
Introduction générale	7
-----------------------------	---

Chapitre I: Perturbation des réseaux électriques et solutions de depollution

I-1 Introduction	10
I.2 Notions des charges	10
I.3 Perturbations électriques.....	11
I.3.1 Harmonique de courant et/ou de tension.....	11
I.3.2 Creux de tension	15
I.3.3 Déséquilibre du système de tension triphasé.....	17
I.3.4 Surtension.....	18
I.4 Solutions aux perturbations harmoniques.....	19
I.4.1 Solutions traditionnelles.....	19
I.4.2 Solutions modernes.....	23
I.5 Comparatif et choix du filtrage actif parallèle (FAP).....	30
I.6 Conclusion	31

Chapitre II: Filtre actif parallèle, structure et stratégie de commande

II.1 Introduction.....	33
II.2 Principe de fonctionnement du FAP	33
II.3 Structure général d'un FAP	34
II.3.1 La structure courant du FAP	35
II.3.2 La structure tension du FAP	36
II.4 Etude de la partie puissance.....	37
II.4.1 L'onduleur de tension triphasé.....	38
II.4.2 Le système de stockage	39
II.2.3 Filtre de sortie	40
II.5 Etude de la partie commande.....	41
II.5.1 Génération des signaux harmoniques	41

II.5.1.1 Méthode des puissances active et réactive instantanées	43
II.5.2 La régulation de la tension V_{dc}	46
II.5.3 Génération des signaux de commande de l'onduleur.....	47
II.5.3.1 Commande par MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion)	47
II.5.3.2 Commande par hystérésis	48
II.6 Modèle Réseau - charge polluante - filtre actif parallèle	49
II.6.1 Résultats de Simulation sans filtrage.....	50
II.6.2 Résultat de Simulation après Filtrage.....	51
II.7 Conclusion	53

Chapitre III:Commande floue du filtre actif parallèle

III.1 Introduction	55
III.2 Historique de la logique floue	55
III.3 Principe de la logique floue.....	56
III.3.1 Les bases de la logique floue	56
III.3.1.1 Variables linguistiques et les ensembles flous.....	56
III.3.1.2 Les fonctions d'appartenance.....	57
III.3.1.3 Univers de discours	58
III.3.1.4 Les inférences (ou déduction floues).....	59
III.4 Opération sur la logique floue	60
III.5 Systèmes flous et contrôleur flou	61
III.5.1 Constitution d'un système flou	62
III.5.2 Etape de mise en œuvre d'un Contrôleur flou.....	62
III.6 Commande floue du filtre actif parallèle	66
III.6.1 Commande par un régulateur flou standard	67
III.6.2 Combinaison avec d'autres techniques de réglage	67
III.7 Commande de courant par un contrôleur flou hystérésis.....	67

III.7.1 Description du contrôleur flou-hystérésis.....	69
III.8 Les résultats de simulation	71
III.8.1 Comparaison entre les deux commande	73
III.9 Conclusion.....	75
Conclusion Générale.....	76
Références Bibliographique	78

Chapitre I

FIGURE I. 1 - CHARGE LINEAIRE	11
FIGURE I. 2 - CHARGE NON-LINEAIRE	11
FIGURE I. 3- LIMITES TOLERABLE D'UN CREUX DE TENSION.....	16
FIGURE I. 4- RACCORDEMENT D'UN FILTRE PASSIF	20
FIGURE I. 5- FILTRE PASSIF RESONNANT.....	21
FIGURE I. 6 FILTRE RESONNANT AGISSANT SUR PLUSIEURS RANGS D'HARMONIQUES.....	21
FIGURE I. 8- SCHEMA GENERAL DU COMPENSATEUR	23
FIGURE I. 9- FILTRE ACTIF SERIE (FAS).....	24
FIGURE I. 10- FILTRE ACTIF PARALLELE (FAP)	25
FIGURE I. 11- COMBINAISON PARALLELE-SERIE ACTIF (UPQC)	27
FIGURE I. 12- FILTRE ACTIF SERIE ET FILTRE PASSIF PARALLELE	28
FIGURE I. 13- FILTRE ACTIF SERIE CONNECTE EN SERIE AVEC UN FILTRE PASSIF PARALLELE.....	29
FIGURE I. 14- FILTRE ACTIF PARALLELE AVEC UN FILTRE PASSIF PARALLELE	29

Chapitre II

FIGURE II. 1- VISUALISATION DES COURANTS MIS EN JEU.....	34
FIGURE II. 2- STRUCTURE GENERALE D'UN FILTRE ACTIF PARALLELE.....	35
FIGURE II.3- FILTRE ACTIF PARALLELE A STRUCTURE DE COURANT	36
FIGURE II. 4- FILTRE ACTIF PARALLELE A STRUCTURE DE TENSION.	36
FIGURE II. 5- SCHEMA DE PRINCIPE D'UN FAP A STRUCTURE TENSION	37
FIGURE II.6- ONDULEUR DE TENSION TRIPHASE	38
FIGURE II. 7 METHODE D'IDENTIFICATION DES PUISSANCES ACTIVE ET REACTIVE INSTANTANEEES	43
FIGURE II. 8- SCHEMA REPRESENTANT LE PRINCIPE DE SEPARATION DES PUISSANCES	45
FIGURE II. 9- BOUCLE DE REGULATION DE LA TENSION CONTINUE	46
FIGURE II.10- PRINCIPE DE LA COMMANDE PAR MLI	48
FIGURE II.11- COMMANDE CONVENTIONNELLE PAR HYSTERESIS	48
FIGURE II.12- SCHEMA GLOBAL DU SYSTEME SOUS MATLAB SIMULINK.....	49

FIGURE II.13- TENSION DE CHARGE DE LA PHASE A (V_A)	50
FIGURE II.14- COURANT DE SOURCE DE LA PHASE A (I_{SA})	51
FIGURE II.15- SPECTRE DE COURANT DE SOURCE	51
FIGURE II.16- COURANT DE SOURCE I_{SA} APRES FILTRAGE	52
FIGURE II.17- SPECTRE DE COURANT DE LA SOURCE.....	52
FIGURE II.18- COURANT INJECTE PAR LE FILTRE I_{FA}	53
FIGURE II.19- LA TENSION V_{DC} DU CONDENSATEUR.....	53

Chapitre III

FIGURE III.1- FONCTION D'APPARTENANCE TRIANGULAIRE.....	57
FIGURE III.2- FONCTION D'APPARTENANCE SINGLETON	58
FIGURE III.3- FONCTION D'APPARTENANCE GAUSSIENNE.....	58
FIGURE III.4- UNIVERS DE DISCOURS D'UNE VARIABLE LINGUISTIQUE	59
FIGURE III.5- TRAITEMENT FLOU (SCHEMA GLOBAL)	62
FIGURE III.6- SCHEMA GENERALE D'UN SYSTEME FLOU.....	62
FIGURE III.7- SCHEMA GENERAL D'UN CONTROLEUR FLOU.....	63
FIGURE III.8- SCHEMA DE PRINCIPE D'UN REGULATEUR FLOU	64
FIGURE III.9- SCHEMA DE PRINCIPE DU CONTROLEUR FLOU-HYSTERESIS.....	68
FIGURE III.10- UNIVERS DE DISCOURS DES VARIABLES D'ENTREE ET DE SORTIE.	70
FIGURE III.11- LE COURANT DE LA SOURCE	71
FIGURE III.12- LE SPECTRE DE COURANT DE SOURCE.....	72
FIGURE III.13- LE COURANT DU FILTRE	72
FIGURE III.14- LA TENSION VDC.....	72
FIGURE III.15- LE COURANT DE CHARGE	73
FIGURE III.16- LE COURANT DU FILTRE	73
FIGURE III.17- LE COURANT DE LA SOURCE	74
FIGURE III.18- LA TENSION VDC.....	74
FIGURE III.19- ANALYSE SPECTRALE DU COURANT DE LA SOURCE AVANT FILTRAGE	74

FIGURE III.20- ANALYSE SPECTRALE DU COURANT DE LA SOURCE APRES FILTRAGE75

Liste des tableaux

TABLEAU I-1 LIMITES IEEE DES EMISSIONS DE COURANTS HARMONIQUES (NORME IEEE 519: 1992).15

TABLEAU I-2 : LIMITES IEEE POUR LA DISTORSION HARMONIQUE DE LA TENSION (NORME IEEE 519: 1992).15

TABLEAU I-3 : CONSEQUENCES DES CREUX DE TENSION SUR QUELQUES EQUIPEMENTS ELECTRIQUES SENSIBLES....17

TABLEAU II-1 : TENSIONS EN SORTIE DE L'ONDULEUR.39

TABLEAU III-1 RELATIONS SUR LES ENSEMBLES FLOUS.61

TABLEAU III-2 : MATRICE D'INFERENCE65

TABLEAU III-3 : REGLES FLOUES DU REGULATEUR FLOU DE LA BANDE D'HYSTERESIS.....65

Introduction générale

La large utilisation des dispositifs à base d'électronique de puissance (notamment les convertisseurs statiques) dans la production, la distribution d'énergie et chez le consommateur final, a entraîné ces dernières années d'énormes problèmes liés à la dégradation du niveau de la qualité de l'énergie. Si les premiers concepts de la qualité de l'énergie étaient portés sur la continuité de fourniture électrique, aujourd'hui les critères de qualité ont évolué et sont plutôt portés sur l'intérêt de la qualité de l'onde. La raison principale de cet intérêt est l'évolution de la nature des charges connectées au réseau, l'utilisation massive des systèmes d'électronique de puissance (pour l'alimentation et le contrôle de charges électriques) avec leurs caractéristiques non-linéaires, a multiplié les perturbations présentes sur le réseau (les distorsions harmoniques)[1],[2]. Ces charges non linéaires, telles que les redresseurs à diodes et à thyristors, les gradateurs, les ordinateurs et leurs périphériques, les appareils de climatisation et d'éclairages à base de tubes fluorescents, sont dites déformantes car ils consomment un courant non sinusoïdal même s'ils sont alimentés par une tension sinusoïdale et de ce fait introduisent des pollutions harmoniques sur les courants et les tensions des réseaux de distribution électrique. Cette pollution harmonique a des effets nocifs. Parmi ces effets, on peut citer [3]:

- la dégradation du facteur de puissance,
- La génération des courants alternatifs non sinusoïdaux riches en harmoniques,
- L'échauffement des câbles et des équipements électriques,
- L'interférence avec les réseaux de télécommunication,
- Les phénomènes de résonance avec les éléments composant le réseau,
- L'arrêt soudain des machines tournantes, voire la destruction totale de tous ces équipements.

Pour faire face à ce problème, plusieurs solutions efficaces et peu onéreuses qui permettent de diminuer l'émission des harmoniques ont été proposées[4].

- La réduction de l'impédance de court-circuit,
- La modification du convertisseur statique polluant en termes de la topologie et/ou de la commande afin d'intervenir directement à la source des perturbations harmoniques,
- les dispositifs de filtrage.

L'utilisation des dispositifs de filtrage tels que les filtres passifs permettent d'éliminer les harmoniques de courant et compenser aussi la puissance réactive sauf que ces systèmes de filtrage traditionnel présentent certains inconvénients : manque d'adaptabilité lors des variations de l'impédance du réseau, de la charge et résonance possible avec l'impédance du réseau et dans certains cas défavorables où cette résonance est excitée, celle-ci peut entraîner une tension harmonique élevée et un courant harmonique important dans la capacité du filtre et dans le réseau. Ainsi, cette solution présente un inconvénient majeur qui peut être intolérable dans ces circonstances particulières[4].

Afin d'y remédier aux inconvénients des filtres passifs, une autre solution consiste à mettre en œuvre des systèmes de filtrage moderne communément appelés filtre actif de puissance, parmi ces systèmes on trouve le filtre actif parallèle qui doit être connecté en parallèle à la source et permet de compenser les harmoniques de courant et la puissance réactive. Le filtre actif série qui doit être connecté en série avec la source de tension a pour fonction la compensation à la fois des tensions harmoniques et des différentes autres perturbations liées à la tension. L'UPQC est la solution universelle permettant de compenser tous les types des perturbations courant et tension[3].

Cependant le filtrage actif présente également ses inconvénients spécifiques, dont son coût élevé pour des applications industrielles ; le dimensionnement du convertisseur de puissance du filtre actif peut alors être relativement élevé. Pour cette raison majeure, les applications des filtres actifs de puissance dans les systèmes électriques sont aujourd'hui encore limitées bien que des normes fixent les caractéristiques exigées pour la qualité de l'énergie.

Les inconvénients des filtres passifs et des filtres actifs peuvent être simultanément limités en utilisant des nouvelles topologies de filtre actif, appelées filtres hybrides. L'utilisation des filtres actifs hybrides est aujourd'hui considérée comme une solution qui permet de réduire le dimensionnement et par conséquent le coût des filtres actifs. Le filtre hybride consiste en l'association de filtres passifs, destinés à absorber les harmoniques des courants provenant de la charge polluante, et d'un filtre actif de faible puissance

Dans ce travail, nous avons opté pour un filtre actif parallèle de puissance (Shunt Actif Power Filter) destiné au filtrage des courants harmonique et la compensation de l'énergie réactive. Actuellement, ce filtre est la solution avancée de dépollution la plus adéquate.

Il est à signaler que la qualité et les performances de la compensation des harmoniques sont liées à l'algorithme utilisé pour l'identification des courants des références, au contrôleur employé pour la poursuite de ces courants de référence et à la commande (conventionnelle ou intelligente) du convertisseur composant le filtre actif[2].

Mais, si aujourd'hui, on arrive à identifier en temps réel les composantes harmoniques avec un minimum d'erreur, la problématique demeure dans la réinjection dans le réseau de toutes les composantes harmoniques identifiées, avec une parfaite fidélité.

Notre travail s'inscrit dans ce cadre, et présente l'application d'un filtre actif parallèle basé sur un onduleur de tension à trois bras, dans le but de compenser les perturbations générées par la charge polluante (non-linéaire), pour cela nous avons divisé ce travail en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, on présente les perturbations électriques, leurs sources et leurs effets, les normes standards pour chaque perturbation, ainsi que les solutions de dépollution traditionnelles et modernes.

Le deuxième chapitre porte sur l'étude du filtre actif parallèle (FAP). Nous présentons dans un premier temps le principe du FAP et ses différentes structures, en suite on passe à l'étude en détails du FAP à structure tension notamment sa partie puissance et sa partie commande où nous mettons l'accent sur, les différentes stratégies de contrôle permettant l'identification des courants de référence en particulier la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées (PQ), Nous établissons la synthèse de la loi de commande en courant du filtre en utilisant la technique de commande par Hystérésis avec un régulateur conventionnel. La simulation est développée sous MATLAB-SIMULINK.

Le troisième chapitre est consacré à l'application de la logique floue pour améliorer la commande conventionnelle du filtre actif. Nous présentons dans ce chapitre les notions essentielles de la logique floue, ensuite, une application conjointe d'un régulateur flou et un régulateur à hystérésis est proposée. Les résultats de simulation obtenue sont analysés et comparés.

I-1 Introduction

Comme tout générateur d'énergie électrique, un réseau de puissance fournit de l'énergie aux appareils utilisateurs par l'intermédiaire des tensions qu'il maintient à leurs bornes. Il apparaît évident que la qualité de cette énergie dépend de celle de la tension au point de livraison. Cette tension subit généralement beaucoup de perturbations de deux origines distinctes :

- les perturbations de tension causées par le passage, dans les réseaux électriques, des courants perturbateurs comme les courants harmoniques, déséquilibrés et réactifs.
- les perturbations de tension causées par des tensions perturbatrices comme les tensions harmoniques et déséquilibrées et les creux de tension.[1]

Dans la première partie de ce chapitre, on présente la notion des charges et nous étudierons les caractéristiques générales des perturbations électriques, on détaille ensuite les origines, les conséquences matérielles et les limites tolérées et imposées par les normes internationales de ces perturbations.

Dans une deuxième partie, nous traitons les différentes solutions de compensation en mettant le point sur le problème de compensation des harmoniques en courant et tension en utilisant différents systèmes de compensation active (FAP, FAS et UPQC) et hybride.

I.2 Notions des charges

Les récepteurs peuvent être classés en deux familles principales :

- Les récepteurs linéaires (ou charges linéaires),
- Les récepteurs non linéaires (ou charges non linéaires).

Une charge est dite linéaire si, alimentée par une tension sinusoïdale, elle consomme un courant sinusoïdal (résistances, capacités et inductance) ; Cependant le courant et la tension peuvent être déphasés.

Une charge est dite non-linéaire lorsque la relation entre la tension et le courant n'est plus linéaire. Un tel récepteur alimenté par une tension sinusoïdale consomme un courant non-sinusoïdal. Typiquement, les charges utilisant l'électronique de puissance sont non-linéaires, or elles sont de plus en plus nombreuses et leurs parts dans la consommation de l'électricité ne cessent de croître.

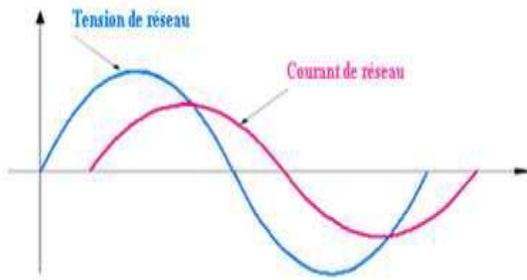


Figure I. 1 - Charge linéaire

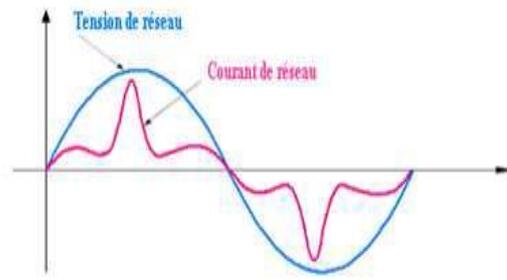


Figure I. 2 - Charge non-linéaire

I.3 Perturbations électriques

Les perturbations électriques sont l'ensemble des phénomènes internes ou externes ayant le pouvoir de modifier d'une manière transitoire ou permanente en amplitude et/ou en forme les grandeurs électriques du réseau (courant, tension, fréquence).

La qualité de l'énergie électrique est étroitement liée à la qualité de l'onde de tension, laquelle est caractérisée par les paramètres suivants :

- Forme d'onde parfaitement sinusoïdale ; absence de distorsions, de pics, de creux,
- Equilibre et symétrie parfaite des phases en amplitude et en phases,
- Valeurs efficaces dans les limites tolérées,
- Stabilité de la fréquence,
- Facteur de puissance dans des limites tolérables.

I.3.1 Harmonique de courant et/ou de tension

I.3.1.1 Origine des harmoniques et leur effet

L'utilisation des équipements électriques comportant des convertisseurs statiques dans les installations de conversion d'énergie électrique a entraîné ces dernières années une augmentation sensible du niveau de pollution harmonique. Ils ont contribué à la détérioration de la qualité du courant et de la tension des réseaux de distribution.

Les principales sources à l'origine des harmoniques sont les appareils d'éclairage fluorescent, les appareillages informatiques, les appareils domestiques (téléviseurs, appareils électroménagers en grand nombre), les arcs électriques et tous les convertisseurs statiques raccordés aux réseaux tels que les redresseurs et les onduleurs. Tous ces systèmes contribuent à la pollution harmonique du réseau auquel ils sont connectés.

En effet, ces systèmes absorbent des courants non sinusoïdaux, même s'ils sont alimentés par une tension sinusoïdale. Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers ou non entiers de la fréquence fondamentale.

La présence d'harmoniques de courant ou de tension conduit à des effets néfastes sur le réseau de distribution, comme par exemple[5] :

- L'échauffement des conducteurs des câbles des condensateurs, et des machines dû aux pertes cuivre et fer (transformateurs).
- L'interférence avec les réseaux de télécommunication, causée par le couplage électromagnétique entre les réseaux électriques et les réseaux de télécommunications qui peut induire dans ce dernier des bruits importants.
- Les dysfonctionnements de certains équipements électriques comme les dispositifs de commande et de régulation.
- En présence d'harmoniques, le courant et la tension peuvent changer plusieurs fois de signe au cours d'une demi-période. Par conséquent, les équipements sensibles au passage par zéro de ces grandeurs électriques sont perturbés.
- Les fréquences de résonance des circuits formés par les inductances du transformateur et les capacités des câbles sont normalement assez élevées, mais celles-ci peuvent coïncider avec la fréquence d'un harmonique ; dans ce cas, il y aura une amplification importante qui peut détruire les équipements raccordés au réseau.
- La dégradation de la précision des appareils de mesure, Des perturbations induites sur les lignes de communication, rayonnement électromagnétique.

Différents critères sont définis pour caractériser ces perturbations. Le THD et le facteur de puissance sont les plus employés pour quantifier respectivement les perturbations harmoniques et la consommation de puissance réactive.

1.3.1.1. a Le Taux de Distorsions Harmonique (THD)

Le THD représente le rapport de la valeur efficace des harmoniques à la valeur efficace du fondamental. Il est défini par la relation :

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{X_h^2}{X_1^2}} \cdot 100\% \quad (1.1)$$

Avec :

- X_1 la valeur efficace du courant (tension) fondamental,
- X_h les valeurs efficaces des différentes harmoniques du courant (tension).

En général, les harmoniques pris en compte dans un réseau électrique sont inférieurs à 2500 Hz, ce qui correspond au domaine des perturbations basses fréquences au sens de la normalisation. Les harmoniques de fréquence plus élevée sont fortement atténués par l'effet de peau et par la présence des inductances de lignes. De plus, les appareils générant des harmoniques ont, en majorité, un spectre d'émission inférieur à 2500 Hz, c'est la raison pour laquelle le domaine d'étude des harmoniques s'étend généralement de 100 à 2500 Hz, c'est-à-dire des rangs 2 à 50.

Le TDD représente le rapport de la valeur efficace des harmoniques à la valeur maximale du courant appelé par la charge. [6]

$$TDD = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{I_h^2}{I_L^2}} \cdot 100\% \quad (1.2)$$

1.3.1.1. b Le facteur de puissance

Pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance est donné par le rapport entre la puissance active P et la puissance apparente S . Les générateurs, les transformateurs, les lignes de transport et les appareils de contrôle et de mesure sont dimensionnés pour la tension et le courant nominaux. Une faible valeur du facteur de puissance se traduit par une mauvaise utilisation de ces équipements.

$$F_p = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (1.3)$$

Avec :

- P : La puissance active,
- Q : La puissance réactive.

En Présence d'harmoniques, le facteur de puissance est dégradé, une puissance supplémentaire appelée la puissance déformante (D) donnée par la relation (I.4) est ajoutée:

$$D = 3V_1 \sqrt{\sum_2^{50} I_h^2} \cdot 100\% \quad (\text{I.4})$$

Le facteur de puissance devient :

$$F_p = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (\text{I.5})$$

I.3.1.2 Normes standards en courant et en tension harmoniques

Afin de limiter l'influence d'une charge polluante sur les différentes charges connectées au réseau des normes sur la qualité de l'énergie ont été développées. La norme principale est l'IEEE 519:1992 [Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Power Systems], elle détermine la procédure pour contrôler les harmoniques présents sur le réseau électrique, et elle impose également les limites recommandées de la pollution harmonique générée par les clients et de distorsion harmonique totale sur le réseau. Cette norme limite la distorsion harmonique (THD) du courant des réseaux <69kV à 5% [7].

Il est d'usage de dire que, dans les installations industrielles, les tensions harmoniques dont le THD est inférieur à 5% ne produisent pas d'effet notable. Entre 5% et 7% on commence à observer des effets, et pour plus de 10% les effets sont quasi certains.

Tableau I-1 Limites IEEE des émissions de courants harmoniques (Norme IEEE 519: 1992).

V _n < 69kV						
I _{cc} /I _{ch}	H<11	11<=h<17	17<=h<23	23<=h<35	35<=h	TDD
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	0	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
69kV <= V _n < 161kV						
< 20	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20-50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50-100	5.0	2.25	2.0	1.25	0.35	6.0
100-1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
> 1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10
V _n > 161 kV						
< 50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
>= 50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0

Où :

- I_{cc} est le courant de court-circuit,
- I_{ch} est le courant de charge nominale,
- V_n la tension nominale,
- TDD est la distorsion totale de la demande (distorsion du courant par rapport à la demande maximale).

Tableau I-2 : Limites IEEE pour la distorsion harmonique de la tension (Norme IEEE 519: 1992).

Tension au point de raccordement (V _n)	Distorsion Harmonique individuelle (%)	THD V _n (%)
V _n <=69kV	3.0	5.0
69kV < V _n <=161kV	1.5	2.5
V _n > 161 kV	1.0	1.5

I.3.2 Creux de tension

Un creux de tension est une diminution brusque de la tension à une valeur située entre 90% et 10% de la tension nominale, suivie du rétablissement de la tension après un court laps de temps. Un creux de tension peut durer de 10 ms à 1 mn pour les coupures brèves et une durée supérieure à une minute pour les coupures longues.

La plupart des appareils électriques admettent une coupure totale d'alimentation d'une durée inférieure à 10 ms[1].

I.3.2.1 Sources de creux de tension

La principale source de creux de tension et de coupures brèves sont les courts-circuits et le démarrage des machines de forte puissance (asynchrones essentiellement). En général, le courant des moteurs atteint au moment de leur démarrage 5 à 6 fois le courant nominal et diminue progressivement lorsque la machine se rapproche de sa vitesse nominale. Cette surintensité produit une chute de tension qui décroît avec la diminution du courant. Les creux de tensions engendrés par le démarrage des moteurs de forte puissance durent entre quelques secondes et quelques dizaines de seconde et se caractérisent par des chutes de tension sur les trois phases[8].

Les creux de tension peuvent également être engendrés par la saturation des transformateurs ou des modifications dans la structure du réseau. Cependant, ces perturbations provoquent rarement des chutes de tension importantes. Les creux de tension sont les perturbations électriques les plus pénalisantes du fait de leur fréquence et de la sensibilité de nombre d'appareillages présents dans les réseaux industriels. Il faut néanmoins souligner que les coupures brèves peuvent avoir des conséquences plus graves (à la reprise), mais sont bien moins fréquentes. Le tableau (I-3) résume les conséquences néfastes causées par les creux de tension sur quelques matériels industriels sensibles.

I.3.2.2 Normes standard-creux de tension

Les creux de tension sont caractérisés par leur profondeur et leur durée, avec des limites de 30% et de 600 ms, comme le montre la Figure (I.3).

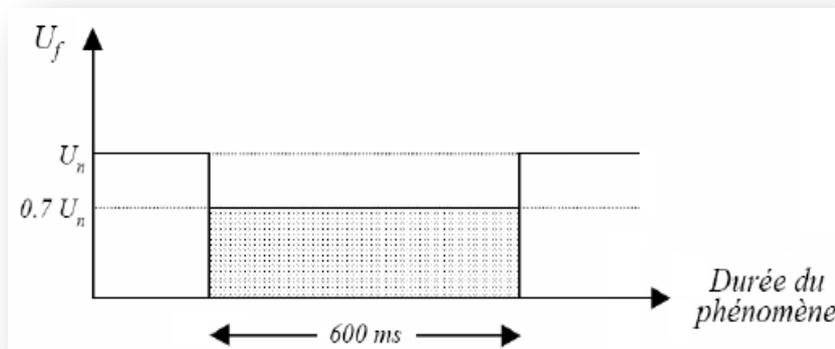


Figure I. 3- Limites tolérables d'un creux de tension

Tableau I-3 : Conséquences des creux de tension sur quelques équipements électriques sensibles

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

I.3.3 Déséquilibre du système de tension triphasé

On dit qu'il y a déséquilibre dans un réseau, lorsqu'on enregistre en régime permanent, des asymétries d'amplitudes et des déphasages des tensions de phase[8]. Ce type de perturbation est causé essentiellement par les asymétries d'impédances des lignes du réseau ou des charges, et aussi par des courts-circuits monophasés ou biphasés. Ce déséquilibre se manifeste par des perturbations dans les machines tournantes, des échauffements, etc...

I.3.3.1 Conséquence du déséquilibre de système triphasé

Le déséquilibre d'une installation triphasée peut entraîner un dysfonctionnement des appareils basses tensions connectés[1]:

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

Concernant les dispositifs triphasés d'électronique de puissance, principalement les ponts redresseurs, le fonctionnement en présence de déséquilibre entraîne l'apparition des composantes harmoniques non caractéristiques, comme les harmoniques de rang multiple de 3. L'apparition de ces courants harmoniques peut poser des problèmes, comme la génération d'une antirésonance lors du filtrage de l'harmonique de rang 5. Outre les effets classiques des

harmoniques, ces fréquences non caractéristiques peuvent conduire, dans certains cas, au blocage de la commande.

La conséquence des composantes inverses sur les machines tournantes est la création d'un champ tournant en sens inverse du sens de rotation normal, d'où un couple de freinage parasite et des pertes supplémentaires qui provoquent l'échauffement de la machine. Concernant l'effet du déséquilibre homopolaire, il faut signaler le risque d'échauffement du conducteur neutre dans un réseau BT qui, lorsque le conducteur est d'un diamètre trop faible, peut provoquer une rupture du conducteur ou un incendie.

I.3.3.2 Normes standards du déséquilibre du système triphasé

Le déséquilibre en tension est caractérisé par le taux de déséquilibre de tension τ_m donné par le rapport des amplitudes des tensions inverse et directe :

$$\tau_v = \frac{V_i}{V_d} \quad (I.6)$$

Une tension dont le taux de déséquilibre moyen τ_m ne dépasse pas 2% est acceptable[1].

I.3.4 Surtension

I.3.4.1 Sources des surtensions

Les réseaux peuvent être le siège des surtensions impulsionnelles par rapport à la terre, dues entre autres, à des coups de foudre. Des surtensions impulsionnelles dues à des manœuvres d'appareils peuvent également se produire sur les réseaux de distribution ou sur les installations des utilisateurs.

La protection contre les surtensions d'origine atmosphérique nécessite soit l'emploi des dispositifs de protection (parafoudres), soit l'adoption des dispositions constructives appropriées (distances d'isolement par exemple).

I.3.4.2 Normes standard des surtensions

La norme NF EN 50-160 ne fixe pas de valeurs maximales pour ces surtensions. A titre indicatif, les surtensions en BT ne dépassent pas généralement 6000 V crête. Le temps de montée peut varier de quelques microsecondes à plusieurs millisecondes. En HTA, les parafoudres actuellement utilisés sur le réseau de distribution permettent de limiter la valeur crête de la tension à leurs bornes à 80 kV, pour un courant de décharge de 5 kA. Pour un courant de décharge supérieur, des valeurs supérieures de surtension peuvent être rencontrées.

Pour une surtension temporaire à la fréquence du réseau qui peut apparaître lors d'un défaut sur le réseau de distribution ou dans l'installation de l'utilisateur, la norme NF EN 50-160 ne fixe pas des valeurs maximales pour ces surtensions. A titre indicatif, les surtensions en BT ne dépassent pas généralement la valeur efficace de 1500 V.

I.4 Solutions aux perturbations harmoniques

Pour 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.

La première consiste en la mise en œuvre d'un filtrage des composantes harmoniques, tandis que la seconde consiste à utiliser des convertisseurs statiques moins ou peu polluants. La première classe des solutions consiste à compenser les courants ou les tensions harmoniques[9] tandis que la seconde s'intéresse à la conception. Deux groupes de solutions de dépollution pour compenser toutes les perturbations peuvent être distingués : les solutions traditionnelles et les solutions modernes.

I.4.1 Solutions traditionnelles

Ce sont des techniques qui 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.

- A. Agir sur la structure de l'installation:** Face à un pollueur moyen il est préférable d'effectuer l'alimentation des câbles distincts au lieu de les connecter en parallèle.
- B. Sur dimensionnement ou déclassement de l'installation électrique:** par cette approche, les problèmes liés à la pollution harmoniques sont résolus pendant une durée limitée. Cette méthode cause un sur coût de production et ne tire pas profit du potentiel réel de l'installation.
- C. Renforcement de la puissance de court -circuit :** La diminution de l'impédance totale en amont de la charge non linéaire permet de réduire la tension créée par les harmoniques de courant.

- D. **Rééquilibrage des courants du réseau électrique:** C'est une solution qui permet de répartir les charges d'une manière identique sur les trois phases
- E. **Utilisation du redresseur dodécaphasé :** en pont de Graëtz qui réalise un redressement hémiphase.
- F. **Filtre passif :** le plus ancien pour le traitement des harmoniques

I.4.1.1 Le Filtrage passif

Ce mode de filtrage a été très souvent utilisé jusqu'à ces dernières années pour des raisons économiques, malgré les problèmes d'encombrements qui lui sont liés.

Un filtre passif est généralement constitué d'une résistance, d'une inductance et d'un condensateur, l'inductance absorbe de l'énergie tandis que le condensateur en crée. Son principe réside dans la modification locale de l'impédance du réseau, afin de faire dévier les courants harmoniques et en même temps éliminer les tensions harmoniques résultantes, ces filtres sont composés des éléments passifs, qui sont disposés de manière à obtenir une résonance en série sur une fréquence déterminée.

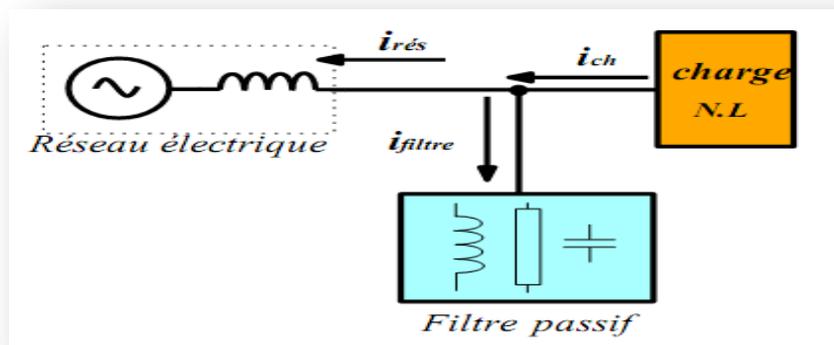


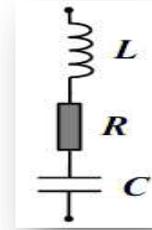
Figure I. 4- Raccordement d'un filtre passif

On peut distinguer deux types de filtres passifs qui sont généralement utilisés :

- Filtre résonant.
- Filtre amorti.

a- Filtre résonant

C'est un filtre sélectif constitué d'une résistance, d'un condensateur et d'une bobine en série, comme décrit sur la figure (1.5), son impédance équivalente est :



$$Z_{eq}(\omega) = \frac{1 - LC\omega^2 + jRC\omega}{jC\omega}$$

Figure I. 5- Filtre passif résonnant

Le rang d'accord h_α correspond au multiple, entier ou non, de la fréquence nominale du réseau. La pulsation de résonance du filtre est $\omega_\alpha = 2 * \pi * f_\alpha = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

Si on veut éliminer plusieurs harmoniques on a besoin de plusieurs filtres, chacun pour une harmonique bien déterminée, l'association des plusieurs filtres branchés entre phase présente une impédance minimale pour chaque rang d'harmonique à filtrer (car à la fréquence de résonance, la seule impédance vue par l'harmonique sera celle du réseau) figure (I-6).

Il est à noter qu'un filtre passif parallèle efficace, réalise en plus la compensation de la puissance réactive à la fréquence industrielle (50 Hz).

Les filtres, passifs parallèles, sont caractérisés par un facteur de qualité

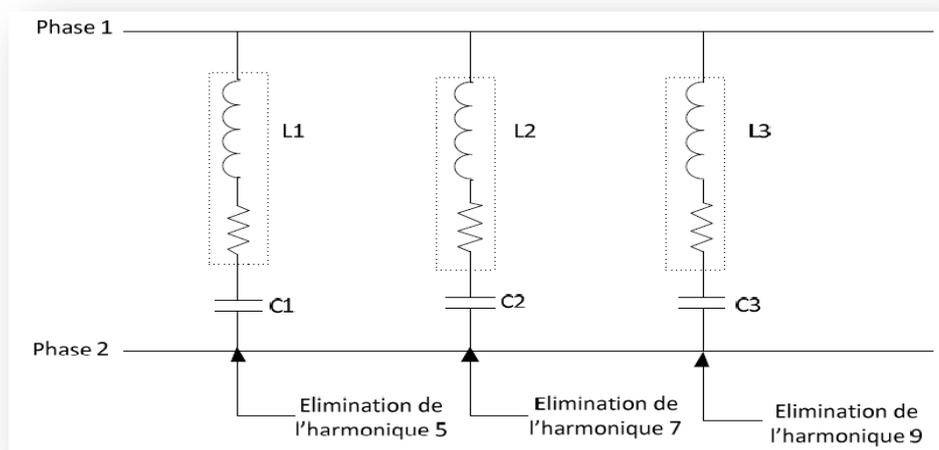


Figure I. 6 Filtre résonnant agissant sur plusieurs rangs d'harmoniques

b- Le filtre amorti

C'est un filtre passe haut constitué d'une inductance en parallèle avec une résistance, le tout en série avec un condensateur comme décrit sur la figure (I.7). Son impédance équivalente est :

$$Z_{eq}(\omega) = \frac{1 - LC\omega^2 + j\frac{L}{R}\omega}{-\frac{L}{R}C\omega^2 + jC\omega}$$

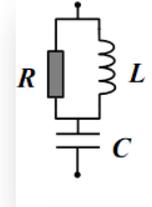


Figure I. 7- Structure de filtre amorti

Il est utilisé pour des applications susceptibles de générer des courants harmoniques proches de l'anti résonance. Le filtre amorti assure l'atténuation des harmoniques dans une plus large bande que le filtre résonant, mais sans l'élimination totale de ces harmoniques, donc il peut contribuer à la réduction de THD.

Donc on peut installer des filtres passifs résonants pour les harmoniques 5, 7, 11 et un filtre amorti pour les rangs supérieur à 11.

Mais la simplicité des filtres passifs se paye par des inconvénients et des problèmes que pose la mise en œuvre de ces filtres.

On note que[10]:

- Il est nécessaire d'avoir une bonne connaissance de la configuration du réseau.
- Le dimensionnement dépend du spectre harmonique de la charge et de l'impédance de la source.
- Aux fréquences spécifiques, il existe des antirésonances entre l'impédance de source et les filtres passifs.
- Ces filtres sont très sensibles à la variation de la fréquence du réseau, il devient peu pratique si la variation de fréquence est de $\pm 0.5\text{Hz}$.
- Toute modification (reconstruction, nouveaux clients ... etc.) peut rendre le filtre inadapté voir même perturbant (phénomène de résonance); si le réseau se modifie il faut redimensionner le filtre.

Avec l'évolution rapide du réseau moderne, le filtre passif n'est plus la meilleure solution à envisager, il y a une tendance à utiliser des filtres actifs.

I.4.2 Solutions modernes

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).

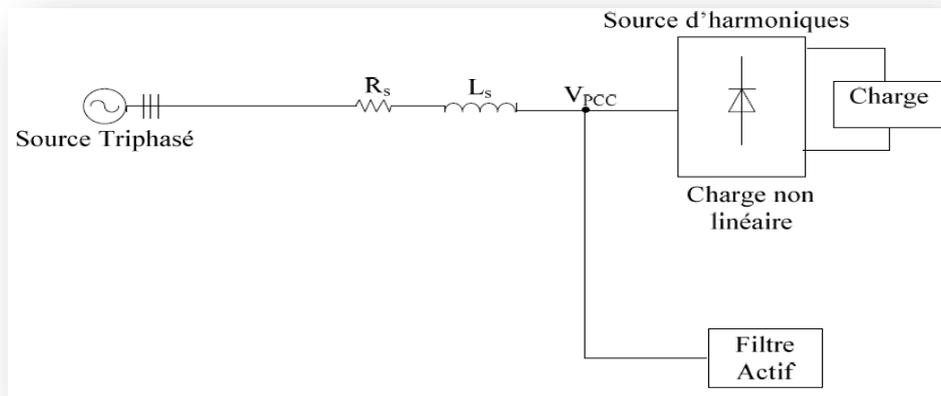


Figure I. 8- Schéma général du compensateur

Le but de ces filtres actifs est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant ou la tension redevienne sinusoïdal. Le filtre actif est connecté au réseau soit en série (FAS), soit en parallèle (FAP) suivant qu'il est conçu respectivement pour compenser les tensions ou les courants harmoniques, soit associé à des filtres passifs.

Pour fournir aux consommateurs une énergie électrique de qualité, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, les filtres actifs sont proposés comme des solutions de dépollution des réseaux électriques[9].

Les avantages les plus importants des filtres actifs par rapport aux filtres passifs sont les suivants :

- Le volume physique du filtre est plus réduit,
- La capacité de filtrage est supérieure,
- La flexibilité et adaptabilité sont très supérieures.

Pourtant, ils ont aussi quelques inconvénients :

- Leur coût élevé (ce qui a limité leur implantation),
- Les pertes sont plus élevées (puissance fournie pour la compensation).

Actuellement on a développé des techniques de commande de telle façon que les filtres moderne peuvent déterminer le courant harmonique à compenser en temps réel, donc ces filtres sont sélectifs et adaptatifs.

Dans la suite, différentes topologies de filtres actifs usuels et des filtres hybrides (combinaison actif-passif) sont présentées.

I.4.2.1 Filtre actif série (FAS)

Le rôle d'un FAS est de modifier localement l'impédance du réseau. Il se comporte comme une source de tension harmonique qui annule les tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmonique) venant de la source et celles générées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Ainsi, la tension aux bornes de la charge peut être rendue sinusoïdale. Cependant, le FAS ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge.

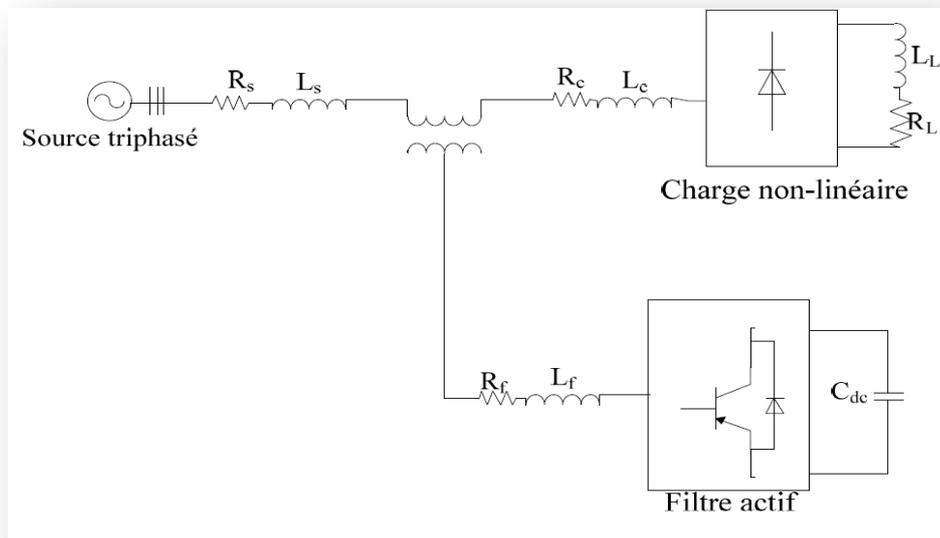


Figure I. 9- Filtre actif série (FAS)

Le filtre actif Série (F.A.S) est une solution adaptée à la compensation des tensions perturbatrices, harmoniques, déséquilibrées et des creux de tension. Ces perturbations

trouvent généralement leurs origines dans le réseau lui-même mais peuvent parfois être provoquées par les charges elles-mêmes.

En 1976, une famille de filtres actifs séries avec des onduleurs à transistors contrôlés en MLI a été présentée. Un compensateur statique pour le rééquilibrage de la tension du réseau électrique a été proposé en 1985[11].

En 1990, un compensateur de tension à base d'onduleur de tension triphasé a été proposé pour compenser le déséquilibre de tension de réseau électrique. Depuis, beaucoup de travaux ont été consacrés à l'amélioration de la qualité de compensation du déséquilibre de la tension du réseau. D'autres articles ont introduit le problème des creux de tension et leur compensation par le compensateur actif série.

I.4.2.2 Filtre actif parallèle (FAP)

Le FAP se connecte en parallèle avec le réseau et injecte en temps réel les composantes harmoniques des courants absorbés par les charges non linéaires connectées au réseau. Ainsi, le courant fourni par la source d'énergie devient sinusoïdal.

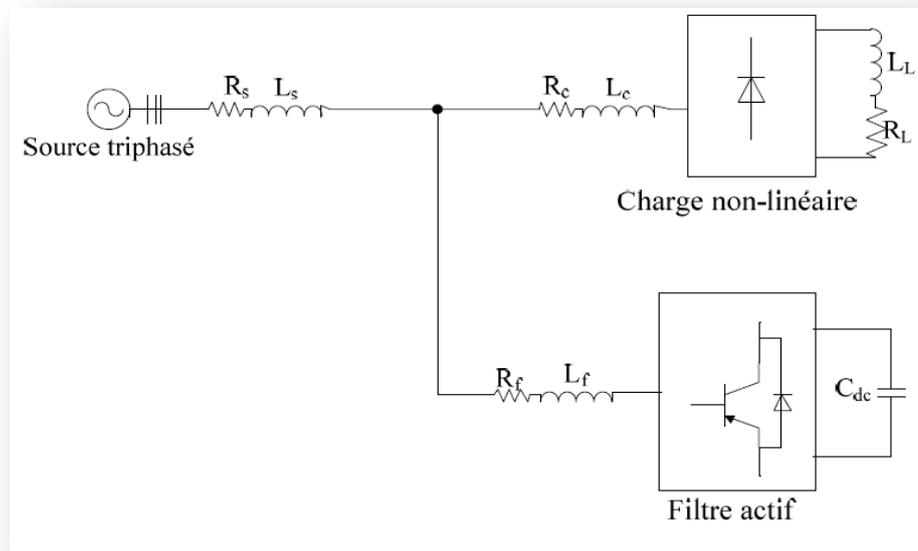


Figure I. 10- Filtre actif parallèle (FAP)

Les principes de fonctionnement des premiers filtres actifs parallèles ont été décrits dans la littérature dès le début des années 1970. En 1976, une première famille de filtre actif parallèle a été conçue à partir d'onduleurs à transistors de puissance commandés en MLI.

Ces premiers dispositifs de puissance étaient alors proposés pour la seule compensation des courants harmoniques. Cependant, à cette époque, il était encore difficile de concevoir ce type de système pour des applications industrielles. Cette barrière technologique sera franchie, dès 1977, lors de la conception d'un premier prototype de filtre actif parallèle à base de thyristors à commutations naturelles pour la compensation de courant harmonique. Cependant, l'application des onduleurs à base de thyristor a tout de suite posé le problème de la génération non désirée de composantes injectées sur le réseau à la fréquence de commutation.

La même raison a également empêché l'utilisation de compensateurs statiques parallèles à thyristors, lesquels avaient été conçus pour la compensation conjointe de la puissance réactive et des courants déséquilibrés.

Au cours des années 1980, des progrès importants dans le domaine des semi-conducteurs ont permis de développer de nouveaux composants de puissance associant hautes fréquences de commutation et fortes puissances. Profitant de ces avancées, et de l'avènement des interrupteurs de puissance du type GTO et IGBT, de nombreux onduleurs de puissance, commandés en MLI, ont pu être conçus en vue de répondre aux contraintes industrielles de conception des filtres actifs parallèles. Ainsi, ces derniers ont commencé à être commercialisés et installés à travers le monde, et plus spécialement dans les pays les plus industrialisés comme le Japon.

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.

I.4.2.3 Combinaison parallèle-série de filtres actifs

La **figure (I.11)** illustre l'association de deux filtres actifs parallèle et série, également appelée « Unified Power Quality Conditioner » (UPQC). Cette structure bénéficie des avantages des deux types de filtres actifs série et parallèle. Ainsi, elle permet d'assurer simultanément un courant sinusoïdal et une tension du réseau électrique également sinusoïdale[1].

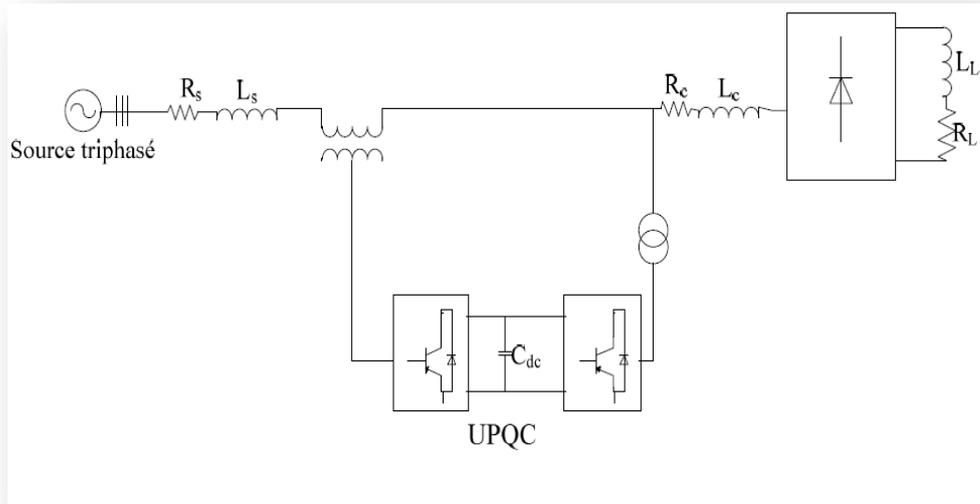


Figure I. 11- Combinaison parallèle-série actif (UPQC)

I.4.2.4 Combinaison actif-passif

Les inconvénients des filtres passifs (résonances série ou parallèle avec la source et/ou la charge, détérioration des performances du filtre lors de variations de l'impédance du réseau,...) et des filtres actifs (coût élevé en raison du dimensionnement des composants de puissance) ont conduit à l'élaboration d'une nouvelle topologie de filtre actif. Il s'agit du filtre hybride qui est en réalité l'association de filtres actifs de faibles puissances à des filtres passifs.

I.4.2.4.1 Filtre hybride

Le filtre hybride est une topologie de filtre qui combine les avantages des filtres passifs et des filtres actifs. Pour cette raison, il est considéré comme l'une des meilleures solutions pour filtrer les harmoniques de courant des réseaux de distribution. Une des principales raisons de l'utilisation du filtre actif hybride est liée au développement des semi-conducteurs de puissance tels que les transistors de puissance de types MOSFET ou IGBT.

De plus, du point de vue économique, le filtre hybride présente un atout majeur : il permet de réduire le coût du filtre actif, actuellement l'obstacle majeur à l'utilisation de filtres actifs.

Cependant il existe plusieurs configurations des filtres hybrides dont les plus étudiées sont :

- le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles

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

a- Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles

Le rôle du filtre actif série dans ce cas est d'empêcher les courants harmoniques de circuler vers le réseau et de les obliger à passer par les filtres passifs raccordés à leurs fréquences comme le montre la figure (I.12).

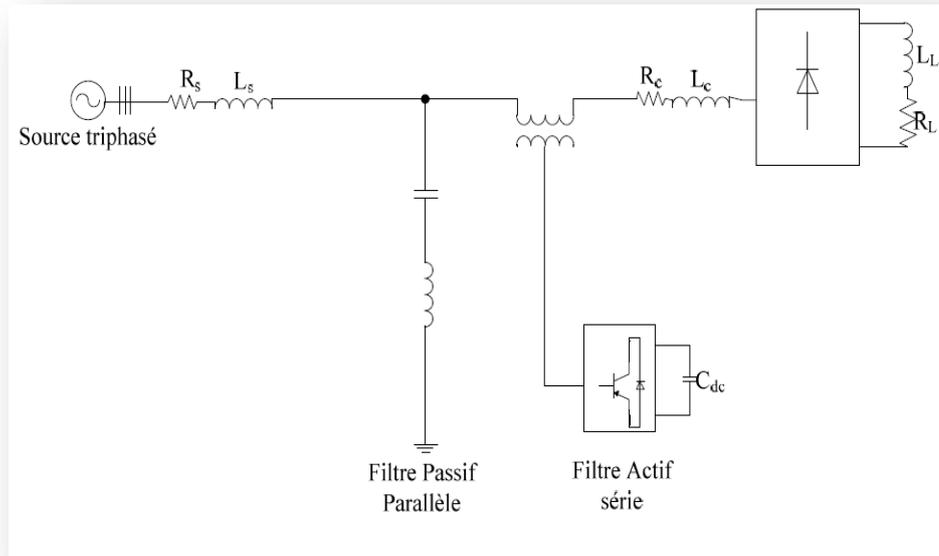


Figure I. 12- Filtre actif série et filtre passif parallèle

b- Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles

Le principe de fonctionnement de cette configuration, présentée en figure (I.13), est la même que la précédente avec l'avantage de réduire encore le dimensionnement du filtre actif série car le courant qui le traverse est plus faible

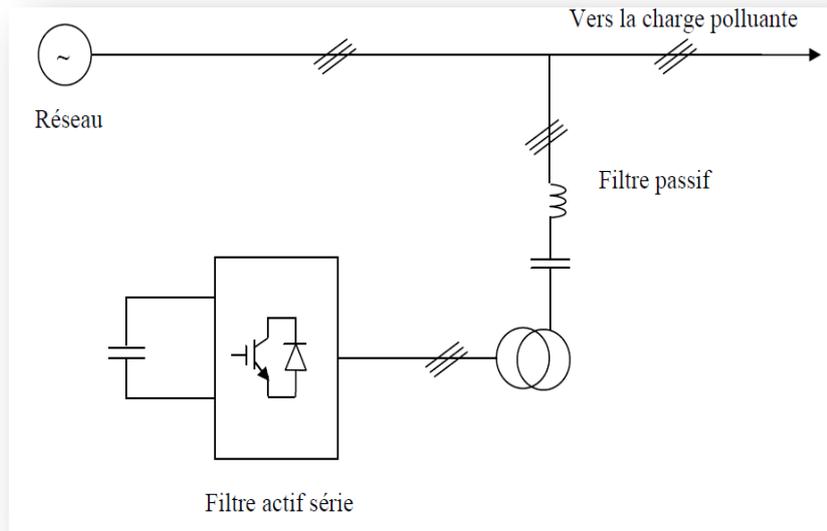


Figure I. 13- Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle

c- Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

Le rôle du filtre actif parallèle dans cette configuration, montrée en figure (I.14), est la compensation des courants harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante. Le filtre passif accordé sur une fréquence élevée, élimine les harmoniques hautes fréquences y compris ceux créés par le filtre actif parallèle. Ce type de filtrage a déjà été appliqué à la compensation des courants harmoniques émis par un cyclo convertisseur de forte puissance.

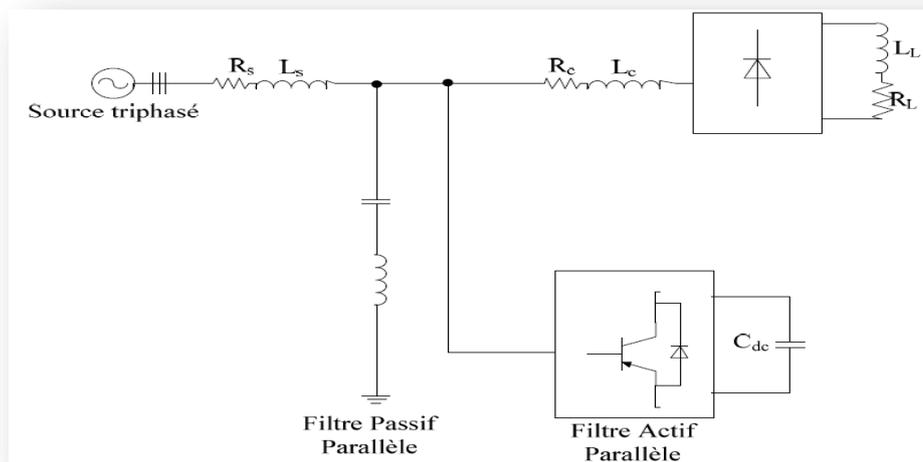


Figure I. 14- Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

I.5 Comparatif et choix du filtrage actif parallèle (FAP)

Le tableau (1.4) montre un récapitulatif des avantages et inconvénients de cinq schémas de dépollution: renforcement de la puissance de court-circuit, filtrage passif, filtrage actif série, filtrage actif parallèle et le filtrage parallèle - série actifs.

Le filtre parallèle - série active compense toutes les perturbations liées à la tension et au courant. Néanmoins, cette solution dite universelle reste difficile à réaliser pratiquement.

Le filtre actif parallèle génère des composantes harmoniques aux mêmes fréquences et en opposition de phase aux perturbations mesurées. Il compense les courants harmoniques engendrés par une charge non linéaire, tout en s'adaptant à l'évolution du récepteur. Cependant, la compensation des harmoniques de tension n'est toujours pas évidente avec cette approche.

En raison de la législation des normes de qualité de l'énergie (surtout la compensation des harmoniques de courant) et les bonnes performances obtenues par le FAP, nous avons retenu cette topologie de compensation pour notre stratégie de dépollution des perturbations harmoniques.

Tableau 1-4: Récapitulatif des méthodes de rejet des courants et des tensions harmoniques

Principes	Avantages	Inconvénients
Renforcement de la puissance de court-circuit	Amélioration de la forme de la tension	Pas d'amélioration de la forme du courant, pas toujours réalisable
filtrage passif	Amélioration de la forme du courant	Risque de résonance, pas adaptabilité
Redresseur dodecaphasé	Harmonique 5, 7, 17, 19 sont éliminés	Harmonique de rang $12k \pm 1$ sont conservés
Filtrage actif série FAS	Amélioration de la forme de la tension, adaptabilité aux variations de charge et du réseau	Pas d'amélioration de la forme du courant
Filtrage actif parallèle FAP	Amélioration de la forme de l'adaptabilité aux variations de charge et du réseau.	Amélioration de la forme de la tension pas toujours évidente.
Combinaison parallèle-série actif UPQC	Amélioration de forme du Courant, amélioration de la forme de la tension, adaptabilité aux variations de la charge et du réseau.	Réalisation difficile

I.6 Conclusion

Afin de réduire la pollution du réseau électrique tout en respectant les limites imposés par les normes standards deux solution ont été présenté, il s'agit notamment des :

- solutions traditionnelles: pénalisés en termes d'encombrement, de résonance et d'adaptation aux variations de la charge et du réseau. Ils sont généralement à base du filtre passif
- Solutions modernes : ce sont généralement des filtres actifs ou hybrides, leurs topologies qui font preuve d'une grande flexibilité face à l'évolution du réseau électrique et de la charge polluante. Nous avons entre autres, le filtre actif parallèle (FAP, le filtre actif série (FAS), La combinaison parallèle-série actifs (UPQC), et enfin nous avons le filtre hybride qui consiste à associer des filtres

actifs et passifs pour trouver un compromis entre l'efficacité de compensation et le coût. Ces solutions peuvent être des solutions futures très prometteuses.

Dans ce contexte et pour la suite de ce travail nous avons retenu le filtrage actif parallèle.

.

II.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté les différentes origines des perturbations affectant les réseaux électriques basse tension (en particulier les harmoniques) et les solutions de dépollution existantes, notamment le filtre actif parallèle qui est composé de deux parties : une partie puissance et une partie commande.

Ce chapitre comporte trois parties :

La première partie décrit le principe de fonctionnement et la structure générale du filtre actif parallèle.

La seconde partie, est consacrée à une étude approfondie de la structure tension des filtres actifs parallèles ou nous détaillons la partie puissance (Onduleur, filtre de découplage, le condensateur de stockage) et la partie commande (Identification des courants de référence, régulation de la tension au borne du condensateur, commande de l'onduleur) du FAP.

Dans la dernière partie une simulation sous Matlab/Simulink de l'ensemble Réseau-filtre actif-charge polluante est effectuée et présentée. Le contrôle des courants du FAP est assuré par un procédé classique utilisant la technique de commande par Hystérésis conventionnel et la régulation de la tension à la borne du condensateur par PI.

II.2 Principe de fonctionnement du FAP

Le FAP est constitué principalement d'un convertisseur statique à base des semi-conducteurs de puissance commandé par un système de contrôle approprié. Il peut être assimilé à une source de courant qui compense en temps réel les courants harmoniques en injectant au niveau du point de raccordement des courants en opposition de phase avec les perturbations harmoniques identifiées.

Dans le cas où l'élément de stockage est un condensateur le FAP est dit à structure tension et dans le cas où l'élément de stockage est réalisé par une inductance, le FAP est nommé à structure courant. Le schéma de principe d'un FAP est donné par la Figure (II-1).

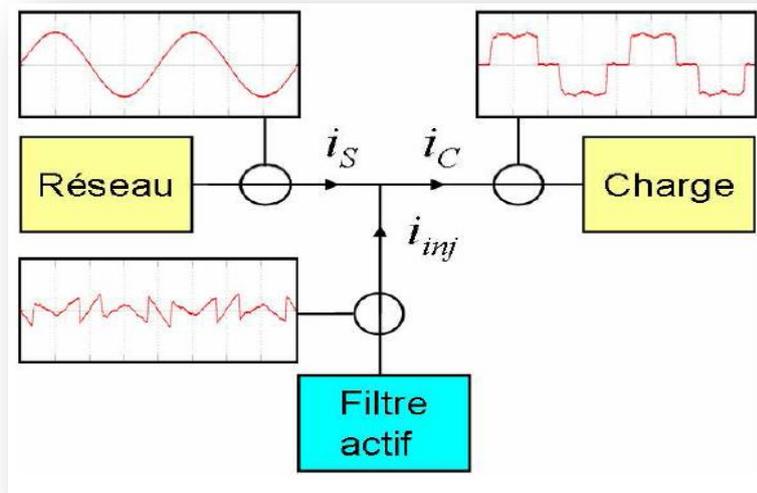


Figure II. 1- Visualisation des courants mis en jeu

Le courant de la source (I_s) est égal au courant de la charge (I_c) moins le courant injecté (I_{inj}) par le filtre.

$$I_s = I_c - I_{inj} \quad (II.1)$$

Le but de ce type de filtre est d'annuler les harmoniques de courant que la charge fournit à la source. Il peut également contribuer à la compensation de la puissance réactive et équilibrer les 3 phases du courant. Les filtres actifs parallèles ont l'avantage d'apporter seulement le courant de compensation et un peu du fondamental du courant fournit pour compenser les pertes du système. Il est aussi possible de connecter plusieurs filtres en parallèle pour approvisionner des courants importants, ce qui rend ce type de circuit adapté pour une large gamme de puissance.[12]

II.3 Structure général d'un FAP

La structure générale d'un filtre actif parallèle se compose de deux parties, soit d'une partie puissance et d'une partie commande.

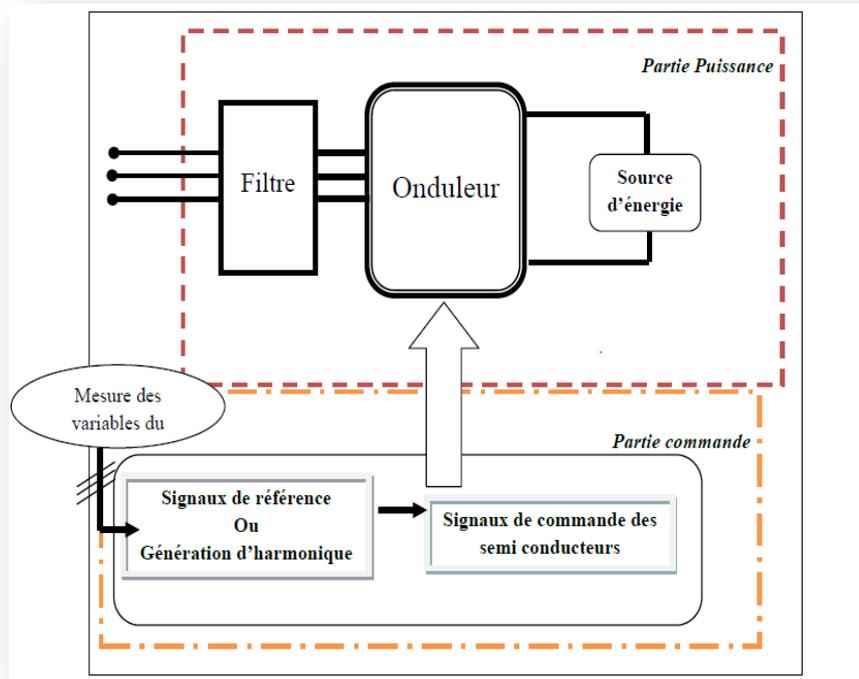


Figure II. 2- Structure générale d'un filtre actif parallèle

On distingue deux types de filtres actifs parallèles, le filtre actif à structure tension et le filtre actif à structure courant.

II.3.1 La structure courant du FAP

Sur la figure (II.3) est illustré le filtre actif parallèle à structure de courant. Seule l'inductance et le filtre passe-bas de deuxième ordre de sortie caractérisent cette structure. L'élément servant de source d'énergie est l'inductance (L_{df}) qui doit délivrer un courant continu de valeur quasi constante, la présence du filtre de couplage sert à filtrer les tensions harmoniques générées par les courants de l'onduleur. Dans le but, d'éliminer le phénomène de résonance, des résistances peuvent être insérées dans le filtre passe-bas.[13]

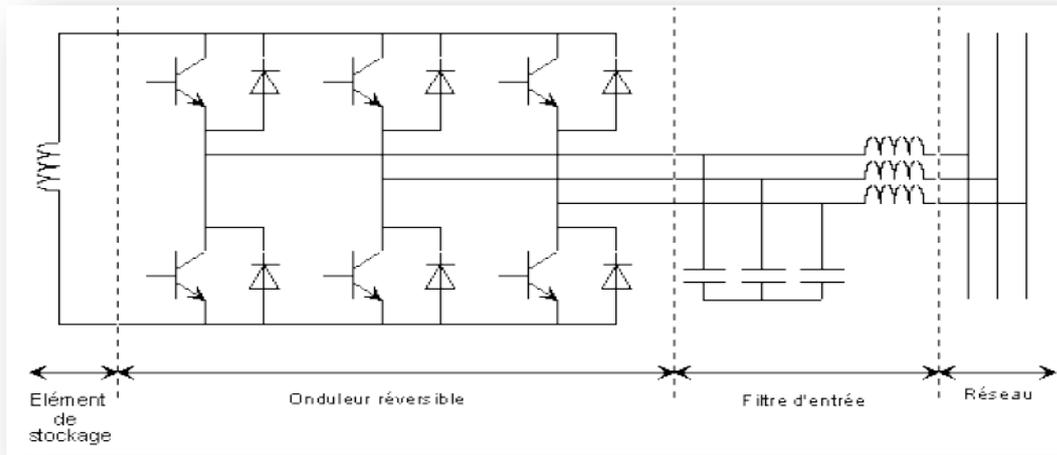


Figure II.3- Filtre actif parallèle à structure de courant

Ce type de filtre peut être installé directement aux bornes du récepteur pollueur pour assurer une dépollution locale et au niveau de l'IGBT pour assurer une dépollution globale.

II.3.2 La structure tension du FAP

La Figure (II.4) présente le filtre actif à structure tension où l'onduleur de tension est connecté en parallèle sur le réseau via un filtre de découplage (L_f , R_f). La capacité C se comporte comme une source de tension continue. La tension V_{dc} aux bornes du condensateur doit être positive et maintenue constante par la commande. Ses fluctuations doivent être faibles d'une part pour ne pas dépasser la limite en tension des semi-conducteurs constituant les interrupteurs et d'autre part pour ne pas dégrader les performances du filtre actif [4].

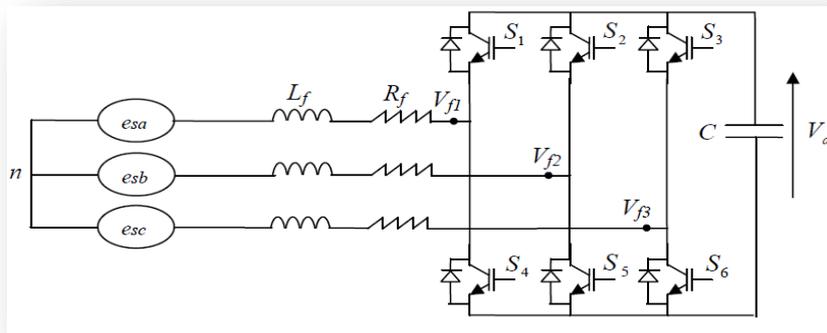


Figure II. 4- Filtre actif parallèle à structure de tension.

Les FAPs à structure tension sont plus fréquemment mis en œuvre dans les applications industrielles pour la simplicité de leur commande, leur coût limité et leur taille physique réduite [14].

Nous avons donc choisi de considérer la structure tension dans ce manuscrit. Le schéma de principe d'un FAP à structure tension est donné par la figure (II.5).

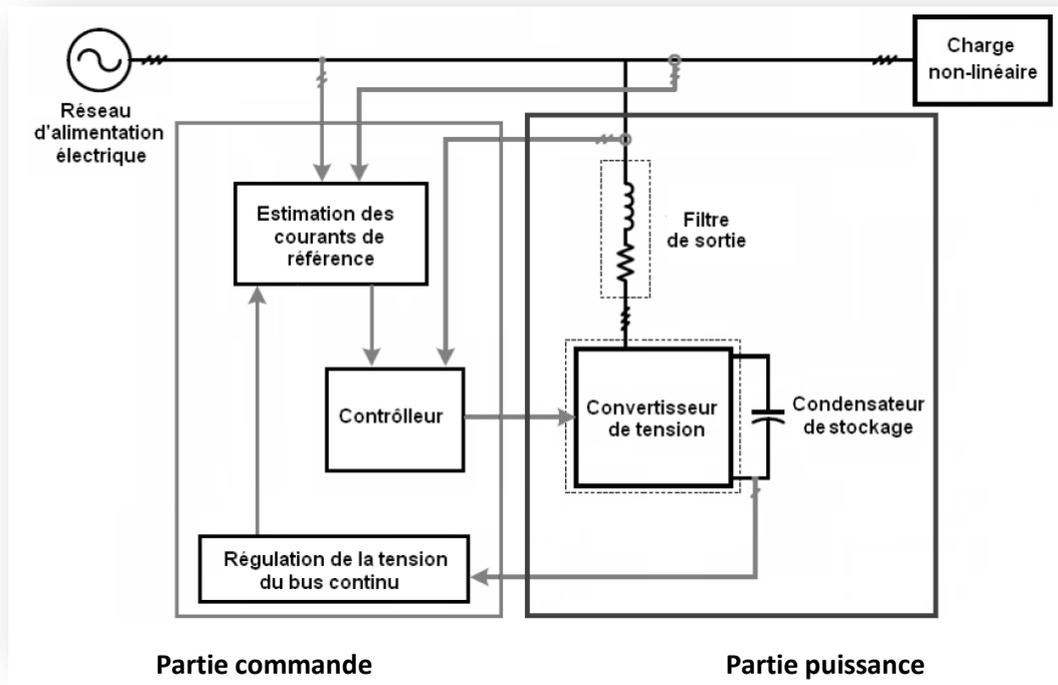


Figure II. 5- Schéma de principe d'un FAP à structure tension

Comme on peut le voir sur la figure ci-dessus un FAP à structure tension est composé de deux parties essentielles : la partie commande et la partie puissance. Ces deux parties seront étudiées dans la suite de ce chapitre.

II.4 Etude de la partie puissance

La partie puissance d'un FAP est constituée :

- D'un onduleur de tension à base d'interrupteurs de puissance, commandables à l'ouverture et à la fermeture (GTO, IGBT, MOSFET, etc....) avec des diodes en antiparallèle.
- D'un circuit de stockage d'énergie.
- D'un filtre de sortie.

II.4.1 L'onduleur de tension triphasé

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continue - alternative à partir d'une source de tension continue, on peut obtenir à la sortie une tension alternative.

Donc, il est possible de produire à la sortie du convertisseur une tension alternative, par une séquence de commande adéquate des interrupteurs.

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

- A un instant donné, un seul interrupteur d'un même bras doit conduire afin d'éviter tout court-circuit de la source de tension,
- Le courant de ligne doit toujours trouver un chemin possible d'où la mise en antiparallèle des diodes au niveau des interrupteurs

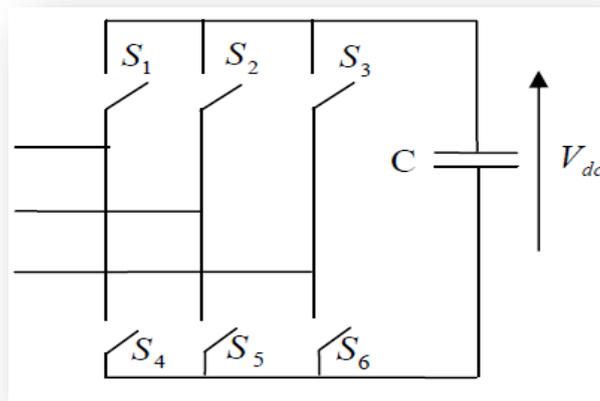


Figure II.6- Onduleur de tension triphasé

En théorie, nous commandons les deux semi-conducteurs d'un même bras de façon complémentaire : la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre. Avec cette hypothèse, l'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur de la figure. (II.6) dépendent de l'état de trois signaux de commande (T1, T2, T3), définis ci-dessous :

$$T_1 = \begin{cases} 1 & S_1 \text{ fermé et } S_4 \text{ ouvert} \\ 0 & S_4 \text{ fermé et } S_1 \text{ ouvert} \end{cases}$$

$$T_2 = \begin{cases} 1 & S_2 \text{ fermé et } S_5 \text{ ouvert} \\ 0 & S_5 \text{ fermé et } S_2 \text{ ouvert} \end{cases}$$

$$T_3 = \begin{cases} 1 & S_3 \text{ fermé et } S_6 \text{ ouvert} \\ 0 & S_6 \text{ fermé et } S_3 \text{ ouvert} \end{cases}$$

En pratique, les deux semi-conducteurs d'un même bras ne doivent jamais conduire en même temps afin d'éviter de court-circuiter la source de tension ; il faut donc générer un temps d'attente, également appelé temps mort, entre la commande au blocage d'un interrupteur et la commande à l'amorçage de l'autre interrupteur du même bras. Ainsi, à partir des états des interrupteurs présentés par les variables T_1 , T_2 et T_3 , on obtient huit cas possibles pour les 3 tensions de sortie du filtre actif V_{fi} (référencées par rapport au point de mi-tension continue), comme le montre le Tableau (II.1) [15].

Tableau II-1 : Tensions en sortie de l'onduleur.

Cas N°	T_3	T_2	T_1	V_{f3}	V_{f2}	V_{f1}
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$
2	0	1	0	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$
3	0	1	1	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$
4	1	0	0	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$
5	1	0	1	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$
6	1	1	0	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$
7	1	1	1	0	0	0

II.4.2 Le système de stockage

Le stockage de l'énergie du côté continu se fait par un système de stockage capacitif représenté par un condensateur C_{dc} qui joue le rôle d'une source de tension continue V_{dc} , comme le montre la figure (II.5). Le choix des paramètres du système de stockage (V_{dc} et C_{dc}) se répercute sur la dynamique et sur la qualité de compensation du filtre actif parallèle. En effet, une tension V_{dc} élevée améliore la dynamique du filtre actif. De plus, les ondulations de

la tension continue V_{dc} , causées par les courants engendrés par le filtre actif et limitées par le choix de C_{dc} , peuvent dégrader la qualité de compensation du filtre actif parallèle. Ces fluctuations sont d'autant plus importantes que l'amplitude du courant du filtre est grande et que sa fréquence est faible. Pour cette raison, nous pouvons estimer que seuls les premiers harmoniques sont pris en compte dans le choix des paramètres du système de stockage.[1]

II.2.3 Filtre de sortie

Le filtre de sortie est un filtre passif utilisé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique. Le filtre de sortie est dimensionné pour satisfaire les deux critères suivants :

- assurer la dynamique du courant :

$$\frac{d}{dt} I_{h_ch} = \frac{d}{dt} I_{inj} \quad (\text{II.2})$$

Avec I_{h_ch} 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.

C'est un filtre de premier Ordre que nous avons utilisé. Ce type de filtre est le plus utilisé dans la littérature [16]. Il est composé d'une inductance L_f de résistance interne R_f , comme le montre la figure (II.5). Un filtre de ce type ne permet pas de satisfaire simultanément les deux critères de dimensionnement du filtre de sortie. En effet, seule une valeur relativement faible de L_f peut réaliser une bonne dynamique du filtre actif en satisfaisant l'égalité (II.2). Malheureusement, une valeur faible de L_f permet à la majorité des composantes dues aux commutations de se retrouver côté réseau et par conséquent d'affecter les installations et les équipements électriques. Inversement, une valeur relativement élevée de L_f va empêcher ces composantes de se propager sur le réseau électrique mais affectera la dynamique du filtre actif et dégradera alors la qualité de compensation. Le bon dimensionnement du filtre de sortie du premier ordre dépendra donc du compromis à trouver entre la dynamique et l'efficacité du filtre actif parallèle. Ce compromis est très difficile à fixer sans l'emploi d'un filtre passif auxiliaire installé à la sortie de l'onduleur ou en amont du côté réseau. Cependant, ce filtre auxiliaire peut causer des effets secondaires non désirés comme la résonance avec d'autres éléments passifs installés sur le réseau électrique. Il occasionne également une consommation de puissance active par sa résistance

d'amortissement. De plus, la qualité de filtrage de ces filtres auxiliaires se dégrade avec le temps à cause du vieillissement de leurs éléments passifs.

II.5 Etude de la partie commande

La partie commande est constituée de :

- La méthode de génération des signaux harmoniques,
- La régulation de la tension V_{dc} ,
- Commande de l'onduleur.

II.5.1 Génération des signaux harmoniques

La qualité de la compensation des harmoniques de courant dépend fortement des performances de la méthode d'identification choisie. En effet, un système de commande, même très efficace, ne pourra pas à lui seul effectuer un filtrage satisfaisant si les courants harmoniques sont mal identifiés. Pour cette raison, des nombreuses méthodes d'identification ont été développées dans la littérature. Elles peuvent être regroupées selon deux approches [17].

- **Identification dans le domaine fréquentiel**

Les méthodes permettant l'identification des courants harmoniques dans le domaine fréquentiel sont principalement basés sur l'analyse de Fourier appliquée aux grandeurs déformées (courants ou tensions) afin d'en extraire les signaux de compensation. En utilisant la transformée de Fourier, les composantes harmoniques de compensation sont d'abord séparées des signaux harmoniques polluants et sont ensuite combinées pour générer les consignes. La fréquence de commutation des semi-conducteurs du filtre actif est généralement maintenue plus grande que deux fois la plus élevée des fréquences harmoniques dans l'objectif d'avoir une compensation effective. Ces méthodes sont bien adaptées aux charges où le contenu harmonique varie lentement. Par ailleurs, elles ont l'avantage d'identifier les harmoniques individuellement : elles permettent donc une compensation sélective.

Il est à noter que l'application on-line de la transformée de Fourier nécessite une grande puissance de calcul afin de réaliser, en temps réel, toutes les transformations nécessaires pour extraire les harmoniques d'où il en résulte un temps de réponse relativement lent.

▪ Identification dans le domaine temporel

Les méthodes du domaine temporel permettent une réponse plus rapide et requièrent moins d'opérations que les méthodes fréquentielles. Le principe de ces types des méthodes est la séparation du fondamental ou de certains harmoniques du reste des harmoniques par le filtrage. Les méthodes les plus importantes sont:

- Méthode des puissances active et réactive instantanées PQ: l'extraction des harmoniques est réalisée à partir de la puissance instantanée calculée en repère fixe, en utilisant la transformée de Concordia [1]. Ainsi, les puissances sont décomposées en une composante continue, liée au fondamental, et en une composante alternative, liée aux harmoniques, qui peuvent être séparées en utilisant un filtre passe-haut ou passe-bas.
- Méthode du référentiel lié au synchronisme SRF: Cette méthode repose sur la transformée de Park et elle est basée essentiellement sur le calcul de la pulsation fondamentale obtenue par une PLL. Cela exige une précision parfaite du calcul de cette pulsation afin de ne pas avoir des courants identifiés erronés [18].
- Méthode de détection synchrone des courants de référence : cette méthode repose sur la génération des courants de référence synchrone avec les trois tensions de la source [17]. Elle ne nécessite pas une PLL et permet d'obtenir d'excellentes performances en particulier dans le cas où la tension réseau n'est pas perturbée.

Dans le cadre de ce travail nous avons choisi d'utiliser la stratégie de commande se basant sur la détection des courants perturbateurs dans le domaine temporel. Trois possibilités d'identification des courants perturbateurs ont déjà été proposées :[13]

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

La méthode la plus utilisée est celle appelée méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées proposé par AKAGI, Cette méthode est valide aussi bien en régime permanent qu'en régime transitoire.

II.5.1.1 Méthode des puissances active et réactive instantanées

La méthode des puissances instantanées a été introduite par H. Akagi. Son principe est basé sur le passage de systèmes triphasés constitués par les tensions simples et les courants de ligne, à un système diphasé (α - β) en utilisant la transformation de Concordia, afin de calculer les puissances réelle et imaginaire instantanées. Ensuite, pour déterminer les courants harmoniques de la charge, la composante fondamentale est transformée en une composante continue et les composantes harmoniques en composantes alternatives. Dans la méthode classique des puissances instantanées, [17] on utilise généralement, soit un filtre passe-haut, soit un filtre passe-bas afin de ne garder que la composante harmonique du signal. Le schéma bloc relatif à cette méthode est représenté par la figure. (II.7).

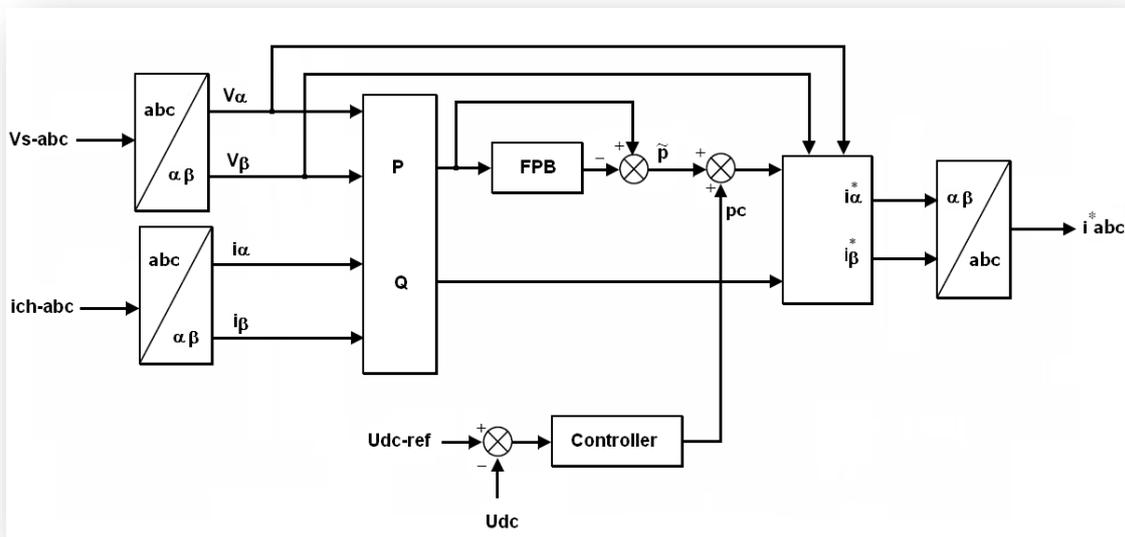


Figure II. 7 Méthode d'identification des puissances actives et réactives instantanées

Notons, respectivement, les tensions simples d'alimentations et les courants de charge d'un système triphasé équilibré par (V_a, V_b, V_c) et (i_a, i_b, i_c) . La transformation de Concordia permet de ramener ce système triphasé équilibré à un système diphasé dont les axes sont en quadrature. Cette transformation appliquée aux tensions réseau et aux courants de ligne mène aux expressions suivantes :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \tag{II.3}$$

(V_a, V_b, V_c) sont les tensions simples de notre système triphasé.

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

Avec (i_a, i_b, i_c) les courant de ligne de notre système triphasé.

La puissance active instantanée p et la puissance réactive instantanée q sont définies par :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

Ce qui nous donne :

$$p = V_\alpha \cdot i_\alpha + V_\beta \cdot i_\beta \quad \text{Puissance active instantanée}$$

$$q = V_\alpha \cdot i_\beta - V_\beta \cdot i_\alpha \quad \text{Puissance réactive instantanée}$$

Les puissances active et réactive instantanées peuvent s'écrire comme la somme d'une composante continue et d'une composante harmonique :

$$\begin{cases} p = \bar{p} + p \\ q = \bar{q} + q \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

Avec \bar{p} et \bar{q} les composantes continues de p et q , et \tilde{p} et \tilde{q} les composantes harmoniques de p et q .

A partir de l'équation (II.5), nous pouvons déduire les expressions des composantes du courant de charge selon les axes $\alpha\beta$:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

Le remplacement de (II.6) dans (II.7) donne les expressions des courants i_α et i_β selon les axes $\alpha\beta$ par :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ \bar{q} \end{bmatrix} + \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

Puisque nous nous intéressons à la compensation simultanée des harmoniques de courant et de l'énergie réactive, dans ce cas nous éliminons la composante continue de p à

l'aide d'un simple FPB et on ajoute la puissance de compensation p_c nécessaire à la régulation de la tension continue V_{dc} à la composante harmonique de la puissance active instantanée.

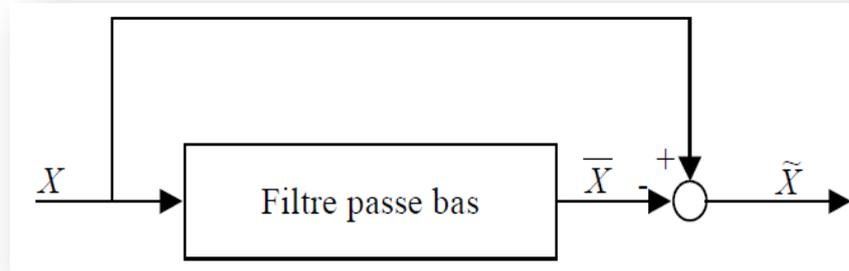


Figure II. 8- Schéma de principe de séparation des puissances

Les courants perturbateurs de référence, notés $i_{\alpha-ref}$ et $i_{\beta-ref}$, s'expriment selon les axes $\alpha\beta$ par :

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & -v_{\beta} \\ v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} + p_c \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

Les courants perturbateurs de référence selon les axes (abc) peuvent être déterminés en utilisant la transformation inverse de Concordia :

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha-ref} \\ i_{\beta-ref} \\ i_{c-ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha-ref} \\ i_{\beta-ref} \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

La méthode des puissances instantanées possède les caractéristiques suivantes :

- C'est une théorie inhérente aux systèmes triphasés.
- Peut être appliquée à tout type de systèmes triphasés (équilibré ou déséquilibré, avec ou sans harmonique).
- Elle est basée sur des valeurs instantanées, ce qui permet d'avoir de bonnes réponses dynamiques.
- Le nombre d'harmoniques compensé dépend de la bande passante des semi-conducteurs utilisé dans l'onduleur du filtre actif.

- Méthode de calcul simple (elle n'est composée que d'expression algébrique et peut être implémentée à l'aide d'un processeur standard).

II.5.2 La régulation de la tension V_{dc}

La tension moyenne V_{dc} aux bornes du condensateur doit être maintenue à une valeur fixe. Les principales causes susceptibles de la modifier sont :

- les pertes statiques et dynamiques dans les interrupteurs de puissance du convertisseur,
- les pertes dans les inductances de découplage L_f ,
- La variation des courants fondamentaux pendant les régimes transitoires de la charge polluante.

En négligeant les pertes de commutation dans le convertisseur ainsi que l'énergie stockée dans l'inductance du filtre de sortie, la fonction de transfert du système est donnée par :

$$G(s) = \frac{1}{C_{dc}s} \quad (\text{II.11})$$

A partir de la relation (II-11), et en prenant en compte le régulateur intégral proportionnel ($K_p + K_i/s$), la boucle de régulation de la tension continue peut être représentée par le schéma de la figure (II.9). Le choix des paramètres K_p et K_i aura pour objectif d'obtenir un temps de réponse minimal afin de ne pas nuire à la dynamique du filtre actif.

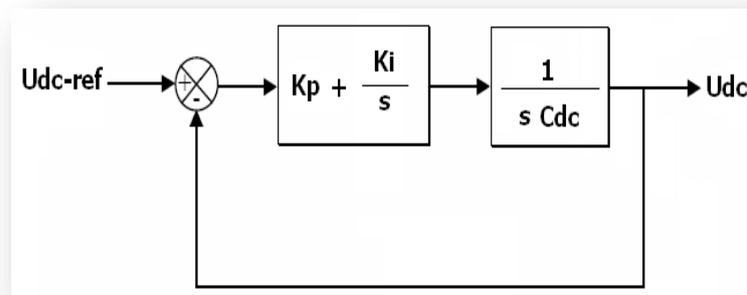


Figure II. 9- Boucle de régulation de la tension continue

La fonction de transfert en boucle ouverte est donnée par :

$$G_{BO}(s) = \left(k_p + \frac{k_i}{s} \right) \frac{1}{C_{dc}s} \quad (\text{II.12})$$

La fonction de transfert en boucle fermée de la boucle de régulation de la tension continue U_{dc} est donnée par :

$$G_{BF}(s) = \frac{\left(1 + \frac{k_p}{k_i} s\right) \frac{k_i}{c_{dc}}}{s^2 + \frac{k_p}{c_{dc}} s + \frac{k_i}{c_{dc}}} \quad (\text{II.13})$$

En comparant cette équation avec la forme générale d'une fonction de transfert de deuxième ordre donnée par :

$$G_{BF}(s) = \frac{\left(1 + \frac{k_p}{k_i} s\right) \omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (\text{II.14})$$

Après identification on trouve:

$$k_i = \omega_n^2 c_{dc} \quad \text{Et} \quad k_p = 2\xi \sqrt{k_i c_{dc}} \quad (\text{II.15})$$

II.5.3 Génération des signaux de commande de l'onduleur

L'objectif de la commande de l'onduleur est de générer les ordres d'ouverture et de fermeture des interrupteurs de sorte que la tension créée par l'onduleur soit la plus proche de la tension de référence. Il existe plusieurs méthodes de commande de l'onduleur, ici nous présentons deux de ces méthodes :

- commande par hystérésis,
- commande par MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion).

II.5.3.1 Commande par MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion)

Le principe du contrôle par MLI est décrit à la figure (II.10). Dans ce cas, la différence entre le courant référence I_{ref} et le courant réel I_{inj} est appliquée à l'entrée d'un régulateur. Le signal de sortie du régulateur, appelé modulatrice, est ensuite comparé à un signal triangulaire de fréquence fixe (porteuse) afin de déterminer les ordres de commutations des interrupteurs. La fréquence de la porteuse triangulaire fixe donc la fréquence de découpage des semi-conducteurs de puissance.

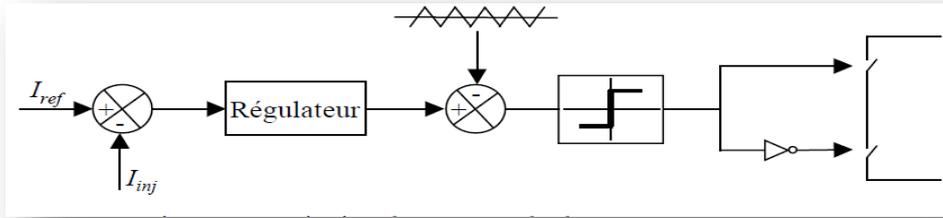


Figure II.10- Principe de la commande par MLI.

Le contrôle par MLI est d'une complexité réduite; il garantit un fonctionnement à fréquence fixe et conduit à un contenu harmonique parfaitement identifié. Cependant, cette technique a des propriétés dynamiques qui peuvent être limitatives et la réponse du système lors d'un changement brutal des courants de référence est plus lente que celle d'une commande par hystérésis. [4]

II.5.3.2 Commande par hystérésis

La commande par hystérésis est couramment utilisée de par sa simplicité d'utilisation et sa robustesse. En fait, cette stratégie assure un contrôle satisfaisant du courant sans exiger une connaissance poussée du modèle du système à contrôler ou de ses paramètres. La figure (II.11) donne son principe qui consiste à établir dans un premier temps le signal d'erreur, différence entre le courant de référence i_{ref} et le courant produit par le filtre i_f . Cette erreur est ensuite comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis afin de fixer les ordres de commande des interrupteurs. Cette commande présente cependant un inconvénient majeur : elle ne permet pas de contrôler la fréquence de commutation des semi-conducteurs, d'où la présence d'un nombre important d'harmoniques dans les courants générés. [4]

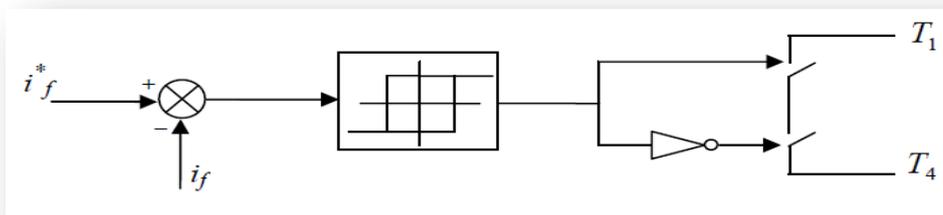


Figure II.11- Commande conventionnelle par hystérésis

Cette commande est une des méthodes les plus utilisés et les plus appropriées pour les applications d'onduleurs contrôlés en courant dans les filtres actifs de puissance. La simplicité de sa mise en œuvre et sa robustesse sont ses principaux avantages.

Cependant la fréquence de commutation variable peut être son inconvénient, mais celui-ci peut être remédié par une autre version de contrôle hystérésis avec une fréquence de commutation fixe appelée hystérésis modulé.

II.6 Modèle Réseau - charge polluante - filtre actif parallèle

Présentation du système étudié:

La figure II.12 montre le modèle sous SIMULINK de l'ensemble Réseau – Charge polluante filtre actif parallèle

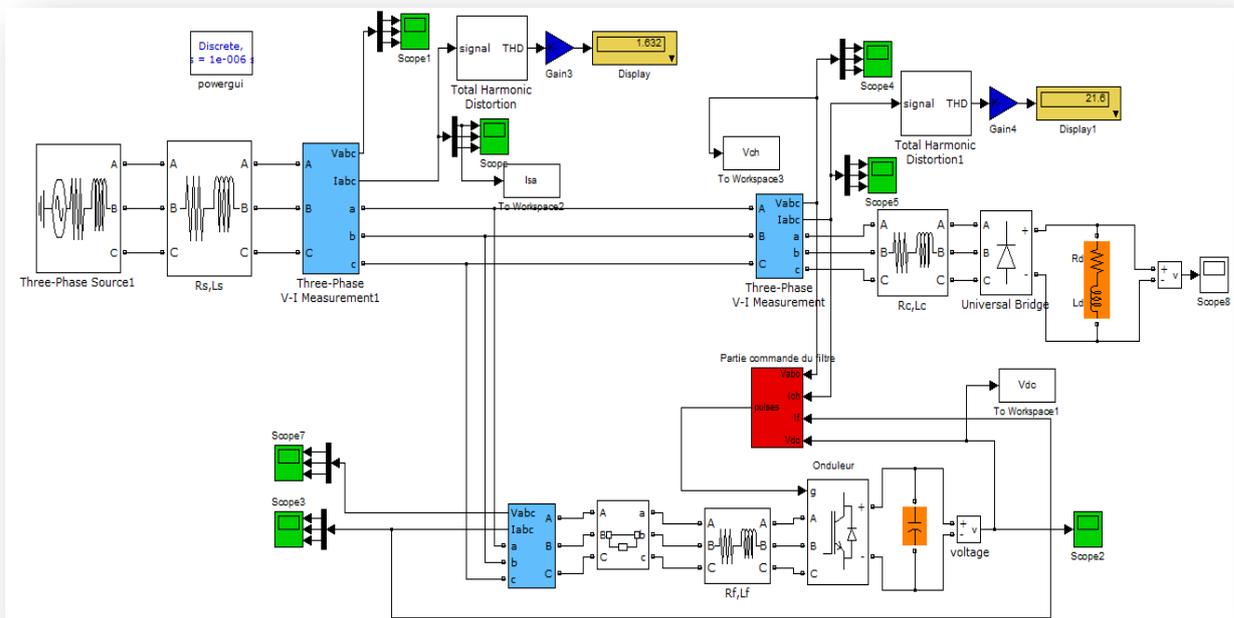


Figure II.12- Schéma global du système sous Matlab Simulink

Ce système comporte :

- **Le réseau d'alimentation** : c'est une source de tension triphasée parfaitement sinusoïdale. (la tension simple : $V_s = 220$ v, la fréquence: $f = 50$ Hz, Résistances et Inductances de chaque source d'alimentation ($R_s = 3.5$ m Ω , $L_s = 0.023$ mH).
- **La charge polluante** : elle se compose d'un redresseur triphasé alimentant une charge RL ($R_{ch} = 0.82$ m Ω , $L_{ch} = 0.8$ H).

- **Le filtre actif parallèle** : composé d'un onduleur de tension triphasé, placé en parallèle avec le réseau, un filtre de sortie (composé d'une inductance L_f placée en série avec une résistance R_f , $L_f=3\text{mH}$ $R_f=5\text{m}\Omega$), et un circuit de commande qui se compose essentiellement de deux blocs :
- Bloc de calcul des courants de références : dont la méthode PQ et le régulateur PI pour la régulation de tension V_{dc} .
- Bloc de la commande Hystérésis.

II.6.1 Résultats de Simulation sans filtrage

Les figures (II.13, II.14 et II.15) montrent respectivement l'allure de : la tension de charge, courant de source, et le spectre du courant de source.

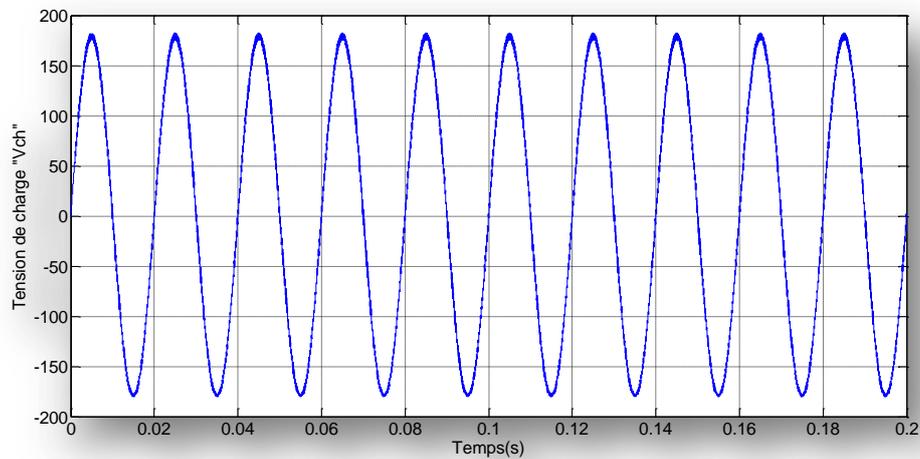


Figure II.13- Tension de charge de la phase a (V_a)

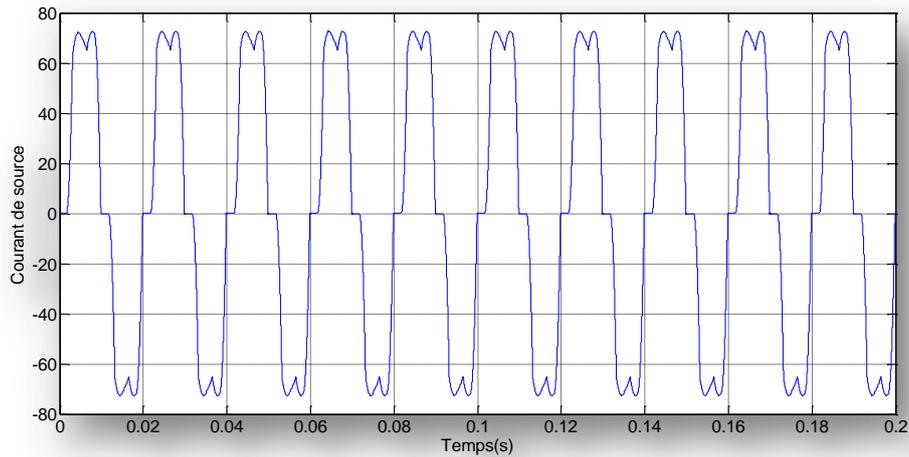


Figure II.14- courant de source de la phase a (I_{sa})

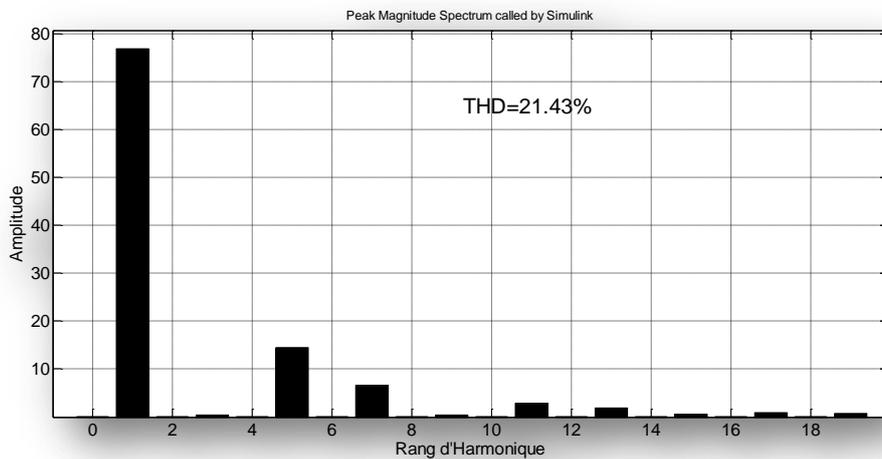


Figure II.15- Spectre de courant de source

On peut noter que le courant de source est très perturbé, son spectre montre la forte présence des harmoniques 5, 7, et 11.

On note que le THD de ce courant est de 21.43%; tandis que la norme IEEE nous impose un $THD < 5\%$, ce que nous allons essayer d'atteindre avec le filtre actif.

II.6.2 Résultat de Simulation après Filtrage

La commande hystérésis à bande fixe est utilisée pour le contrôle du courant injecté. Les figures (II.16, II.17, II.18, II.19) montrent respectivement l'allure du courant de la source I_{sa} , le spectre du courant de source, le courant du filtre et la tension V_{dc} après l'utilisation du filtrage actif.

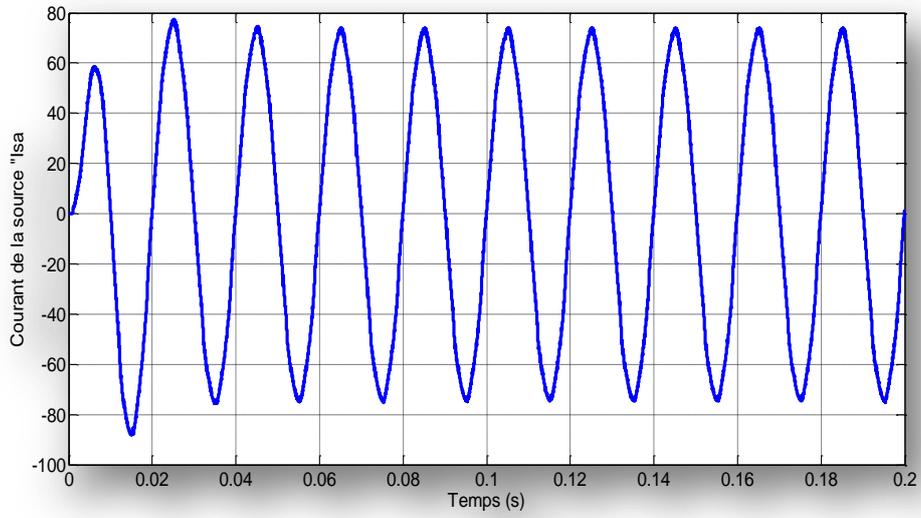


Figure II.16- Courant de source I_{sa} après filtrage

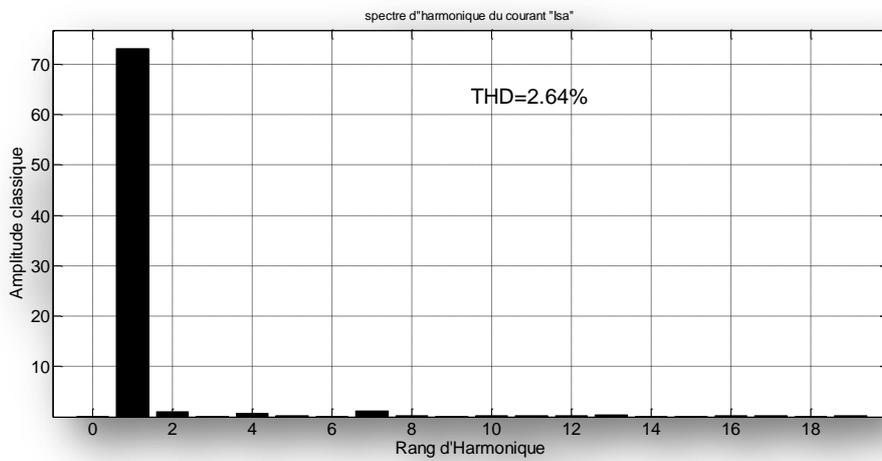


Figure II.17- spectre de courant de la source

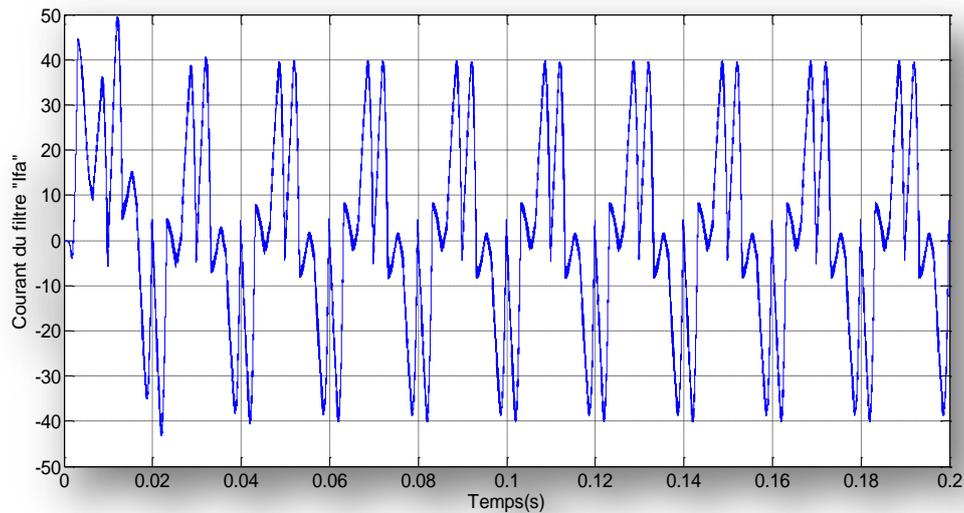


Figure II.18- Courant injecté par le filtre I_{fa}

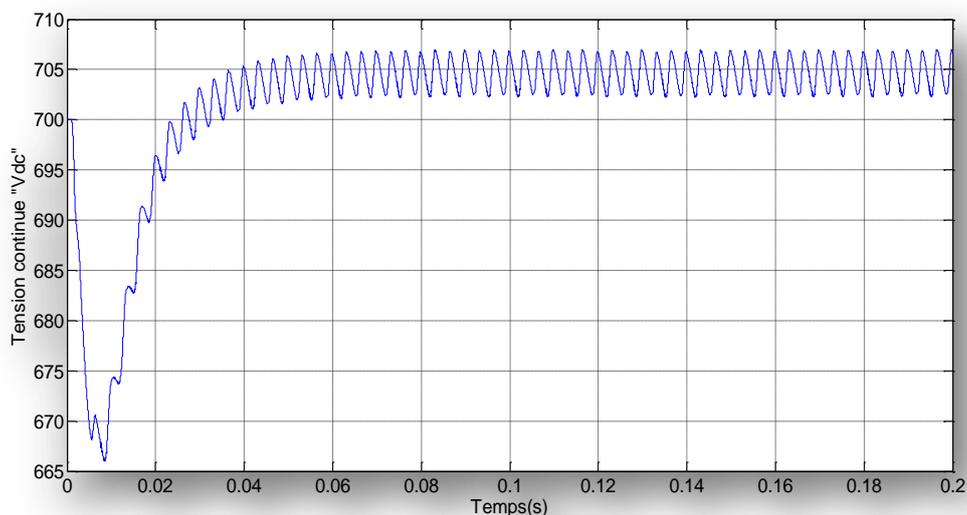


Figure II.19- La tension V_{dc} du condensateur

On note une amélioration remarquable du courant de la source, son spectre montre un THD=2.64% qui est bien inférieur au 5% imposé par la norme IEEE, donc on peut conclure que notre courant I_{sa} a bien été dépollué à un niveau satisfaisant. Nous remarquons aussi que la tension V_{dc} à la borne du condensateur est régulée.

II.7 Conclusion

Le présent chapitre a montré les différentes structures du filtre actif parallèle ainsi que les différentes stratégies de commande qui le caractérisent. En premier lieu, sa partie

puissance a été présentée. Pour la partie commande, nous avons présenté la technique d'identification des perturbations basée sur la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées et pour la restitution des courants identifiés dans le réseau avec un minimum d'erreur afin d'atteindre les objectifs de compensation, les deux principales techniques de commande de l'onduleur à savoir la commande hystérésis et la commande MLI ont été présentés.

Les résultats de simulation obtenus montrent l'efficacité de la commande hystérésis en plus de son adaptation à ce genre d'applications. Sauf qu'il faut noter qu'elle présente un inconvénient dans sa fréquence de commutation qui est trop élevée.

Dans le but de résoudre le problème liée à la fréquence de commutation de la bande d'hystérésis et d'améliorer le THD pour avoir une valeur inférieure à 2.64% nous développons un nouvel algorithme de commande en associant la commande hystérésis à une technique de contrôle intelligent à savoir la logique floue.

III.1 Introduction

Le réglage conventionnel des systèmes repose essentiellement sur le dimensionnement des paramètres du régulateur à partir de la modélisation du système global, mais il est souvent difficile, voire impossible d'avoir un modèle mathématique rigoureux permettant de mettre en œuvre une commande assez robuste pour satisfaire les exigences du cahier de charge. C'est pourquoi la recherche s'est orientée vers d'autres techniques permettant de dépasser ce problème à savoir le réglage par logique floue. Ce type de réglage ne nécessite d'établir aucun modèle du système à régler. Une approche floue est fondée sur l'exploitation des descriptions linguistiques des caractéristiques dynamiques du système, fournie par l'expertise humaine pour générer une loi de commande. L'intérêt de la logique floue réside premièrement dans sa similitude avec le raisonnement humain. La prise de décision d'un opérateur est fonction de plusieurs variables décrites de manière qualitative et non grâce à des valeurs numériques précises. Deuxièmement, cette logique est intéressante car elle permet la prise de décision malgré l'absence d'une modélisation de système amont complexe comme le cas des systèmes non linéaires ou à structure variable (convertisseurs statiques).

Dans ce chapitre, on présentera un aperçu général sur les concepts fondamentaux utilisés en logique floue et ses principes de base. Ensuite, on passe à la technique de commande du courant par un contrôleur flou hystérésis afin de l'appliquer au réglage de courant injecté par le filtre actif parallèle.

III.2 Historique de la logique floue

La logique floue est une théorie qui a connu un grand engouement depuis que le professeur Lotfi Zadeh a introduit le concept de sous-ensembles flous en 1965, et qui a vu sa véritable première application expérimentale a été réalisée avec succès en 1974 par l'équipe du professeur E.H. Mamdani [19]. Dès 1975, on trouve les premières applications au niveau des systèmes de réglage. A partir de 1985 environ, ce sont les Japonais qui commencent à utiliser la logique floue dans des produits industriels pour résoudre des problèmes de réglage et de commande, tout récemment, en Europe et en Amérique du Nord, une intense activité de recherche a débuté afin d'introduire le principe du réglage par logique floue[20].

Aujourd'hui, la logique floue est arrivée à maturité et est utilisée dans de nombreux produits destinés au "grand public" notamment au Japon. Sa mise en œuvre est maintenant

facilitée par la disponibilité de microprocesseurs dédiés et d'outils puissants de développement.

III.3 Principe de la logique floue

Le principe du réglage par logique floue s'approche de la démarche humaine dans le sens que les variables traitées ne sont pas des variables logique (au sens de la logique binaire par exemple) mais des variables linguistiques, proche du langage humain de tous les jours. De plus, ces variables linguistiques sont traitées à l'aide de règles qui font références à une certaine connaissance du comportement du système[21].

Toute une série de notions fondamentales sont développées dans la logique floue. Ces notions permettent de mieux comprendre avant d'aborder, le raisonnement en logique floue, il est nécessaire de définir ses bases.

III.3.1 Les bases de la logique floue

Les éléments constituant la théorie de base de la logique floue sont [22]:

- Les variables linguistiques et les ensembles flous ;
- Les fonctions d'appartenance ;
- Les inférences à plusieurs règles floues.

III.3.1.1 Variables linguistiques et les ensembles flous

On désigne par variables linguistiques, les termes utilisés lors de la description d'une situation, de phénomènes, ou de procédés tels que : la température, l'âge, la vitesse, couleur,etc.

Cette collection d'objets ayant en commun une ou plusieurs propriétés qui les caractérisent nommé par un ensemble.

L'expression de cette opération sera debout, accroupi, assis ou allongé pour décrire des positions ; pour la description d'un procédé, elle sera formulée en général avec une succession de condition suivies d'opérations tel que :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{si condition1 alors operation1 ou} \\ \text{si condition2 alors operation2 ou} \\ \quad \cdot \\ \quad \cdot \\ \text{si condition n alors operation n} \end{array} \right\}$$

III.3.1.2 Les fonctions d'appartenance

Les valeurs des variables linguistiques sont la traduction linguistique que de divers états de ces dernières tel que : froid, tiède et chaud sont des valeurs de la variable linguistique température. Ceci permet de décrire un processus sans avoir à son traitement numérique.

Les fonctions couramment utilisées sont :

- **Fonction d'appartenance triangulaire** : Elle est définie par une valeur inférieure, une valeur supérieure et une valeur modale m de sorte que : $a < m < b$

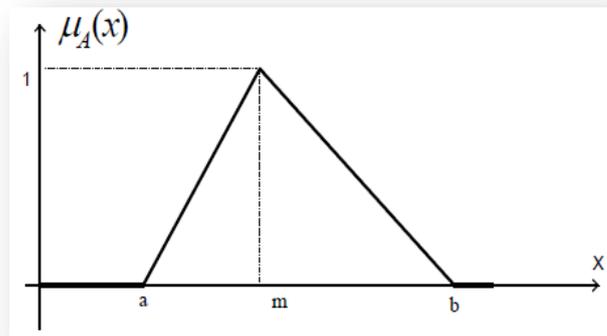


Figure III.1- Fonction d'appartenance triangulaire

- **Fonction d'appartenance singleton** : La fonction d'appartenance prend la valeur 0 dans tout l'univers de discours sauf au point m où il prend la valeur 1.

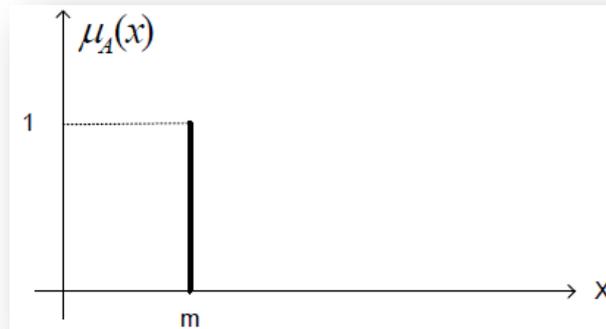


Figure III.2- Fonction d'appartenance singleton

- **Fonction d'appartenance gaussienne** : Elle est définie par sa moyenne m et son écart type σ .

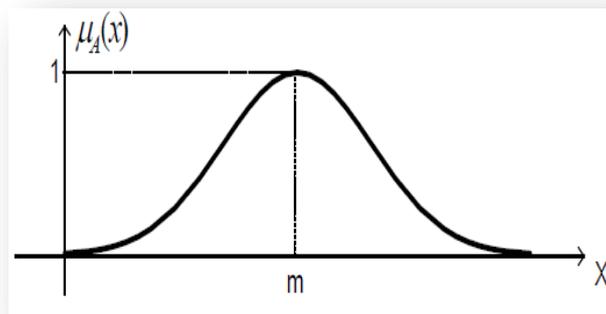


Figure III.3- Fonction d'appartenance gaussienne

III.3.1.3 Univers de discours

Un des premiers pas dans la conception d'une commande par logique floue est de définir l'ensemble de référence ou univers de discours pour chaque variable linguistique. On appelle univers de discours, le domaine de variation de la variable linguistique.

A titre d'exemple ; l'ensemble "x" (erreur) peut être caractérisé par un ensemble de sous-ensemble (ou de nombres flous) dont les fonctions d'appartenance sont montrées à la figure (III.4) et chaque sous ensemble flou dans l'univers de discours représente une valeur linguistique.

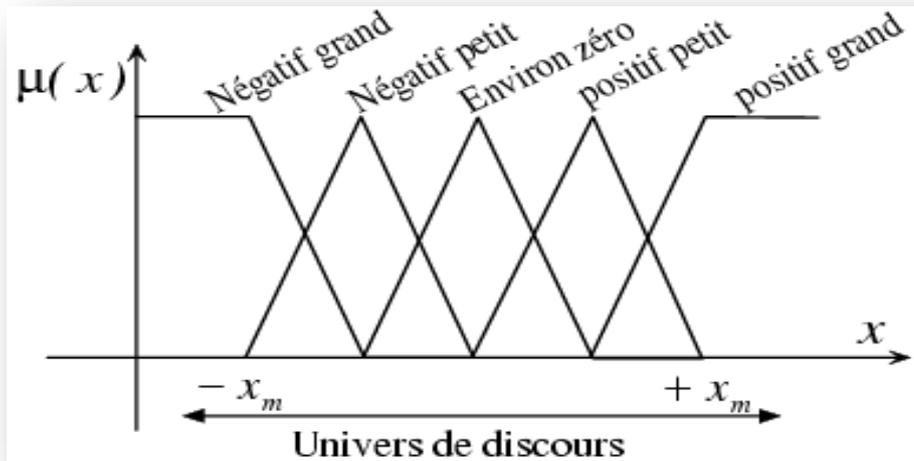


Figure III.4- Univers de discours d'une variable linguistique

III.3.1.4 Les inférences (ou déduction floues)

En général, plusieurs valeurs des variables linguistiques convenablement définies par des fonctions d'appartenance, sont liées entre elles par des règles, afin de tirer des conclusions. On peut distinguer deux types de règles d'inférences :

- Inférence avec une seule règle;
- Inférence avec plusieurs règles.

III.3.1.4.1 Inférence avec une seule règle

Cette règle est appliquée dans des domaines non techniques lorsqu'il faut choisir un élément (qui représente l'optimum) parmi un ensemble.

Si x_1, x_2, \dots, x_n sont les variables linguistiques pour évaluer une certaine situation, le critère pour la prise de décision peut être formulé par une règle, comme par exemple :

$$Y = [x_1 \text{ ou } (x_2 \text{ et } x_3) \text{ ou } \dots] \text{ et } x_n.$$

A chaque variable formant un ensemble est attribuée une fonction d'appartenance $\mu(x_1), \mu(x_2), \dots, \mu(x_n)$.

Dont les valeurs numériques (facteurs d'appartenance) qui sont en générale différentes pour chaque élément $I=1, 2, \dots, n$.

III.3.1.4.2 Inférence avec plusieurs règles

Dans ce cas présent, lorsqu'une ou plusieurs variables nécessitent une prise de décision différente suivant les valeurs qu'atteignent ces variables ; ces dernières sont des variables linguistiques donc des variables floues.

Cette problématique se présente essentiellement pour des problèmes de réglage et de commande, et la prise de décision conduit à l'exécution d'une certaine opération. Les règles peuvent alors être exprimées sous la forme générale.

Opération :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{si condition1 alors operation1 ou} \\ \text{si condition2 alors operation2 ou} \\ \quad \cdot \\ \quad \cdot \\ \text{si condition n alors operation n} \end{array} \right\}$$

III.4 Opération sur la logique floue

Au niveau des inférences, les variables linguistiques sont liées entre elles par des opérations de la logique floue tel que « **ET** » « **OU** » qui interviennent sur les fonctions d'appartenance représentant les variables linguistiques.

Les opérateurs logiques «et, ou, non» peuvent se définir à partir des ensembles flous, de façon analogue à la théorie des ensembles classiques. Rappelons que ceux-ci sont définis respectivement par l'intersection, la réunion et le complémentaire.

Si A et B sont deux sous-ensembles flous et $\mu(A)$ et $\mu(B)$ leur fonction d'appartenance, on définit:

- Le complémentaire de A, \bar{A} , par la fonction d'appartenance:

$$\mu(\bar{A}) = 1 - \mu(A) \quad (\text{III.1})$$

- Le sous-ensemble A et B, $A \cap B$, par la fonction d'appartenance:

$$\mu(A \cap B) = \min(\mu(A), \mu(B)) \quad (\text{III.2})$$

- Le sous-ensemble A ou B, $A \cup B$, par la fonction d'appartenance:

$$\mu(A \cup B) = \max(\mu(A), \mu(B)) \quad (\text{III.3})$$

t-norme appelé aussi intersection floue: C'est une opération binaire: $T:[0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$

Elle respecte les propriétés suivantes:

- Commutativité: $x \ T \ y = y \ T \ x$
- Associativité : $x \ T \ (y \ T \ z) = (x \ T \ y) \ T \ z$
- Mono tonicité : si $x \leq y$ et $w \leq z$ alors $x \ T \ w \leq y \ T \ z$.
- Conditions aux limites: et $0 \ t \ 0 = 0$ et $x \ t \ 1 = x$

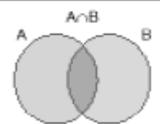
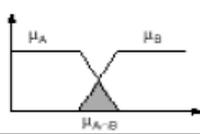
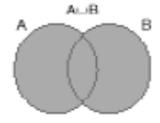
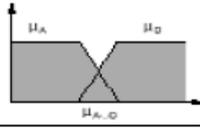
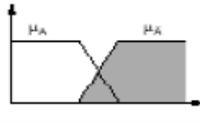
t-conorme ou s-norme appelé aussi union floue : C'est une opération binaire:

$$S:[0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$$

Elle respecte les propriétés suivantes [23] :

- Commutativité : $x \ S \ y = y \ S \ x$
- Associativité : $x \ S \ (y \ S \ z) = (x \ S \ y) \ S \ z$
- Mono tonicité : si $x \leq y$ et $w \leq z$ alors $x \ S \ w \leq y \ S \ z$.
- Conditions aux limites : et $0 \ S \ 0 = 0$ et $x \ S \ 1 = x$

Tableau III-1 Relations sur les ensembles flous.

		Opérateur de ZADEH	Opération logique	
Intersection		$\mu_{A \cap B} = \text{MIN} (\mu_A, \mu_B)$	ET	
Union		$\mu_{A \cup B} = \text{MAX} (\mu_A, \mu_B)$	OU	
Négation		$\mu_{\bar{A}} = 1 - \mu_A$	NON	

III.5 Systèmes flous et contrôleur flou

Un système flou (SF) est une relation non linéaire qui permet de prendre des données numériques (entrées nettes), les faire passer dans un domaine flou puis avoir une sortie scalaire (sortie nette). La structure générale de ce traitement est donnée par la figure suivante:

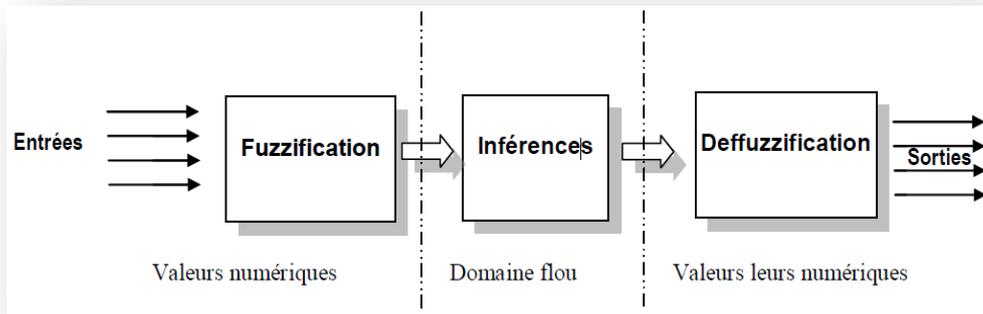


Figure III.5- Traitement flou (schéma global)

III.5.1 Constitution d'un système flou

Un système flou est composé de quatre parties essentielles:

- La base de connaissance constituée d'une base de données et d'une base de règles,
- Le système d'inférence,
- L'interface de fuzzification.
- L'interface de défuzzification.

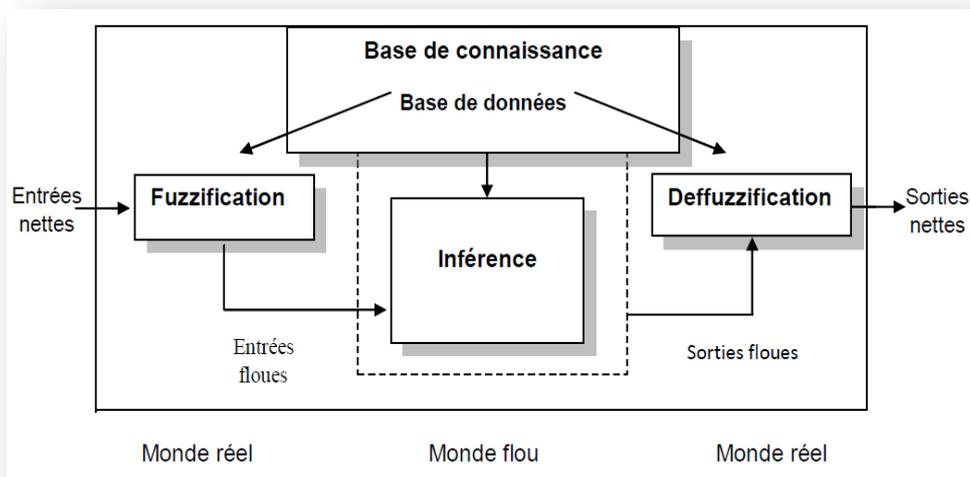


Figure III.6- Schéma générale d'un système flou

III.5.2 Etape de mise en œuvre d'un Contrôleur flou

Un contrôleur flou n'est autre qu'un système flou conçu pour commander un processus. Sa structure générale est traduite par le schéma donné par la figure (III.7). Un contrôleur flou passe généralement par les étapes suivantes:

- Le choix de la stratégie de fuzzification ;
- L'établissement de la base des règles ;
- Choix de la méthode d'inférence ;
- Choix de la stratégie de déffuzzification.

La description de chacune de ces étapes est donnée ci-dessous :

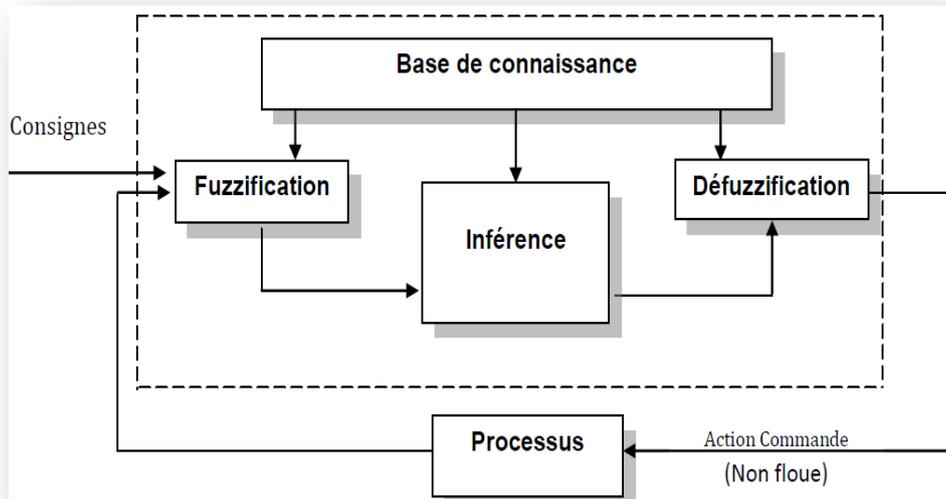


Figure III.7- Schéma général d'un Contrôleur flou

III.5.2.1 Etape de fuzzification

L'étape de fuzzification consiste à définir des ensembles flous pour les variables d'entrée et de sortie.

Pour chacune de ces variables, on doit connaître a priori son intervalle de définition. Dans la plupart des cas, le régulateur flou reçoit comme variables d'entrée, l'erreur entre la sortie du processus et le signal de consigne ainsi que la variation de cette erreur. La dérivée de cette erreur suffit pour représenter sa variation.

Ainsi la loi de commande peut être schématisée comme suit :

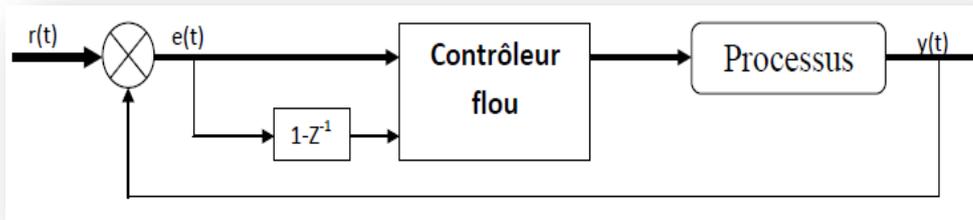


Figure III.8- Schéma de principe d'un régulateur flou

Cette étape consiste à définir les fonctions d'appartenance pour les différentes variables, en particulier les variables d'entrées, on réalise ainsi le passage des grandeurs physiques en variables linguistiques (variables floues) qui peuvent être traitées par les inférences.

La forme de ces sous-ensembles, définie par :

- ⇒ Les fonctions d'appartenance, leurs positions ainsi que leurs chevauchements peuvent être choisis librement, cependant il convient de respecter certaines règles:
- Leur forme doit être convexe.
 - Les sous-ensembles d'entrées (souvent des trapèzes) doivent se chevaucher partiellement afin qu'il n'y ait pas de zones indéterminées, tandis que pour ceux de sorties (souvent des triangles), cette précaution n'est pas nécessaire.
 - Eviter d'imbriquer plus de deux sous-ensembles, sinon il y a des problèmes d'instabilité

III.5.2.2 La base de règles

Une base de règles floues est une collection de règles qui permet de lier les variables floues d'entrée et de sortie. La description de la commande se fait par l'intermédiaire de ces règles qui ont la forme suivante :

Si x_1 est A_1 et x_2 est A_2 Alors y est B

Où x_1 , x_2 et y sont les grandeurs physiques caractéristiques du système. A_1 , A_2 et B sont les termes linguistiques. Le **ET** de conjonction est réalisé en effectuant le minimum entre les degrés de vérité des propositions floues x_1 est A_1 et x_2 est A_2 .

III.5.2.3 Etape d'inférence << Le moteur d'inférence >>

Les inférences lient les grandeurs mesurées et les variables de sortie par des règles linguistiques. Ces règles sont combinées en utilisant les connections **ET** et **OU**.

Supposons que le régulateur flou ait deux entrées convenablement transformées en variables linguistiques x et y et une sortie z , et que l'on a défini n règles linguistiques comme suit :

Si $x = A_1$ ET $y=B_1$, Alors $z= C_{11}$ OU

Si $x = A_1$ ET $y=B_2$, Alors $z= C_{12}$ OU

Si $x = A_1$ ET $y=B_j$, Alors $z= C_{ij}$ OU

.....

Si $x = A_n$ ET $y=B_n$, Alors $z= C_{nn}$

Une simplification de cette représentation peut être obtenue en utilisant la matrice d'inférence montrée au tableau (III.2) où l'intersection entre une colonne et une ligne indique la valeur linguistique correspondante à la variable de sortie. Où A_i, B_j et C_{ij} ($i=1, n$ et $j=1, m$) sont les sous-ensembles flous définis dans les ensembles de référence pour x , y et z respectivement. En toute généralité, n'importe quelle combinaison des opérateurs **ET**, **OU** et **NON** peut apparaître dans la condition d'une règle, suivant les conditions imposées par le système à régler.

Tableau III-1: Matrice d'inférence

		x						
		A_1	A_2	.	.	A_i	.	A_n
y	B_1	C_{11}	C_{21}	.	.	A_{i1}	.	C_{n1}
	B_2	C_{12}	C_{22}	.	.	C_{i2}	.	C_{n2}

	B_j	C_{1j}	C_{2j}	.	.	C_{ij}	.	C_{nj}

	B_n	C_{1n}	C_{2n}	.	.	C_{in}	.	C_{nn}

Il y a plusieurs sortes d'inférence floues, elles se différencient essentiellement par la manière dont vont être réalisés les opérateurs flous utilisés dans les règles d'inférence, les plus utilisées sont

- Méthode d'inférence max-min ;
- Méthode d'inférence max-prod ;
- Méthode d'inférence somme-prod.

Ainsi pour toutes les combinaisons possibles des entrées, on va définir une règle. Cette règle nous indique à quel sous-ensemble de sortie, le coefficient de modification va être attribué. Pour le choix de la méthode dépend de l'utilisateur et du cas à traiter. Dans notre cas on va employer la méthode de *Mamdani*.

- **Méthode de Mamdani**

Elle consiste à prendre le minimum parmi les conditions liées par l'opérateur ET, et à prendre le maximum des conditions liées par l'opérateur OU, ensuite prendre en tout point de l'ensemble représentant la conclusion, le minimum entre la valeur de cet ensemble et celle du maximum des conditions. L'ensemble représentant la commande s'obtient en choisissant en tout point le maximum des ensembles flous résultants des règles.

III.5.2.4 Etape de défuzzification

En sortie, le système flou ne peut pas communiquer des valeurs floues qu'il peut seul exploiter. Il lui est donc nécessaire de fournir des valeurs précises, c'est le rôle de la défuzzification.

Cette étape s'effectue toujours à l'aide des fonctions d'appartenance. A partir des degrés d'appartenance, on obtient autant de valeur précise à utiliser, on peut soit conserver le maximum, soit calculer la moyenne pondérée, soit déterminer le centre de gravité des valeurs obtenues. Différentes méthodes sont utilisées :

- Méthode du maximum ;
- Méthode de la moyenne des maximums ;
- Méthode du centre de gravité ;
- Méthode des hauteurs pondérées

III.6 Commande floue du filtre actif parallèle

Comme dans la commande du filtre actif par un procédés classique, le rôle du régulateur et d'éliminer sinon de réduire l'erreur entre le courant de référence et celui injecté par l'onduleur de tension.

Il y a deux philosophies principales pour la commande par logique floue ;

III.6.1 Commande par un régulateur flou standard

C'est La commande directe des grandeurs électriques par régulateur flou. Pour la commande en courant du filtre actif, le vecteur d'entrée peut avoir une composante qui est l'erreur de courant " ou bien deux composantes ; l'erreur du courant et sa variation $(\varepsilon, \Delta\varepsilon)$.

$$\begin{aligned}\varepsilon &= i_c^*(t) - i_c(t) \\ \Delta\varepsilon &= \varepsilon(t) - \varepsilon(t-T)\end{aligned}\tag{III.4}$$

Dans le premier cas, la valeur de la commande est calculée directement à partir de l'erreur ε Par ailleurs, l'ajout de la variation de l'erreur du courant $\Delta\varepsilon$ comme une deuxième entrée pour le régulateur flou est toujours préférable car ceci permet d'améliorer les performances du filtre actif et d'avoir une meilleure dynamique.

III.6.2 Combinaison avec d'autres techniques de réglage

La commande floue a montré son efficacité lorsqu'elle est appliquée seule, mais permet également de régler des paramètres de régulations existantes [19]. Ainsi des études de recherche appliquée montrent qu'il est encore plus intéressant de conjuguer l'utilisation de la logique floue avec des commandes traditionnelles afin de robustifier celles-ci et donner naissance à des régulateurs simple et robuste comme par exemple flou-hystérésis PI-flou ou PID-flou [24].

La combinaison entre un régulateur par logique flou et d'autres techniques robustes de réglage permet également d'améliorer les performances globales, on peut citer dans ce sens quelques possibilités comme la commande flou-mode de glissement (Fuzzy sliding mode control), la commande neuro-floue [25]...etc.

Dans le cadre de notre travail, nous avons choisi cette dernière technique, pour cela nous avons proposé de combiner entre un régulateur flou et un régulateur à hystérésis dont les propriétés sont déjà connues.

III.7 Commande de courant par un contrôleur flou hystérésis

Nous allons présenter l'application de cette technique au contrôle du courant du filtre actif mais avec un régulateur à hystérésis adaptatif par logique floue. Le principe de ce régulateur est le même que celui d'un régulateur classique sauf qu'ici la bande d'hystérésis est variable en fonction du point de fonctionnement, ceci est bien sûr pour garder la fréquence de commutation dans des limites tolérables.

La largeur d'une bande d'hystérésis pour la phase k ($k = a, b, c$) d'un filtre actif avec un bus continu constitué par deux capacités est donnée par la formule suivante [26]:

$$HB_k = \frac{V_{DC}}{8f_c L_c} \left[1 - \frac{4L_c^2}{V_{DC}^2} \left(\frac{e_k(t)}{L_c} + \frac{di_{ck}^*(t)}{dt} \right) \right] \quad (\text{III.5})$$

Où f_c est la fréquence de commutation.

Dans cette formule, on peut remarquer que la largeur de la bande est inversement proportionnelle à la fréquence de commutation. Si on suppose que cette dernière est constante, alors la largeur de la bande dépendra principalement de deux paramètres à savoir ; la tension au point de couplage $e_k(t)$ et la dérivée par rapport au temps du courant de référence $\frac{di_{ck}^*(t)}{dt}$.

Pour une étude plus exhaustive, on peut prendre en compte les variations de la tension continue, mais ceci n'apporte pas grand-chose étant donné que ces variations sont très négligeables devant les deux précédents paramètres.

Le principe du réglage de la largeur de la bande d'hystérésis par un régulateur flou est schématisé sur la figure (III.9).

Le régulateur possède comme entrées la dérivée par rapport au temps du courant de référence pour la phase k et la tension de la même phase au point de couplage $e_k(t)$ pour en donner à la sortie la bande HB_k nécessaire à ce point de fonctionnement.

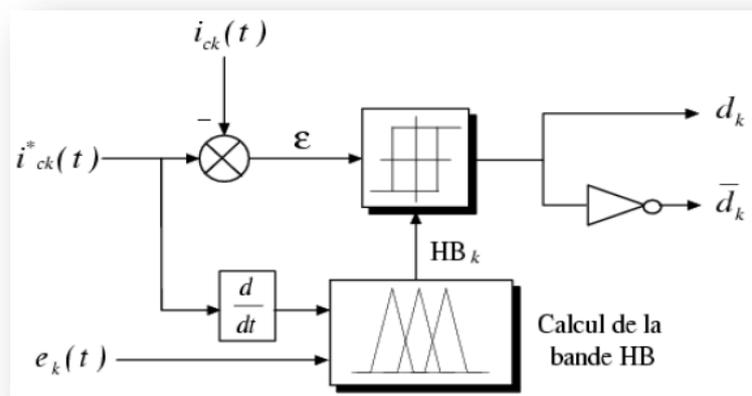


Figure III.9- Schéma de principe du contrôleur flou-hystérésis.

III.7.1 Description du contrôleur flou-hystérésis

Pour la mise en œuvre de ce régulateur, les univers de discours des variables d'entrée sont fixées entre -1 et 1 en introduisant des gains appelés facteurs d'échelle pour chaque entrées.

Pour l'étape de la fuzzification, nous avons retenu cinq sous-ensembles flous pour la tension au point de couplage, ces fonctions d'appartenances triangulaires illustrés sur figure (III.10(a)) :

- NG (Négative Grande),
- NM (Négative Moyenne),
- EZ (Environ Zéro),
- PM (Positive Moyenne),
- PG (Positive Grande).

Par contre pour la dérivée du courant, nous avons retenu sept sous-ensembles flous afin d'améliorer les performances dynamique de notre régulateur, ces sous-ensembles flous sont illustrés sur figure (III.10(b)):

- NTG (Négative Très Grande),
- TG (Négative Grande),
- NM (Négative Moyenne),
- EZ (Environ Zéro),
- PM (Positive Moyenne),
- PG (Positive Grande),
- PTG (positive Très grande).

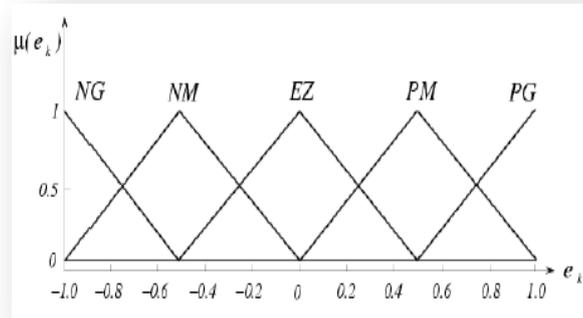
Par ailleurs, l'univers de discours de la variable de sortie HB_k est fixé entre 0 et 1, ici aussi un gain de sortie peut être nécessaire. Il est composé de sept sous-ensembles flous illustrés sur la figure (III.10(c)) :

- TTpetite (Bande très très petite),
- Tpetite (Bande très petite),
- Petite (Bande petite),
- Moyenne (Bande moyenne),
- Large (Bande large) ,
- Tlarge (Bande très large),

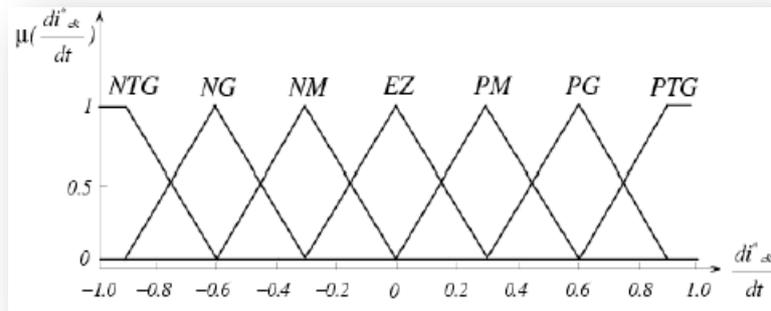
- TTlarge (Bande très très large).

Finalement, le régulateur est de type Mamdani, avec une méthode de fuzzification de type min – max et une méthode de defuzzification de type centre de gravité.

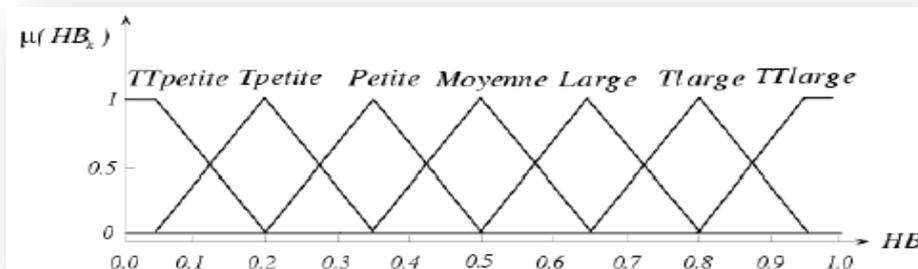
Le module d’application des règles quant à lui est composé de trente-cinq règles, présentées dans le tableau (III.3), Ces règles sont exprimées au format Si... ET...Alors....



a) Univers de discours de la variable e_k .



b) Univers de discours de la variable



c) Univers de discours de la variable HB_k .

Figure III.10- Univers de discours des variables d’entrée et de sortie.

Tableau III-3 Règles floues du régulateur flou de la bande d'hystérésis.

HB_k		$e_k(t)$				
		<i>NG</i>	<i>NM</i>	<i>EZ</i>	<i>PM</i>	<i>PG</i>
$di_{ck}^*/dt(t)$	<i>NTG</i>	<i>TTpetite</i>	<i>Tpetite</i>	<i>TTlarge</i>	<i>TTlarge</i>	<i>Tlarge</i>
	<i>NG</i>	<i>Tpetite</i>	<i>Moyenne</i>	<i>TTlarge</i>	<i>Tlarge</i>	<i>Moyenne</i>
	<i>NM</i>	<i>Petite</i>	<i>Large</i>	<i>TTlarge</i>	<i>Large</i>	<i>Petite</i>
	<i>EZ</i>	<i>Petite</i>	<i>Tlarge</i>	<i>TTLarge</i>	<i>Tlarge</i>	<i>Petite</i>
	<i>PM</i>	<i>Petite</i>	<i>Large</i>	<i>TTlarge</i>	<i>Large</i>	<i>Petite</i>
	<i>PG</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Tlarge</i>	<i>TTlarge</i>	<i>Large</i>	<i>Tpetite</i>
	<i>PTG</i>	<i>Large</i>	<i>Tlarge</i>	<i>TTlarge</i>	<i>Petite</i>	<i>TTpetite</i>

III.8 Les résultats de simulation

La simulation est effectuée pour les mêmes paramètres du schéma précédent. L'implantation du régulateur flou est réalisée par le Fuzzy Inference System Editor de l'environnement Matlab/Fuzzy Logic Toolbox.

Les résultats de simulation, en utilisant un régulateur flou, sont donnés par les figures (III.11, III.12, III.13, III.14, III.15 et III.16). Ces figures représentent respectivement les formes d'ondes : du courant de charge, du courant du filtre, du courant de source et l'analyse spectrale de celui-ci, après filtrage.

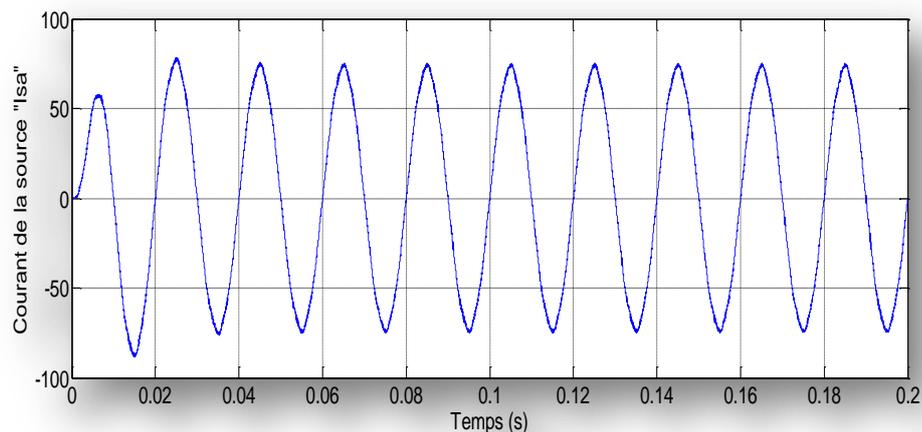


Figure III.11- Le courant de la source

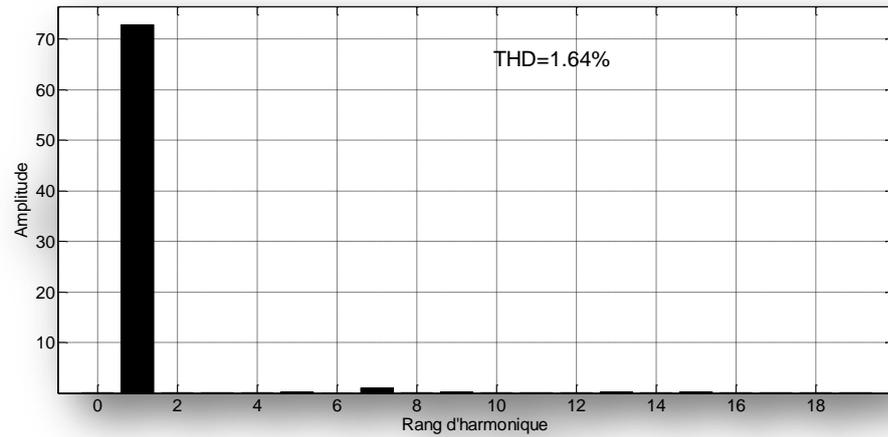


Figure III.12- Le spectre de courant de source

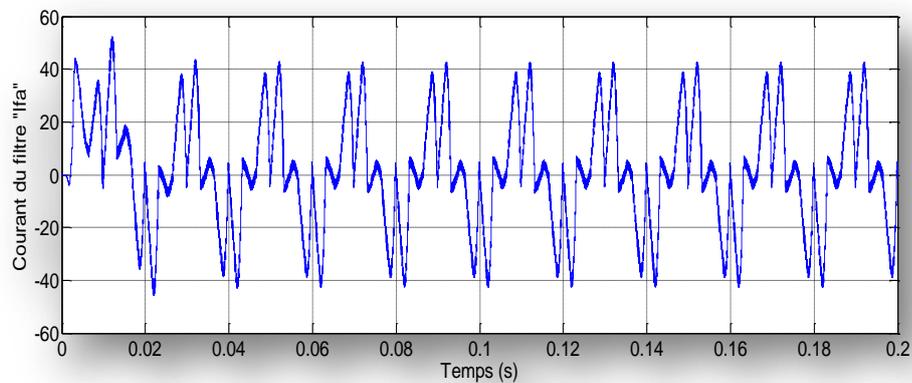


Figure III.13- Le courant du filtre

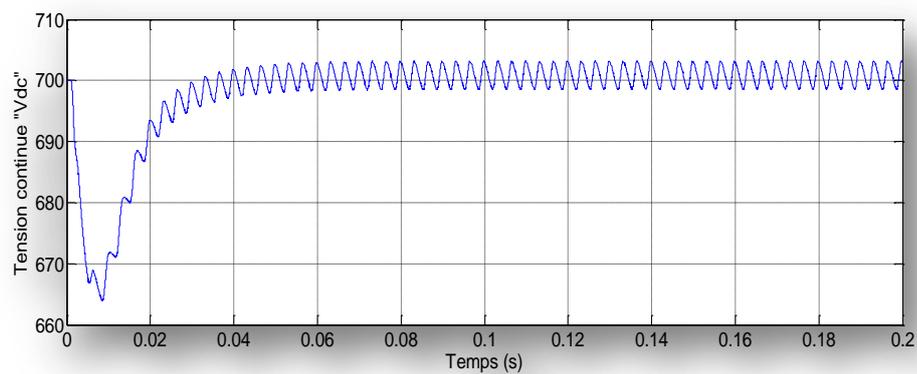


Figure III.14- La tension Vdc

On constate que le filtre, associé à un régulateur flou-hystérésis est aussi capable de rendre la forme d'onde du courant de source quasi sinusoïdal avec quelques ondulations.

Pendant ce régime, la valeur de tension du bus continu converge exactement vers sa référence ($V_{dc\text{ref}} = 700 \text{ V}$).

III.8.1 Comparaison entre les deux commande

a) l'approche classique

b) l'approche floue-hystérésis

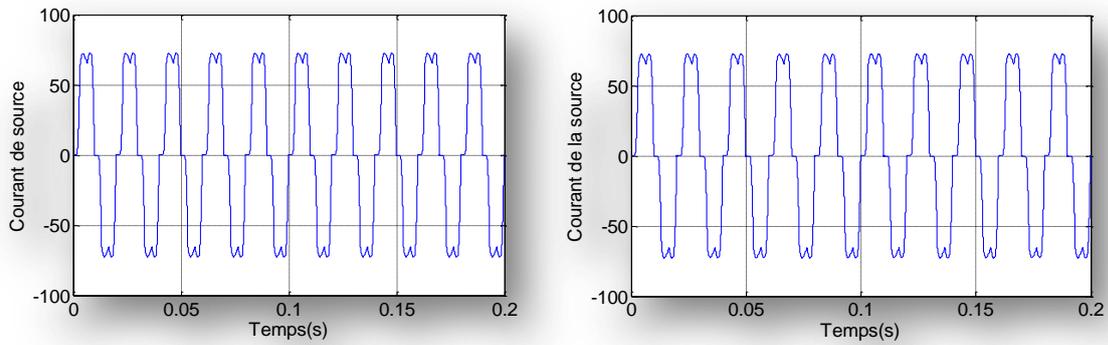


Figure III.15- Le Courant de charge

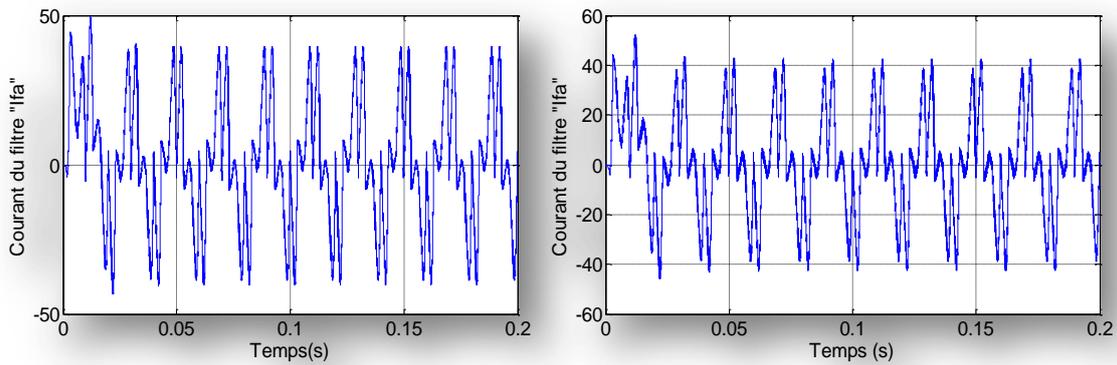


Figure III.16- Le courant du filtre

a) l'approche classique

b) l'approche floue-hystérésis

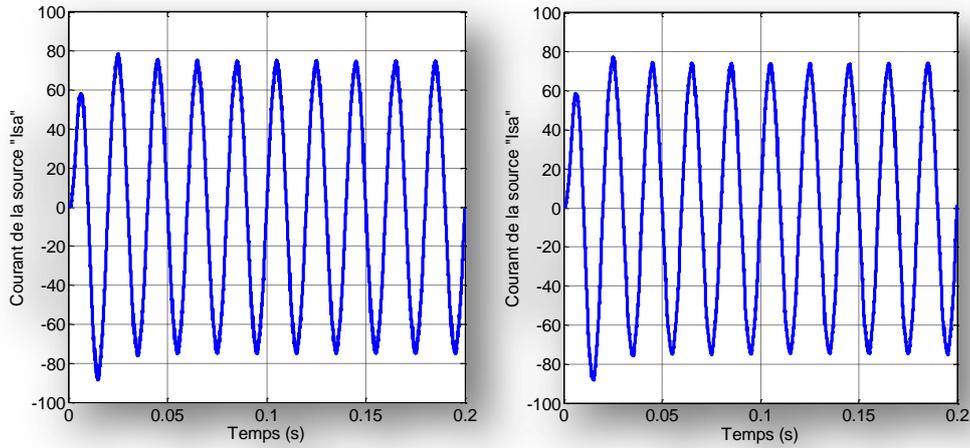


Figure III.17- Le courant de la source

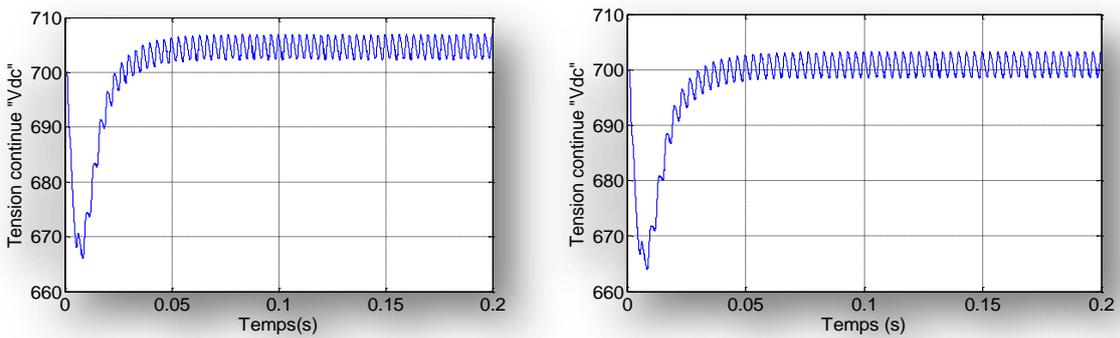


Figure III.18- la tension Vdc

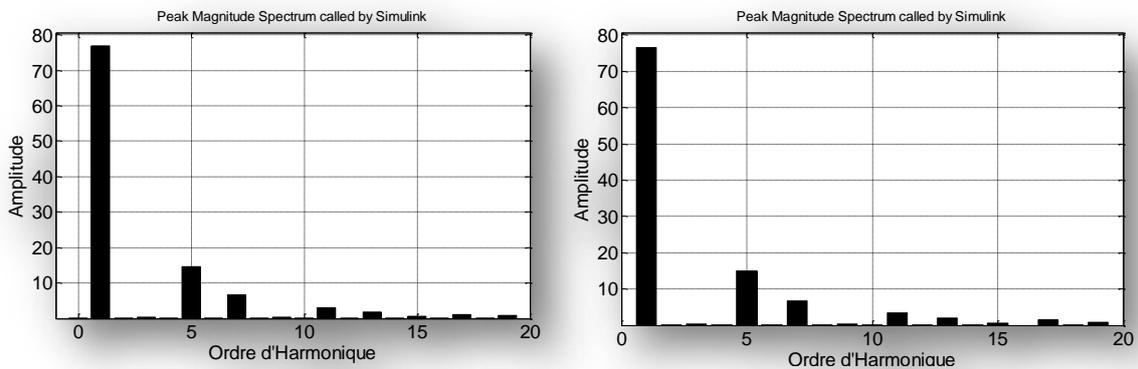


Figure III.19- Analyse spectrale du courant de la source avant filtrage

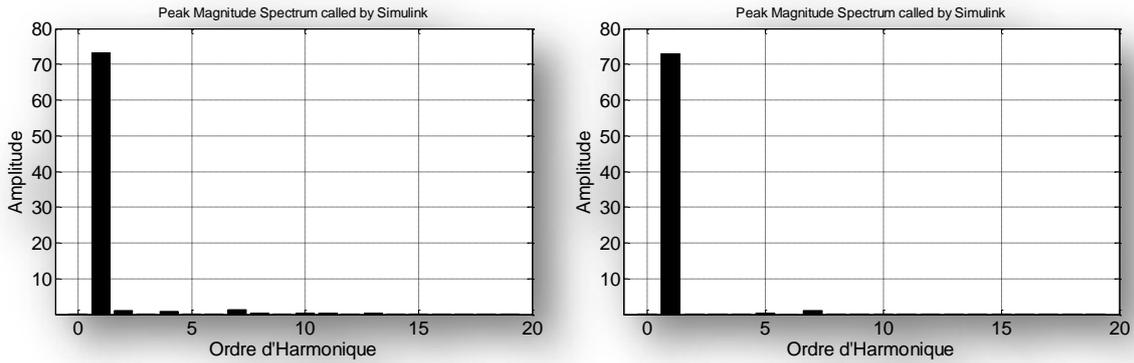


Figure III.20- Analyse spectrale du courant de la source après filtrage

Afin d'évaluer l'efficacité de cette méthode de régulation, nous comparons les résultats avec ceux obtenus avec l'approche classique. Les performances sont évaluées grâce au THD côté source. On remarque que la compensation par l'approche floue-hystérésis est toujours plus efficace qu'une compensation par l'approche classique. Le THD mesuré est de 1.65 % au lieu de 2.64 % avec l'approche classique.

III.9 Conclusion

L'objectif de ce chapitre était de mettre en œuvre la théorie de logique floue pour la commande du filtre actif en vue d'une meilleure restitution dans le réseau des courants harmonique identifiés, par la suite une technique de commande mettant en œuvre la conjugaison de l'intelligence d'un contrôleur flou et la robustesse d'un régulateur à hystérésis pour la commande en courant du filtre actif.

Les résultats obtenus sont très satisfaisants ; le régulateur flou-hystérésis est nettement meilleur que celui du régulateur classique, car il permet d'une part de diminuer le taux de distorsion harmonique coté réseau à des valeurs respectant les normes en vigueur tout en maintenant la fréquence de commutation dans des limites pratiques, et d'autre part il assure la compensation de la puissance réactive. Par ailleurs, il a été remarqué que le régulateur flou-hystérésis permet de forcer les courants injectés à suivre les références avec une meilleure dynamique.

Conclusion Générale

Les travaux présentés dans ce mémoire avaient pour but d'atteindre une meilleure compensation des harmoniques et l'amélioration de la qualité du courant de la source.

Dans une première phase, nous avons effectué une étude théorique sur la problématique des perturbations harmoniques générées par des charges non linéaires connectées aux réseaux électriques et les normes standards. Puis, nous avons abordés différentes solutions de dépollution, et le choix d'une solution basé sur les principes de filtrage actif parallèle (FAP) à structure tension a été retenu.

Ensuite nous sommes passés à l'étude du filtre actif parallèle à structure tension. L'étape d'identification des courants harmoniques est fondamentale dans le processus de filtrage. La méthode d'identification des puissances instantanées a été choisie pour identifier les perturbations en courant, elle offre l'avantage de choisir la perturbation à compenser avec précision, rapidité et facilité d'implantation. La modélisation de l'ensemble réseau, charge polluante et filtre actif parallèle a été présentée dans le cas de la commande par hystérésis conventionnel de charge non linéaires à savoir un redresseur triphasé à diodes alimentant une charge RL série. La validation de la méthode des puissances instantanées a été effectuée par simulation à partir du logiciel Matlab-Simulink. Les résultats de simulation montrent que le filtre actif parallèle dépollue efficacement le réseau électrique des harmoniques générées par la charge non linéaire car On a constaté que :

- Le taux de distorsion harmonique (THD) pour le courant de source est passé de 21,43% à 2,64% . .
- La commande par Hystérésis malgré sa simplicité, présente des inconvénients comme la variation de sa fréquence de commutation.

Dans la dernière partie, nous avons introduit la commande floue à la régulation des courants harmoniques injectés par le filtre actif. Nous avons proposé la combinaison d'un régulateur flou avec un régulateur hystérésis pour à la fois garder une bonne dynamique et une large bande passante comme caractéristique d'un régulateur hystérésis d'une part et d'autre part pour en tenir compte d'un aspect pratique lié à la fréquence de commutation et par la suite nous avons remarqué que :

- Ce régulateur flou-hystérésis est facile à mettre en œuvre et moins sensibles aux variations paramétriques.

- Il nous a permis d'améliorer les résultats obtenus par l'hystérésis classique avec un THD de 2.64 % à 1.65% coté réseau.
- Cette stratégie de commande ne nécessite pas un modèle mathématique,
- Toutefois, cette méthode présente des inconvénients comme : le manque des directives précises pour la conception du régulateur,
- La stabilité n'est pas garantie donc elle peut présenter des incertitudes.

Pour conclure, nous pouvons affirmer que les résultats obtenus, en particulier le taux de distorsion harmonique, sont satisfaisants et répondent aux limites imposées par les normes internationales IEEE 519-1992. Ceci prouve l'efficacité de l'application d'un régulateur flou-Hystérésis tout en gardant une fréquence de commutation dans des limites pratiques. Par ailleurs, il a été montré que cette méthode présente de bonnes caractéristiques face aux variations de la charge non-linéaire.

Le présent travail nous a permis d'approfondir nos connaissances et de mesurer combien la problématique est riche en interrogations. Les perspectives qui se dégagent sont :

- L'extension de notre étude aux autres structures des filtres actifs et hybrides pour bénéficier de l'avantage du filtre actif et passif.
- L'introduction la technique de logique floue type2 pour résoudre les problèmes d'incertitudes de la logique floue type1 ; car cette technique est très efficace pour minimisé l'incertitude même si sa mise en œuvre est beaucoup plus compliqué.

Références Bibliographique

- [1] A. E. A. Mohamad, “Contribution à l’Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension,” Université Louis Pasteur – Strasbourg I, France, 2002.
- [2] Hamoudi Farid, “Commande robuste d’un filtre actif shunt à quatre fils,” Thèse de Magister en génie électrique, Université El-Hadj Lakhder Batna, Algérie, 2008.
- [3] S. CHENNAI, “Etude, Modélisation & Commande des Filtres Actifs: Apport des Techniques de l’Intelligence Artificielle,” Thèse de doctorat en génie électrique, Université Mohamed Khider – Biskra, 2013.
- [4] A. Mohamed Muftah, “Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales,” Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2008.
- [5] N. Bruyant, “Etude et commande généralisées de filtres actifs parallèles, compensation global ou sélective des harmoniques, régime équilibré ou déséquilibré.,” Université de Nantes, France, 1999.
- [6] I. Etxeberria-Otadui, “Les systèmes de l’Electronique de puissance dédiés à la distribution électrique: Application à la qualité de l’énergie,” Thèse de doctorat, Institut National polytechnique de Grenoble, France, 2003.
- [7] Amaia Lopez de Heredia Bermeo, “Commandes avancées des systèmes dédiés à l’amélioration de la qualité de l’énergie: de la basse tension à la moyenne tension,” Thèse de doctorat en génie électrique, Institut National polytechnique de Grenoble, France, 2006.
- [8] Vanya Ignatova, “Méthode d’analyse de la qualité de l’énergie électrique: Application aux creux de tension et à la pollution harmonique,” Thèse de doctorat en génie électrique, Université Joseph Fourier, France, 2006.
- [9] E. Fellice, P. Révilla, *Qualité des réseaux électriques et efficacité énergétique*. Dunod, 2009.
- [10] M. Muljadi, R. Shiferl, T. A. Lipo, *Induction machine phase balancing by un symmetrical thyristor voltage control*, vol. Vol. IA-21, N° 4, PP. 669–678 vols. 1985.
- [11] R. Tounsi, “Développement d’un contrôle commande pour un compensateur série de creux de tension. Validation par simulation du fonctionnement avec des charges industrielles,” Institut National polytechnique de Toulouse, 1999.

- [12] Duverger Laurent, “Etude de stratégies de commande d’un filtre actif de type parallèle en vue d’assurer la compensation des harmoniques et du déséquilibre,” Laboratoire d’électrotechnique et instrumentation Université catholique de Louvain, Juillet 2006.
- [13] Hamiche Larbi, “Amélioration des paramètres du filtre actif par l’utilisation d’un régulateur à logique flou,” UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, 2009.
- [14] H Akagi, *Modern active filters and traditional passive filters*, vol. 54,N°.3. 2006.
- [15] M.C.Benhabib, “Contribution à l’étude des différentes topologies et commandes des filtres actifs parallèles à structure tension,Modélisation,Simulation et validation expérimentale de la commande,” Université Henri Poincaré-Nancy, France, 2004.
- [16] J.XU, “Filtrage actif parallèle des harmoniques des réseaux de distribution d’électricité,” Institut National polytechnique de Lorraine, Nancy, 1994.
- [17] Karimi Shahram, “Continuité de service des convertisseurs triphasés de puissance et prototypage FPGA in the loop: Application au filtre actif parallèle,” Thèse de doctorat en génie électrique,Université de Nancy, France, 2009.
- [18] Mekri Fatiha, “Commande robuste des conditionneurs actifs de puissance,” Thèse de doctorat en génie électrique, Ecole polytechnique de L’université de Nante, France, 2007.
- [19] P.Borne, J.Rozinoer, J.Y.Dieullot et L.Dubois, *Introduction à la commande floue*, Ed.echnip. Paris, 1998.
- [20] M.T.Cao, “Commande numérique des machines asynchrones par logique floue,” Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, 1997.
- [21] B.B.Meunie et C.Masal, *Logique floue: Principe, aide à la décision*, Edition Hermes sciences,Lavoisier. 2003.
- [22] L.A Zadeh, *The concept of a linguistic variable and it’s application to aproximate reasoning*, vol. Vol.9,pp.43–80. 1976.
- [23] Y.Mihoub, “Commande floue adaptative de la machine asynchrone,” Thèse de l’université des sciences et de technologie d’Oran Mohamed Boudiaf, 2012.
- [24] J.Faucher, “Les plans d’expéreances pour le réglage de commande à base de logique floue,” Thèse de doctorat, Institut National polytechnique de Toulouse, 2006.

- [25] M.N.Cistera, *Neural and fuzzy logic control of drives and power systems*, Edition Elsevier-science, ISBN 07506 55585. 2002.
- [26] M.Kale et E.Ozdemir, *An adaptive Hysteresis band current controller for shunt active power filter*. 2005.

Paramètres de simulation

La tension simple (V_s)	220V
La fréquence (f)	50H
La résistance de l'impédance de la source (R_s)	3.5m Ω
L'inductance de l'impédance de la source L_s	0.023mH
Résistance de l'impédance de la charge R_c	0.82m Ω
L'inductance de l'impédance de la charge L_c	0.8mH
Résistance du filtre de filtre de sortie R_f	5m Ω
L'inductance du filtre de sortie L_f	3mH
La valeur du condensateur C_{dc}	2200 μ F
La tension à la borne du condensateur V_{dc}	700V
L'inductance de la charge L_{ch}	0.78m Ω
Résistance de la charge R_{ch}	2.5mH

Abréviations

FAP	Filtre actif parallèle
FAS	Filtre actif série
UPQC	United Power Quality Combinaison
P	Puissance active
Q	Puissance réactive
PLL	Phase looked loop (Boucle à verrouillage de phase)
THD	Taux de distorsion harmonique
D	Puissance déformante
FP	Facteur de puissance

I_s	Courant de la source
I_c	Courant de la charge
I_{inj}	Courant injecté par le filtre actif
L_f	Inductance du filtre de sortie
R_f	Résistance du filtre de sortie
V_{dc}	La tension à la borne du condensateur
C_{dc}	Valeur du condensateur
I_{h-ch}	Courant harmonique de la charge
$(\alpha-\beta)$	Axe du plan stationnaire
$I_\alpha-I_\beta$	Courant du repère (α, β)
$V_\alpha-V_\beta$	Tension du repère (α, β)
V_{dc-ref}	Tension continue de référence
$V_{a,b,c}$	Tension des phases
P_c	Puissance de compensation
K_p	Coefficient du régulateur proportionnel
K_i	Coefficient du régulateur intégral
$I_{\alpha-ref}-I_{\beta-ref}$	Courant perturbateur de référence
FPB	Filtre Passe Bas