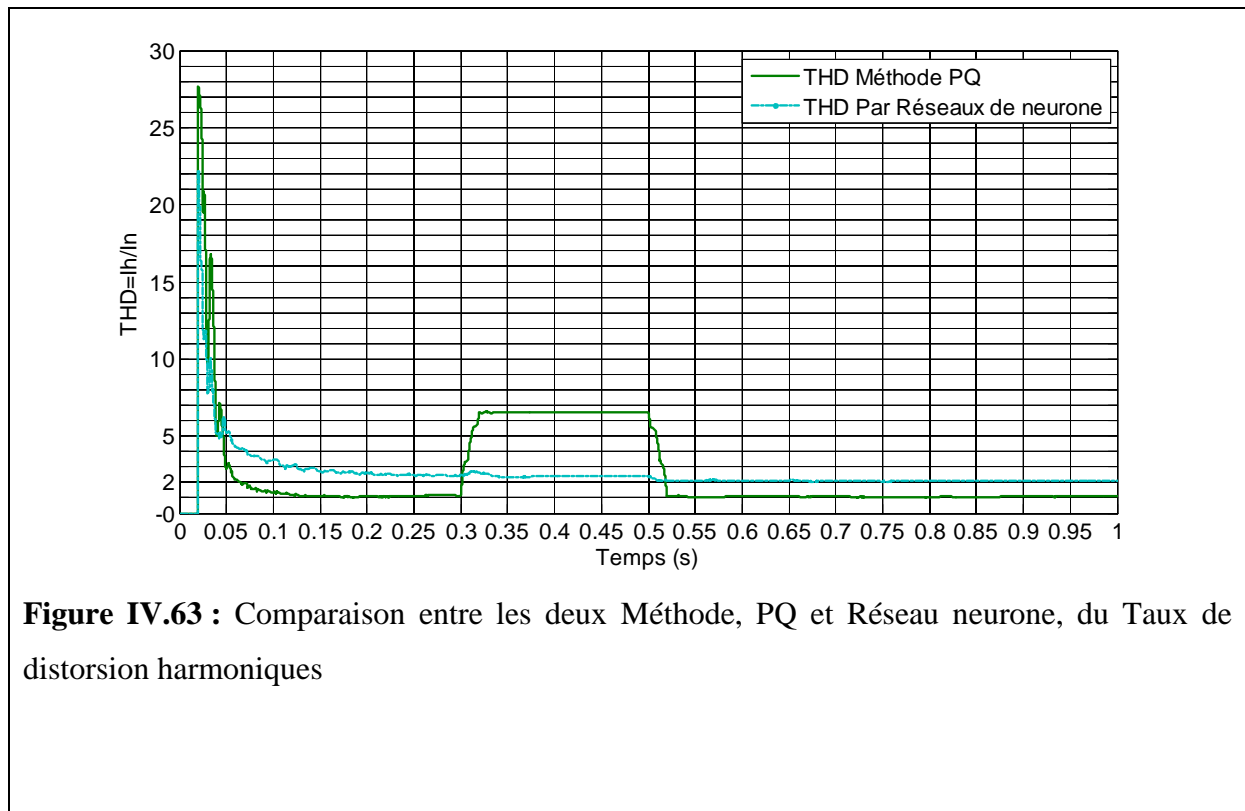


Figure IV.63 : Comparaison entre les deux Méthode, PQ et Réseau neurone, du Taux de distorsion harmoniques

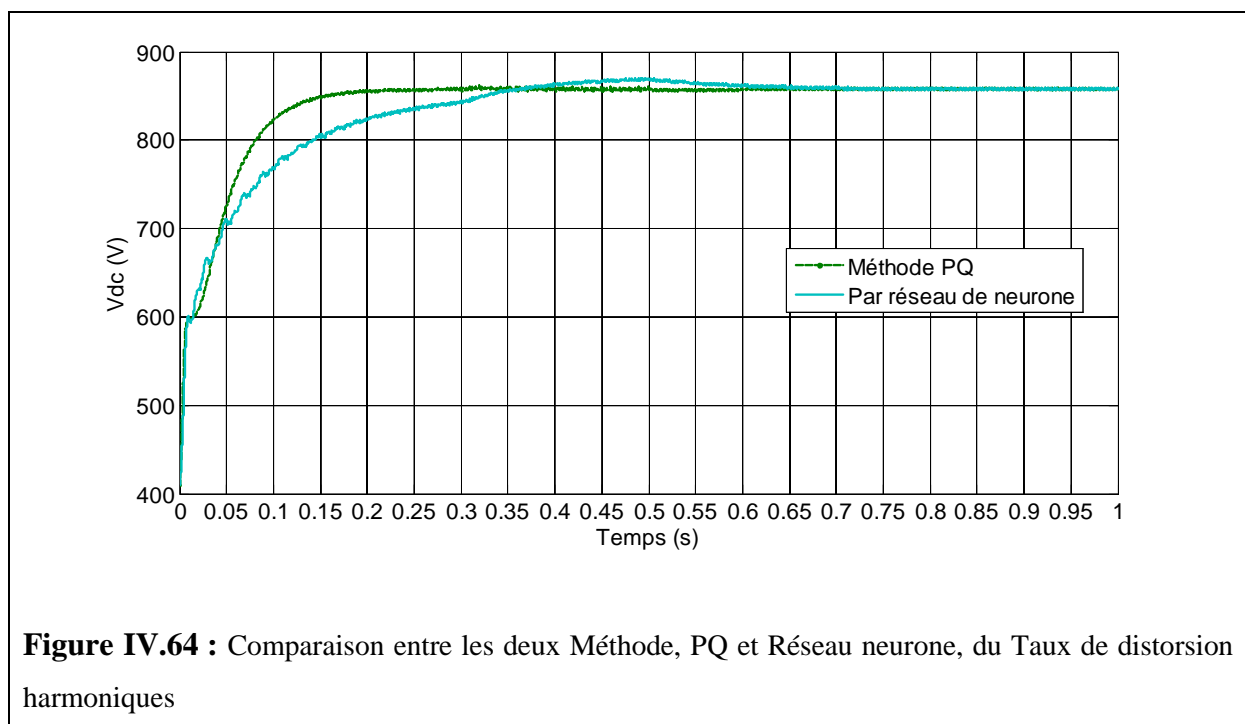


Figure IV.64 : Comparaison entre les deux Méthode, PQ et Réseau neurone, du Taux de distorsion harmoniques

b) Discussions:

1. La méthode p-q modélisée par un réseau de neurone artificiel a amélioré ($h_5 + h_7$) mieux que la méthode p-q.
2. Selon figures 4.40 (p-q) et 4.53 (ANN), il ya une égalité de THD_V 6.43%.
3. Selon figures 4.41 (p-q) et 4.54 (ANN), il y a une amélioration remarquable de la THD_i de la méthode p-q modélisée par réseau de neurone artificiel (de 6.51% (p-q) à 2.31% (ANN)).
4. La 5^{ieme} et la 7^{ieme} harmoniques ne sont pas complètement éliminées mais elles sont fortement atténuées (Fig. 4.54).
5. Dans la figure 4.63 il est bien clair que la méthode p-q a une atténuation THD presque de 2% par rapport à la modélisation par réseau de neurone artificiel mais la période transitoire a une augmentation remarquable par contre ANN n'a pas changer.
6. Dans la figure 4.64 la méthode p-q a une précision qui commence 0.15s par rapport a ANN qui commence 0.4s.
7. Dans la figure 4.64 la stabilité de la méthode p-q commence 0.15s par rapport à ANN qui commence 0.6s
8. Dans la figure 54.64 il est bien clair que la méthode p-q a une rapidité par rapport à ANN.

IV. Conclusion :

Dans ce chapitre, une étude du modèle de l'onduleur de tension et du filtre actif Parallèle est testée en simulation. Deux approches sont adoptées, la première est basée sur l'utilisation de la méthode des puissances instantanées p-q, qui a l'avantage d'être simple et facile à mettre en œuvre, la deuxième présente la méthode p-q modélisée par un réseau de neurone artificiel (ANN) avec un système complet incluant toutes les fonctionnalités du FAP pour la compensation des harmoniques.

Ces deux approches étudiées au début du chapitre servent de comparatifs l'une avec l'autre. Cependant, la structure du FAP utilisant la technique neuronale est plus efficace selon les résultats de simulation et d'amélioration du THD obtenus.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

A la recherche de la configuration la plus performante de la qualité d'énergie, plusieurs recherches ont été présentées pour trouver les bonnes solutions de dépollution des courants et des tensions dans les réseaux électriques. Parmi celles-ci on trouve le filtre actif qui est devenu une nécessité indispensable afin de pallier aux problèmes de la qualité d'énergie.

Ce travail a été consacré à la recherche d'une bonne méthode d'identification des courants de référence et de les injecter dans le réseau pour éliminer les courants perturbateurs pour une amélioration de fonctionnement du filtre actif parallèle.

Avant d'aborder notre étude, nous avons structuré notre travail en quatre parties.

Nous avons montré l'influence des harmoniques sur le réseau électrique, dans la première partie, puis nous avons présenté les solutions de dépollution classiques et modernes dans la seconde partie et l'étude détaillée sur des réseaux de neurones a fait l'objet de la troisième partie.

Afin de rendre notre système plus autonome et plus pratique, nous avons réalisé la simulation de l'application du filtre actif parallèle sous Matlab simulink

Nous avons procédé à la comparaison des deux méthodes p-q et la méthode p-q modélisée (ANN) en utilisant pour cela un réseau avec un signal propre et un réseau avec un intervalle pollué. Ces deux méthodes ont montré une qualité excellente pour l'élimination des harmoniques.

Dans notre travail, nous avons induit un intervalle pollué dans le réseau source, les résultats obtenus ont montré la fiabilité de la méthode p-q modélisée par le réseau de neurone artificiel (ANN) parce qu'elle a gardé la même graduation de niveau de départ de THDi dans l'intervalle pollué avec une valeur légèrement élevée par rapport aux résultats de la simulation avec réseau sans régime transitoire par contre la méthode p-q n'a pas gardé la même graduation de niveau de départ de THDi dans l'intervalle pollué, elle a donné des valeurs élevées.

En fin, nous annonçons que nous avons abouti aux objectifs déjà fixés au départ de notre travail et que nous sommes satisfaits de résultats de simulation obtenus.

Il reste à faire des recherches dans l'avenir pour trouver un système travaillant avec les deux méthodes (p-q et p-q modélisée) et l'injecter dans un réseau quelconque pour éliminer les courants perturbateurs.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

References Bibliographiques:

- [1] **Phillip A. Laplante**, « Comprehensive dictionary of electrical engineering », 2nd ed, Published in 2005 by CRC Press Taylor & Francis Group.
- [2] **D.OuldAbdeslam**, «Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques: application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension», Thèse de Université de Haute Alsace Mulhouse, 2005. Français.
- [3] **J. Arrillaga, N.R. Watson**, « Power system harmonics », Second Edition 2003, John Wiley & Sons, Ltd ISBN: 0-470-85129-5.
- [4] **D.Robinson**, « Harmonic management in MV distribution systems », A thesis submitted in fulfilment of PHD degree from university of Wollongong, School of electrical, computer and telecommunication engineering, 2003.
- [5] **A.OMARI, A. Essadat. Kennaz**, «Filtrage actif parallèle des harmoniques du courant générés par une charge polluante», Thèse de Université de Larbi Tebessi – Tébessa, 2016.
- [6] **Vanya .Ignatova**, « Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électriqueApplication aux creux de tension et à la pollution harmonique», Energie électrique. Thèse d'Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2006. Français.
- [7] **D.Nekkar**, «Contribution l'étude des Stratégies de Commande des Filtres Actifs Triphasés», Thèse d'Université Mohamed Chérif Messaadia de Souk-Ahras, 2014.
- [8] **G. Boulaares**, «Méthodes d'analyse des perturbations électriques dans la qualité de l'énergie électrique en utilisant des nouvelles techniques pour l'application aux creux de tension», Thèse d'Université de Batna, 30 juin 2012.
- [9] **M.Zellouma**, «Étude et réalisation d'un filtre actif parallèle de puissance commandé par DSPACE1104», Thèse de Université de Badji Mokhtar- Annaba, 2019.
- [10] **I.Ghadbane**, «Commande d'un Filtre Actif Triphasé Parallèle Par Différents Régulateurs», Thèse d'Université de Mohamed Kheider – Biskra, 2011.
- [11] **Mme. A. Lahmar**, «Filtrage et qualité d'énergie», Thèse d'Université de Badji Mokhtar- Annaba, 2017.
- [12] **Kaazzaoui.A**, «Amélioration Des Performances D'un Filtre Actif Parallèle : Application Des Réseaux De Neurone Adaptatifs», Thèse d'Université Larbi Ben M'hidi De Oum El Bouaghi, 09 juin 2015.
- [13] **Kouara.H**, «Application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un réseau basse tension», Thèse d'Université de Batna, 8 février 2006.

- [14] **Ion ETXEBERRIA-OTADUI**, «Sur Les Systèmes de L'électronique de Puissance Dédies A La Distribution Electrique – Application A La Qualité de L'énergie», Thèse De Institut National Polytechnique De Grenoble, 26 septembre 2003, Mondragon-Espagne.
- [15] **R. Haimour**, «Contrôle des Puissances Réactives et des Tensions par les Dispositifs FACTS dans un Réseau Electrique», Thèse d'Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technologique d'Oran, 2009.
- [16] **M.A.E. Alali**, « Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension », Thèse de l'université Louis Pasteur, Strasbourg I, 12 Septembre 2002.
- [17] **IEEE Std 519-1992**, « IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems »; 12 April 1993.
- [18] **R. Cao, J. Zhao, W. Shi, P. Jiang, G. Tang**, « Series power quality compensator for voltage sags, swells, harmonics and unbalance », IEEE/PES Trans. and Distr. Conférence and Exposition, Vol. 1, 28 Oct.-2 Nov. 2001.
- [19] **M. J. Newman, D.G. Holmes, J.G. Nielsen, F. Blaabjerg**, « A Dynamic voltage restorer (DVR) with selective harmonic compensation at medium voltage level », IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 41, No. 6, Nov./Dec. 2005, Page(s):1744 - 1753.
- [20] **A.Chandra, B. Singh, B.N. Singh, K. Al-Haddad**, « An improved control algorithm of shunt active filter for voltage regulation, harmonic elimination, power-factor correction, and balancing of nonlinear loads », IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 15, No. 3, May 2000.
- [21] **N.H. Mendalek**, « Qualité de l'onde électrique et moyens de mitigation », thèse de doctorat de l'université du Québec, 14 Janvier 2003.
- [22] **D. Ould Abdeslam**, « Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension » Thèse de l'Université de Haute-Alsace U.F.R., 08 décembre 2005.
- [23] **The power electronics handbook** / edited by Timothy L. Skvarenina ; 2002 by CRC Press LLC.
- [24] **C. Fitzer, M.Barnes, P. Green**, « Voltage sag detection technique for a dynamic voltage restorer », IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 40, No. 1, Jan./Feb. 2004.
- [25] **C. Benachaiba, B. Mazari, S. Dib**, « Genetic Algorithm Method of Minimizing Harmonic Distortion in PWM Converters », Annales de l'Université de Bechar, N°1, 2005.

- [26] **C. Benachaiba, B. Mazari, S. Dib**, « Genetic Algorithm Method of Minimizing Harmonic Distortion in PWM Converters Part II », Communication Science and Technologie (COST), N°4, 2006.
- [27] **L. Gyugyi, E.C. Strycula**, « Active AC power filters », in Proc. IEEE US, 529- 535 (1976).
- [28] **T.M. Gruz**, « A survey of neutral currents in three-phase computer power systems », IEEE Trans. on Ind Applications, 26(4), 719-725 (1990).
- [29] **A. Esfandiari, M. Parniani, H. Mokhtari**, « A New control strategy of shunt active filters for power quality improvement of highly and randomly varying loads », IEEE Ind. Electronics, Vol. 2,4-7 May 2004.
- [30] **H. Akagi**, « Active harmonic filters », IEEE Proc., Vol 93, No 12, December 2005.
- [31] **Miao-Xin Wang**, « Filtrage actif de puissance : Etudes et réalisation d'un filtre actif à commande numérique en temps réel » Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 18 Décembre 1992.
- [32] **H. Akagi, Y. Tsukamoto, A. Nabae**, « Analysis and design of an active power filter using quad-series voltage source PWM converters », IEEE Trans. on Industry applications, vol. 26, No. 1, pp. 93-98, 1990.
- [33] **J. Xu**, « Filtrage actif parallèle des harmoniques des réseaux de distribution d'électricité », Thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy 20 Janvier 1994.
- [34] **M.A.E. Alali, S. Saadate, Y.A. Chapuis, F. Braun**, « Energetic study of a shunt active conditioner compensating current harmonics, power factor and unbalanced », EPE-PEMC 2000, Konic, Slovak Republic, vol. 5, pp. 211-216, September 2000.
- [35] **H. Akagi**, « New trends in active filters for power conditioning », IEEE Trans. on Industry applications, vol. 32, No. 6, pp. 1312-1322, November/December 1996.
- [36] **H. Akagi**, « Control strategy and site selection of a shunt active filter for damping of harmonic propagation in power distribution systems », IEEE Trans. on power delivery, vol. 12, No. 1, pp. 354-363, January 1997.
- [37] **L. Benchaita**, « Etude par simulation numérique et expérimentale d'un filtre actif parallèle à structure courant avec une nouvelle méthode de contrôle-commande », thèse de doctorat de l'université H. Poincaré. Nancy, 1998.
- [38] **M.A. Gray**, « A Comparative Analysis of Proportional-Integral Compensated and Sliding Mode Compensated Shunt Active Power Filters », thesis of Mississippi State University, USA, December 2004.

- [39] **S. Bernard, G. Trochain**, « Deuxième génération de compensateur actif d'harmoniques forte capacité basé sur le mode d'injection du courant », MGE UPS SYSTEMS, doc N°, MGE0121UKI – Juin 98.
- [40] **Jiyunsun**. “STUDY OF POWER QUALITY AT 69/13.8 KV DISTRIBUTION SYSTEM” DISSERTATION for the Degree of Doctor of Philosophy (Electrical Engineering), January 2003, POLYTECHNIC UNIVERSITY, Ann Arbor, Michigan 48106-1346.
- [41] **S. Beaulieu** “ ETUDE ET MISE AU POINT D'UN FILTRE ACTIF D'HARMONIQUES EN VUE D'AMÉLIORER LA QUALITÉ DE L'ALIMENTATION ÉLECTRIQUE ” Thèse comme exigence partielle à l'obtention de la maîtrise en Technologie des systèmes, Soutenue Mai 2007, UNIVERSITE DU QUEBEC A Chicoutimi.
- [42] **C. E. Lin, C. L. Chen, and C. L. Huang**, « Calculating approach, implementation for active filters in unbalanced three-phase system using synchronous detection method », in Proc. IEEE IECON.92, 1992, pp. 374.380.
- [43] **A. Campos, G. Joos, P. Ziogas, J. Lindsay**, « Analysis and design of a series voltage unbalance compensator based on a three-phase VSI operating with unbalanced switching function », IEEE Trans. on power electronics, vol.9, N°3, P. 269-274, May 1994.
- [44] **S. Bhattacharya, A. Veltman, D. M. Divan, and R. D. Lorenz**, « Flux based active filter controller », in Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting, 1995, pp. 2483.2491
- [45] **H. Akagi, A. Nabae, S. Atoh**, « Control strategy of active power filters using multiple voltage-source PWM converters », IEEE Trans. on Industry applications, vol. IA-22, pp. 460-465, 1986.
- [46] **M. Bojrup**, « Advanced Control of Active Filters in a Battery Charger «Application», thesis of Lund Institute of Technology, Sweden, 1999.
- [47] **S. Bala**, « One cycle control of three-phase VAR compensators and active power filters », thesis of Indian Institute of Technology, Bombay, April 2003.
- [48] **R.A. El Shatshat**, « A Novel Modular Approach to Active Power-Line Harmonic Filtering in Distribution Systems », thesis of the University of Waterloo, Ontario, Canada, 2000.
- [49] **B. Singh, V. Verma**, « A new control scheme of series active filter for varying rectifier loads », IEEE Power Electronics and Drive Systems, PEDS 2003, The Fifth International Conference, Vol. 1, 17-20 Nov. 2003, Page(s):554 - 559.
- [50] **G. Alarcon, C. Nunez, V. Cardenas, M. Oliver**, « Design and implementation of a 3-phase series active filter to compensate voltage disturbances », IEEE Power Electronics Congress, CIEP 2000, 15-19 Oct. 2000, Page(s):93 - 98.

- [51] **Murat Kale, EnginOzdemir**, « An adaptive hysteresis band current controller for shunt active power filters », Elsevier, Electric Power Systems Research 73 (2005) 113–119.
- [52] **O. Abdelkhalek., C.Benachaiba, S.Dib**« Comparison of PQ Theory and Synchronous Detection Identification Methods for Current Harmonics under Non-Sinusoidal Condition for Shunt Active Compensator», 2^{ème} Conference International sur le Genie Electrique Béchar – Novembre 2006.
- [53] **R. Strzelecki, G. Benysek**, «Power Electronics in Smart Electrical Energy Networks» (Springer, 2008) , Verlag London.
- [54] **A.M.Munoz**, «Power Quality Mitigation Technologies in a Distributed Environment» (Springer, 2007), Verlag London.
- [55] **M.F.B.M.YUSOF**, «VOLTAGE SAGS RIDE THROUGH MITIGATION TECHNIQUES»
Thèse de l'université Technologie Malaysia, 8 May 2009.
- [56] **B.B.Sahoo**, «Analysis of Distribution Systems with DSTATCOM», A project report submitted in partial fulfilment of the requirements for the award of the degree of Master of Engineering (Electrical – Power) Faculty of Electrical Engineering Thapar University, Patiala, JULY 2010.
- [57] **J.Sun**, «STUD Y OF POWER QUALITY AT 69/13.8 KV DISTRIBUTION SYSTEM »,
Thèse comme exigence partielle à l'obtention du Doctorat en génie électrique, Ph. D, Soutenue Janvier 2003, l'université polytechnique, Institute de Technologie Michigan.
- [58] **C.GOMBERT**, «Simulation temps-réel des dispositifs d'Electronique de Puissance dédiés aux Réseaux d'Energie Electrique», Thèse comme exigence partielle à l'obtention du Doctorat en génie électrique, Soutenue le 29 Septembre 2005, INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE, Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble.
- [59] **E.BABAEI, M.F.KANGARLU**, “Operation and control of dynamic voltage restorer using single-phasedirect converter”, Energy Conversion and Management journal, Elsevier, Volume 52, Issues 8–9 (August 2011), pp. 2965–2972.
- [60] **I.Y.CHUNG, D.J.WON, S.Y.PARK, S.-I.MOON, J.K.PARK**, “The DC link energy control method in dynamic voltage restorer system”, Electrical Power and Energy Systems Elsevier, Volume 25, Issue 7, (September 2003), pp. 525-531.
- [61] **M.R. BANAEI, S.H. HOSSEINI, S. KHAMOHAMADI, G.B. GHAREHPETIAN**
“Verification of a new energy control strategy for dynamic voltage restorer by simulation»,

Simulation Modelling Practice and Theory Elsevier, Volume 14, Issue 2 (February 2006) pp112-125.

- [62] **M.A.B.M.NOOR**, «DEVELOPMENT OF VOLTAGE SAGS MONITORING AND MITIGATION ANALYSIS FOR CEMENT MANUFACTURING INDUSTRIES», Thèse comme exigence partielle à l'obtention de la maîtrise en en génie électrique, Soutenue Mai 2008, faculté de génie électrique, université de technologie, Malaysia.
- [63] **H. EZOJI, A. SHEIKHOESLAMI, M. REZANEZHAD, H. LIVANI**, "A new control method for Dynamic Voltage Restorer with asymmetrical inverter legs based on fuzzy logic controller", Simulation Modelling Practice and Theory Elsevier, Volume 18, Issue 6 (June 2010) pp 806-819.
- [64] **E.BABAEI, M.F.KANGARLU, M.SABAHI**, "Compensation of voltage disturbances in distribution systems using single-phase dynamic voltage restorer", ", Electric Power Systems Research Elsevier, Volume 80, (December 2010)),pp1413-1420.
- [65] **H. AKAGI**, « Control strategy and site selection of a shunt active filter for damping of harmonic propagation in power distribution systems », IEEE Trans. on power delivery, vol. 12, No. 1, pp. 354-363, January 1997.
- [66] **M.R. BANAEI, E. SALARY**, "New multilevel inverter with reduction of switches and gate driver ", Energy Conversion and Management journal, Elsevier, Volume 52, Issues 2 (February 2011),pp1129-1136.