

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**UNIVERSITE AHMED DRAIA ADRAR**  
**FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE**  
**DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA MATIERE**



**MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME**  
**DE MASTER EN PHYSIQUE ENERGETIQUE**

**Thème**

**Contribution à l'étude de la Commande de Filtre**  
**Actif parallèle par régulateur PI et logique floue**

Soutenu le :25/05/2017

**Présenté par :** Barkat Fathi

**Encadré par :** Barbaoui Brahim

**MRA URERMS adrar**

**Président :** Maouedj rachid

**MRB URERMS adrar**

**Examineurs:** Mansouri Smail

**MCB adrar**

**Examineurs :** Manaa Saadeddine

**MCB adrar**

# *Dédicaces*

*Il m'est difficile d'exprimer tout ce que je dois à ma famille. Je pense particulièrement à mon Père et ma Mère et mon petit fils, Mes frères,*

*pour l'incalculable soutien moral et logistique et les nombreux encouragements que j'ai toujours reçus de leur part.*

*A la fin je dédie très chaleureusement à monsieur Belhorma Mustapha le directeur régionale de CNL Et sa femme, qui sert une mère pour moi, et tous leurs enfants en particulier, ma sœur aïcha.*

*Un grand merci à ma chère femme*

## ***Remerciement***

*A l'issue de ce travail, je tiens à adresser ma reconnaissance et mes remerciements à toutes les personnes qui ont contribué, chacune à sa manière, à l'accomplissement de cette thèse.*

*Tout d'abord, Je tiens à remercier très chaleureusement mon encadreur de thèse, Monsieur **Ibrahim Barbaui** , Professeur à l'Université de Adrar , pour son encadrement, son suivi permanent et ses précieux conseils.*

*Je tiens également à remercier vivement les membres de jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail et cette mmoire*

# SOMMAIRE :

introduction générale	07
<b>études des perturbations électriques</b>	<b>10</b>
I.1.introduction	11
I.2. les différents problèmes	11
la surintensité	11
a.1- la surintensité par surcharge	11
a.2- la surintensité par court-circuit	11
b- la surtension	12
- Définition	12
- Conséquences	12
- moyens de protection	12
c- creux de tension	12
- Conséquences	12
d- déséquilibre des réseaux	12
- Conséquences	13
e- fluctuations de tension (flicker)	13
f- pollution harmonique des réseaux électriques	14
I.3. problématique des harmoniques	15
I.3.1. notion des charges	15
I.3.2. exemples de charges non-linéaires	16
I.3.3.décomposition d'un courant distordu périodique en série de fourier	18
I.3.4. effets des harmoniques sur le réseau électrique	19
I.3.5.caractérisation des harmoniques	20
I.3.5.1. taux harmonique de rang n	20
I.3.5.2. taux global de distorsion harmonique (total harmonic distortion)	20
I.3.5.3. facteur de puissance (power factor)	20
I.3.5.4. facteur de crête (crest factor)	22
I.4 Conclusion	22
<b>chapitre 02 solutions traditionnelle et moderne</b>	<b>24</b>
II.1 introduction	25
II.2- normes standards pour limiter les harmoniques	25
II.3. solutions aux perturbations harmoniques	26
II.3.1. solutions traditionnelles	26
A. action sur la structure de l'installation	26
B. augmentation de la puissance de court-circuit	26
C.placement d'une inductance de ligne	26
D.rééquilibrage des courants du réseau électrique	26
E. surdimensionnement ou déclassement de l'installation électrique	27

E compensation de la puissance réactive	27
G.les filtres passifs	27
G.1. classification des filtres passifs	27
G.2.filtre passif série	27
II.3.1.7.3.filtre passif parallèle	28
G.8.filtre passif amorti	28
II.3.1.9.filtre résonant	29
G.4.les avantages et les inconvénients des filtres passifs	29
II.3.2. solutions modernes -les filtres actifs-	30
II.3.2.1 introduction	30
II.3.2.2 classification des filtres actifs	31
II.3.2.2.1. filtre actif parallèle	31
II.3.2.2.2. filtre actif série	32
II.3.2.2.3. filtre actif universelle (upqc)	32
II.3.2.3.les avantages et les inconvénients du filtre actif	33
II.3.2.4.filtre hybride	34
II.4 comparaison des différents types de perturbations	34
II.5 conclusion	36

### **chapitre 03 filtre actif parallèle** 37

III.1 introduction	38
III.2 principe de filtre actif parallèle	38
III.3. la structure générale d'un filtre actif parallèle	39
III.4 la partie puissance d'un filtre actif parallèle à structure tension	40
III.4.1 l'onduleur de tension	41
III.4.2.tension fournie par l'onduleur	42
III.4.3. filtre de découplage	43
III.4.4 système de stockage d'énergie	44
III.5 contrôle des courants du filtre actif (partie commande)	45
III.5.1.commande par modulation de largeur d'impulsion (mli)	45
III.6.Conclusion	46

### **chapitre 04 modulisation et regulation d'un filtre actif parallele** 47

IV.1 introduction	48
IV.2 structure du filtre actif	48
iv.3. filtre actif parallèle à structure de tension	49
IV.4.filtre actif parallèle à structure de courant	49
IV.5.stratégie de commande	51

IV.6.la régulation et l'adaptation du filtre actif	53
IV.6.1. régulation de la tension continue	54
IV.6.2. régulation du courant du filtre actif parallèle	55
IV.7.méthode de régulation par PI	56
IV.8.méthode de régulation par logique floue	56
IV.8.1. historique et principe de la logique floue	56
IV.8.2. principe de la logique floue	56
IV.8.3. bases de la logique floue	59
IV.8.3.1 variables linguistiques et les ensembles flous	59
IV.8.3.2 les fonctions d'appartenance	60
IV.8.3.3 les inférences (ou déduction floues)	60
IV.8.3.3.1 inférence avec une seule règle	60
IV.8.3.3.2 inférence avec plusieurs règles	61
IV.8.3.3.3 opération de la logique floue	61
IV.9. étape de mise en œuvre d'un contrôleur flou	63
IV.9.1. étape de fuzzification	64
IV.9.2 étape d'inférence « le moteur d'inférence »	64
IV.9.3 étape de défuzzification en sortie,	65
IV.10. paramètres de la simulation	67
IV.10.1 boucle de régulateur tension	67
IV.5.2 boucle de régulation courant	69
IV.6. Conclusion	70
<b>chapitre 05 résultat de simulation</b>	<b>71</b>
V.1. résultats de simulation et discussions	72
- discussions	75
V.2. la régulation de la tension contenu	75
- conclusion	76
<b>conclusion générale</b>	<b>77</b>
Bibliographie	

**INTRODUCTION**

**GENERALE**

## introduction générale

L'utilisation croissante dans l'industrie de systèmes commandés à base d'électronique de puissance entraîne de plus en plus des problèmes de perturbation au niveau des réseaux électriques. Ainsi, on assiste à une augmentation régulière, de la part des utilisateurs, des taux d'harmonique et de déséquilibre des courants, ainsi qu'à une importante consommation de la puissance réactive. La circulation de ces mêmes courants perturbés va également donner naissance à des harmoniques et provoquer des déséquilibres de tension, lesquels vont se superposer à la tension nominale du réseau électrique. De plus, des incidents du type « coups de foudre » ou un brusque démarrage d'une machine tournante à forte puissance peuvent causer une chute soudaine et importante de tension. On nommera ce type d'incident : creux de tension. Ces perturbations ont, bien entendu, des conséquences néfastes sur les équipements électriques, lesquelles peuvent aller d'un fort échauffement ou d'un arrêt soudain des machines tournantes jusqu'à la destruction totale de ces équipements.

Et pour le problème qui se pose sur la pollution du réseau électrique plusieurs solutions de dépollution des réseaux électriques ont été déjà proposées dans la littérature. Celles qui répondent le mieux aux contraintes industrielles d'aujourd'hui sont les filtres actifs et plus spécialement le filtre actif parallèle qui peut être utilisé pour compenser les courants harmoniques et déséquilibrés de même que la puissance réactive.

Progressivement, et de manière à endiguer l'augmentation des problèmes de perturbation sur les réseaux électriques, des normes de qualité d'énergie électrique de plus en plus contraignantes seront imposées aux fournisseurs et aux consommateurs industriels. Face à ces nouvelles réglementations mais aussi face à la demande de plus en plus spécifique des utilisateurs d'énergie électrique, les compensateurs actifs doivent s'adapter en rendant plus complexes leurs structures et leurs méthodes de régulation.

D'autant plus que ces solutions doivent se soumettre aux limites physiques et technologiques inhérentes aux dispositifs de filtrage actif.

Dans le cadre de cette problématique, notre étude est faite en vue d'optimiser les performances de contrôle du filtre actif parallèle tout en tenant compte de l'ensemble des contraintes et limitations matérielles inhérentes à leurs structures. Ainsi, des études avancées ont été réalisées sur les différents types de régulateur classiques existants et sur leur faisabilité en termes d'implantation numérique. Dans ce travail en vue de valider l'étude, nous avons jugé



## introduction générale

utile de procéder au contrôle du filtre actif par une méthode classique et qui sera comparée à la commande logique floue. De manière à atteindre ces objectifs, ce mémoire est divisé en Cinq chapitres :

Le premier chapitre est consacré à la description des perturbations en courant et en tension pouvant intervenir dans un réseau électrique. Les origines, les conséquences et les normes inhérentes à ces perturbations sont analysées.

Dans le second chapitre de ce mémoire, nous traitons le problème des perturbations harmonique et nous présentons également les solutions traditionnelles et modernes de dépollution.

Dans le troisième chapitre, nous traitons la structure du compensateur actif parallèle qui se présente comme un onduleur de tension triphasé raccordé au réseau électrique par un filtre de sortie du premier ordre. Aussi et après avoir traité la structure générale du compensateur.

Dans le quatrième de ce mémoire, nous abordons la modalisation d'un filtre actif parallèle et les deux techniques de commande, l'utilisation de le régulateur PI et la moderne du filtre actif parallèle et ce par le biais de la théorie des ensembles flous.

Dans ce dernier chapitre, nous traitons les résultats de simulation via le logiciel MATLAB Sim-power-system sur l'influence de compensateur sur la qualité de l'énergie.

# **CHAPITRE 01**

**ETUDES**

**DES PERTURBATIONS**

**ELECTRIQUES**

## I.1. INTRODUCTION :

Une augmentation ou une diminution anormale des grandeurs nominales dans un circuit électrique constitue un défaut ou une perturbation. Ce sont le plus souvent les variations anormales de la tension, de l'intensité et de la fréquence qui sont à l'origine de ces perturbations.

## I.2. les différents problèmes :

Donc on remarque les problèmes ou les perturbations suivant :

- A) Surintensité
- B) Surtension
- C) Creux de tension
- D) Déséquilibre de réseau
- E) Sur et sous fréquence
- F) Pollution de réseau électrique

### A. La surintensité :

On appelle surintensité tout courant supérieur à la valeur assignée ( valeur nominale d'emploi).

#### A.1- la surintensité par surcharge :

- ◆ **Définition** : Elévation de l'intensité de 1 à 10  $I_n$  d'un circuit due par exemple à une surabondance des récepteurs.
- ◆ **Conséquences** : Echauffement lent et progressif des parties actives, des masses métalliques, des isolants
- ◆ **Moyens de protection** : Relais thermique fusible déclencheur thermique du disjoncteur

#### A.2- La surintensité par court-circuit

- ◆ **Définition** : Elévation brutale de l'intensité de 10 à 1000  $I_n$  dans un circuit due à une liaison accidentelle de deux points de potentiel différents (PH et N).
- ◆ **Conséquences** : Arc électrique, échauffement important pouvant entraîner la fusion des parties actives (soudure des contact, projection de particule).
- ◆ **Moyens de protection** : Déclencheur magnétique du disjoncteur, fusible.

## B. La surtension

Une surtension est une impulsion ou une onde de tension qui se superpose à la tension nominale du réseau

- ◆ **Définition** : Augmentation soudaine et importante de la tension due par exemple à un coup de foudre, à un contact entre HTA et BTA.
- ◆ **Conséquences** : Claquage des isolants avec pour conséquence des courts-circuits éventuels.
- ◆ **Moyens de protection** : limiteur de surtension, relais de surtension, parafoudre.

## C. Creux de Tension

Un creux de tension est une diminution de la tension à une valeur située entre 1 et 90% de la tension nominale et d'une durée allant de 10 ms jusqu'à 1 minute. Une coupure brève est un cas particulier du creux de tension voir la figure 1.1.

Sa profondeur est supérieure à 99% ; elle est caractérisée uniquement par sa durée (inférieure à 3 minutes). Les coupures longues sont supérieures à 3 minutes [1].

Les creux de tension sont dus à l'apparition de défauts sur l'installation ou sur le réseau de distribution. Les coupures brèves sont généralement la cause de manœuvres des automatismes des réseaux de distribution (réenclencher, isolations de défaut) [2].

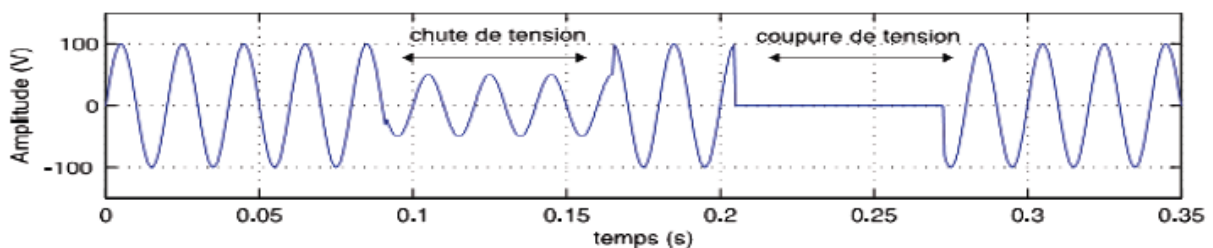


Figure I.1: Creux et coupures de tension

- ◆ **Conséquences** : perturbation ou arrêt du procédé, pertes de données, données erronées, ouverture de contacteurs, verrouillage de variateurs de vitesse, ralentissement ou décrochage des moteurs et extinction de lampes à décharge [3].

## D. Déséquilibre des réseaux :

Trois grandeurs de même nature et de même pulsation forment un système triphasé équilibré lorsqu'elles ont la même amplitude et lorsqu'elles sont déphasées de  $\pm 120^\circ$ .

Lorsque les grandeurs ne vérifient pas ces conditions de phase et d'amplitude, on parle d'un système triphasé déséquilibré ce qui est bien démontré dans la figure.1.2 [4]. Le degré de déséquilibre est défini en utilisant la méthode des composantes de Fortescue par le rapport de la composante inverse ( $U_{1i}$ ) (ou homopolaire ( $U_{1o}$ )) du fondamental à celui de la composante directe ( $U_{1d}$ ) du fondamental.

$$\text{Et} \quad \Delta U_i = \frac{|U_{1i}|}{|U_{1d}|} \quad (\text{I.1})$$

$$\Delta U_o = \frac{|U_{1o}|}{|U_{1d}|} \quad (\text{I.2})$$

Les défauts monophasés ou biphasés provoquent des déséquilibres jusqu'au fonctionnement des protections [5].

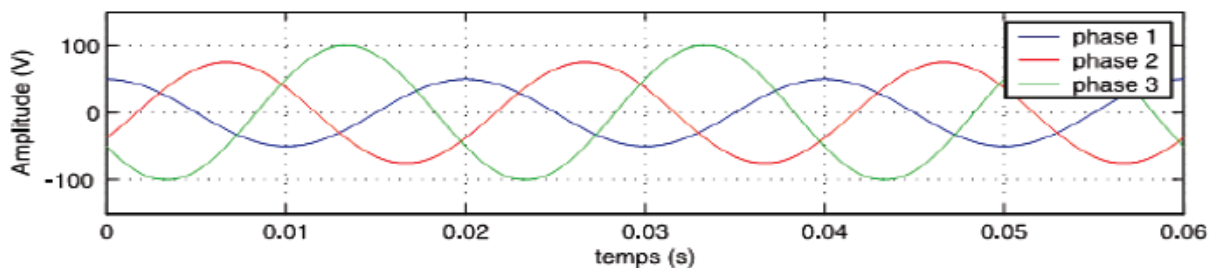


Figure I.2: Déséquilibre du système triphasé de tension

- ◆ **Conséquences:** couples moteurs inverses (vibrations) et sur-échauffement des machines asynchrones [3].

### E. Fluctuations de Tension (Flicker)

Les variations de tension sont des variations de la valeur efficace ou de la valeur crête d'amplitude inférieure à 10 % de la tension nominale et les fluctuations de tension sont une suite de variations de tension ou des variations cycliques ou aléatoires de l'enveloppe d'une tension dont les caractéristiques sont la fréquence de la variation et l'amplitude [6].

Le terme Flicker est dérivé de l'impact visible sur les lampes (papillotement de la lumière) dû à la fluctuation de la tension. Parmi les causes les plus fréquentes de la fluctuation de la tension dans les réseaux de transmission et distribution sont les fours à arc [7].

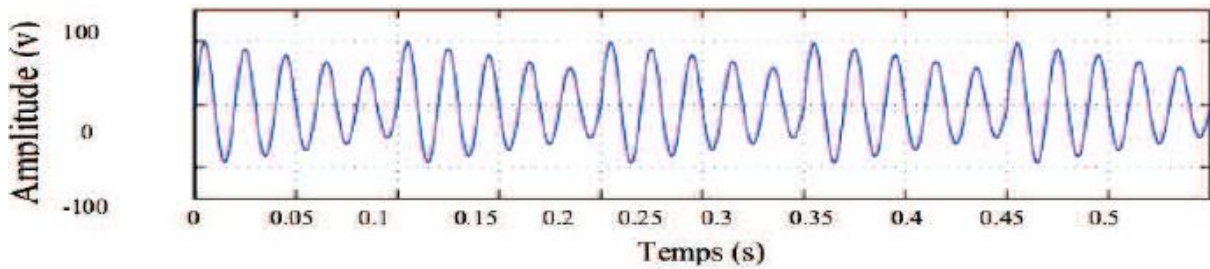


Figure 1.3: Fluctuations de tension

#### F- Pollution Harmonique des Réseaux Electriques :

Depuis les dernières décennies, il y a une forte augmentation des charges non-linéaires connectées au réseau électrique telles que les : ordinateurs, télécopieurs, lampes à décharge, fours à arc, chargeurs de batterie, systèmes de l'électronique de puissance, alimentations électroniques [7].

Les conséquences sur les systèmes d'alimentation électrique deviennent préoccupantes du fait de l'utilisation croissante de ces équipements, mais aussi de l'utilisation des composants de l'électronique dans presque toutes les charges électriques. En effet, une charge non-linéaire impose au réseau un courant discontinu, déformé avec une amplitude très importante et son fondamental est déphasé par rapport à la tension du réseau. Cette discontinuité s'accompagne de deux inconvénients perturbant le réseau d'alimentation :

- ◆ La consommation de l'énergie réactive,
- ◆ L'injection sur le réseau de courants harmoniques.

Ce qui se traduit par un facteur de puissance très faible de l'installation globale.

La présence de ces harmoniques génère des effets négatifs sur la quasi totalité des composants du système électrique, en créant de nouvelles contraintes diélectriques, thermiques et/ou mécaniques ainsi que des perturbations électromagnétiques et acoustiques importantes[8].

L'objectif du chapitre prochaine introductif est de présenter une étude non exhaustive sur la pollution harmonique dans le réseau électrique et les différents moyens de dépollution. Nous exposons dans un premier temps les bases techniques et théoriques permettant d'effectuer une étude des perturbations électrique. Pour cela, nous parlons de problématique des harmoniques, de leurs conséquences et des limites tolérées et imposées par les normes internationales des perturbations. Nous présentons ensuite les différentes solutions possibles face à la problématique des harmoniques dans les réseaux électriques et nous évoquons aussi l'utilité et le rôle primordial de l'électronique de puissance dans la constitution et la mise en œuvre des structures modernes de compensations.

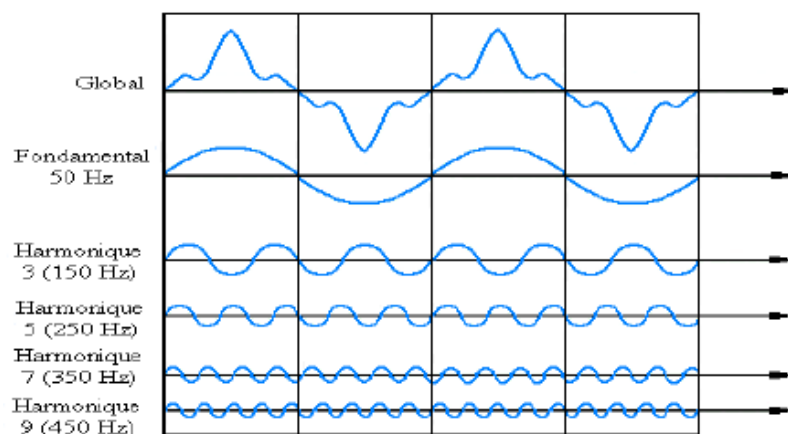
### I.3. PROBLEMATIQUE DES HARMONIQUES

La problématique des harmoniques, également appelée pollution harmonique, n'est pas un phénomène nouveau. Néanmoins, du fait que de plus en plus de charges non-linéaires se connectent au réseau, la problématique des harmoniques est devenue très répandue. Les charges non-linéaires provoquent une distorsion dans le courant, et donc dans la tension, ce qui peut entraîner un mauvais fonctionnement des dispositifs raccordés au réseau. D'où, l'intérêt d'éliminer ou repousser ces harmoniques vers les fréquences les plus élevées [9].

Un récepteur d'énergie est considéré par le réseau électrique comme une charge perturbatrice s'il absorbe des courants non sinusoïdaux ou des courants déséquilibrés ou s'il consomme de la puissance réactive. Les deux premiers types de perturbations peuvent déformer ou déséquilibrer les tensions du réseau lorsque l'impédance de celui-ci n'est pas négligeable. Le troisième réduit la capacité de production ou de transmission de la puissance active des générateurs, des transformateurs et des lignes électriques [10].

Les harmoniques de courant, une fois injectés par des **charges non-linéaires**, se propagent à travers le réseau électrique en affectant la forme d'onde des tensions aux différents points du réseau. Cette propagation n'est limitée que par les bifurcations (points de division des courants) et les impédances du réseau qui dépendent généralement de la fréquence des courants harmoniques. La présence des harmoniques de courant se révèle essentiellement à travers leurs effets sur la tension du réseau [9].

Un signal déformé est la résultante de la superposition des différents rangs d'harmoniques (figure I.1).



**Figure I.4.** Exemple d'un courant distordu et sa décomposition en composantes harmoniques de rang 1 (fondamental), 3, 5, 7 et 9.

#### I.3.1. Notion des Charges

Les récepteurs peuvent être classés en deux familles principales [11] :

- ◆ 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 inductances). Cependant, le courant et la tension peuvent être déphasés (figure I.2).

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 leur part dans la consommation d'électricité ne cesse d'augmenter.

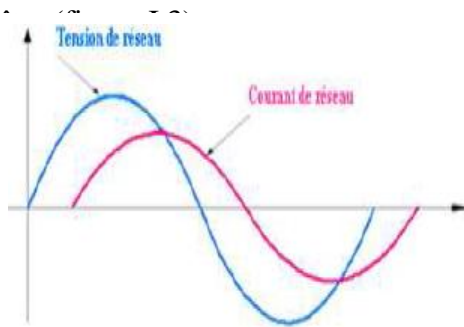


Figure I.2. Charge linéaire

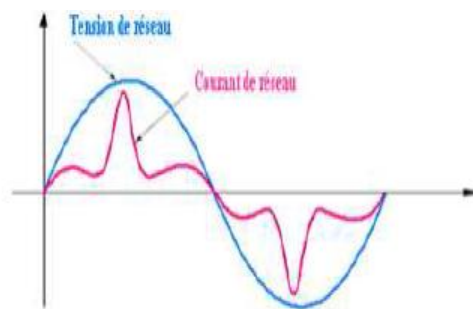


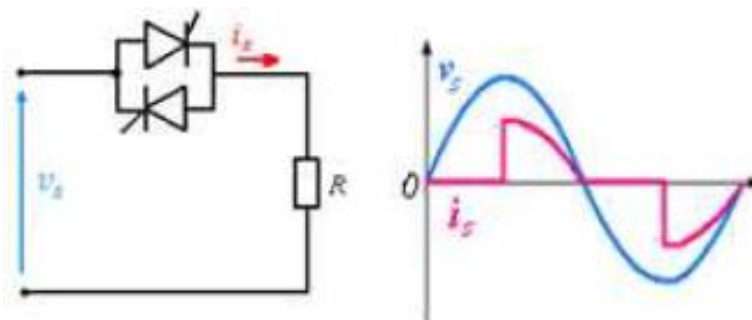
Figure I.3. Charge non-linéaire

### I.3.2. Exemples de Charges Non-linéaires

Les principales sources des harmoniques sont :

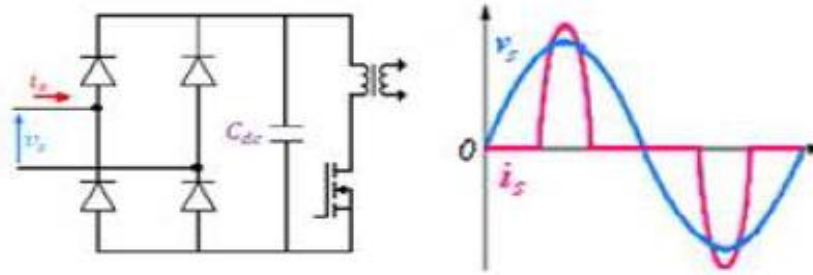
- ◆ Les équipements industriels (machines à souder, fours à arc, fours à induction, redresseurs,...) ; Les variateurs de vitesse pour moteurs asynchrones ou moteurs à courant continu ; Les appareils de bureautique (ordinateurs, photocopieurs, fax, ...)
  - ◆ Les appareils domestiques (TV, fours micro-onde, éclairage néon, ...) ; Les onduleurs.
- Tous ces systèmes contribuent à la pollution harmonique du réseau auquel ils sont connectés.

La figure I.4 montre les principaux convertisseurs statiques qui provoquent la pollution harmonique des réseaux électriques.

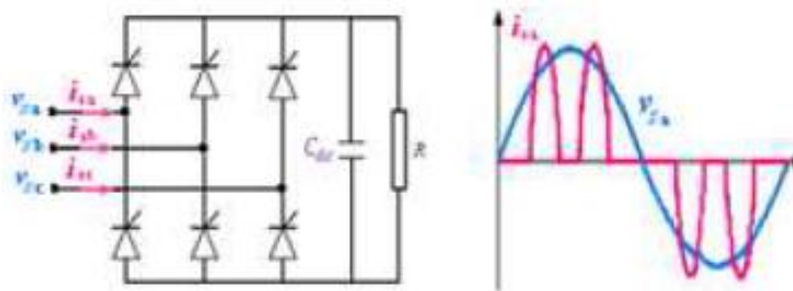


(a). Gradateur de lumière ou de chauffage.

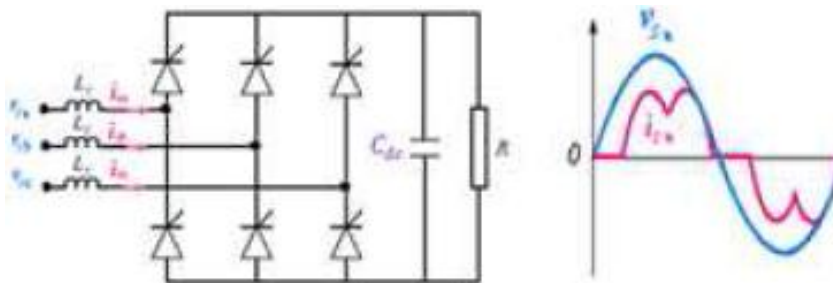




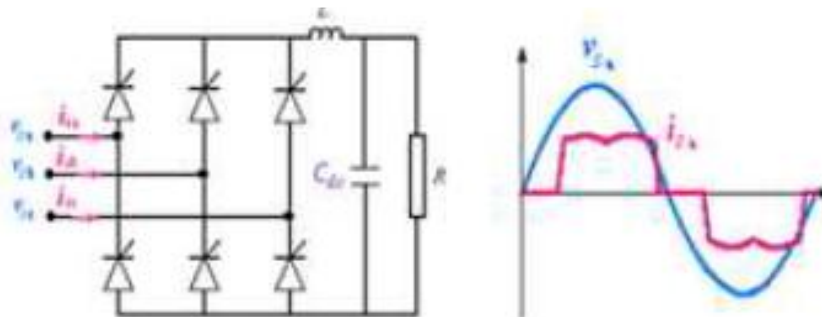
(b). Redresseur d'alimentation à découpage, par exemple: ordinateur, électroménager.



(c). Redresseur triphasé avec condensateur en tête, par exemple: variateur de vitesse pour moteur asynchrone.



(d). Redresseur triphasé avec inductance de filtrage en côté continu, par exemple: chargeur de batterie.



(e). Redresseur triphasé avec inductance de lissage en côté alternatif, par exemple: ASI de forte puissance.

**Figure I.4.** Les principaux convertisseurs statiques qui absorbent des courants non-sinusoidaux.

### I.3.3. Décomposition d'un Courant Distordu Périodique en Série de Fourier

Avec les charges non-linéaires, les courants ne sont pas sinusoïdaux et peuvent être considérés comme la somme d'un courant sinusoïdal de 50/60Hz appelé fondamental et d'une série de courants sinusoïdaux de fréquences multiples de la fréquence fondamentale appelés harmoniques. Le passage de ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peut entraîner des tensions harmoniques aux points de raccordement et alors polluer les consommateurs alimentés par le même réseau électrique. Le courant alternatif périodique déformé absorbé par une charge non-linéaire peut être décomposé en série de Fourier comme :

$$i(\omega t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \sin(n\omega t) + b_n \cos(n\omega t)) \quad (\text{I.3})$$

Avec:  $a_0$ ,  $a_n$ ,  $b_n$  sont les coefficients de Fourier.

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i(\omega t) d\omega t \quad (\text{I.4})$$

$$a_n = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i(\omega t) \sin(n\omega t) d\omega t \quad (\text{I.5})$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i(\omega t) \cos(n\omega t) d\omega t \quad (\text{I.6})$$

L'expression du courant d'une charge non-linéaire est :

$$I(\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (\text{I.7})$$

Où :  $n$  est un nombre entier.

$\varphi_n$  est le déphasage de la composante harmonique à l'instant initial ( $t = 0$ ).

D'une autre manière

$$i(\omega t) = I_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (\text{I.8})$$

$$I_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad \text{et} \quad \varphi_n = \text{Arctg}\left(\frac{b_n}{a_n}\right)$$

Les harmoniques se distinguent par leur rang, de type pair ou impair. Les harmoniques de rang pair (2, 4, 6, 8...), très souvent négligeables en milieu industriel, s'annulent en raison de la symétrie du signal. Ils n'existent qu'en présence d'une composante continue. Par contre, les harmoniques de rang impair (3, 5, 7, 9...) sont fréquemment rencontrés sur le réseau électrique.

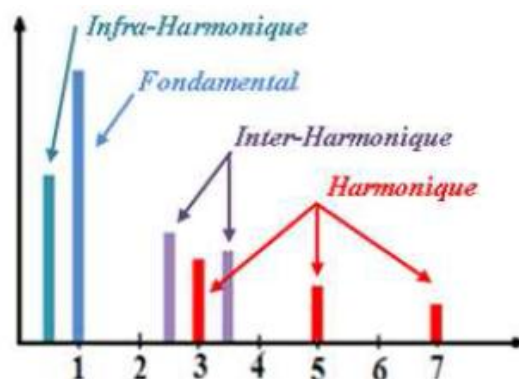
Dans le cas où il y a des variations périodiques ou aléatoires de la puissance absorbée par certains récepteurs, on notera qu'il existe d'autres composantes harmoniques :

*Inter-harmoniques* : Ce sont des composantes sinusoïdales qui ne sont pas à des fréquences multiples de celle du fondamental : 130 Hz, 170 Hz, 220 Hz.

*Infra-harmoniques* : Ce sont des composantes sinusoïdales qui sont à des fréquences inférieures à celle du fondamental : 10 Hz, 20 Hz.

La répartition d'inter-harmoniques et d'infra-harmoniques est illustrée sur la figure I.5.

La présence de ce genre d'harmoniques est due à des variations périodiques ou aléatoires de la puissance absorbée par certains récepteurs. Dans ce cas, le signal n'est pas périodique à  $T$  ( $T$  période du fondamental), ce qui explique l'apparition de composantes supplémentaires à celles du développement en série de Fourier. Ces variations sont provoquées par des machines telles que : fours à arc, cyclo-convertisseurs et les variateurs de vitesse.



**Figure I.5.** Représentation d'inter-harmoniques et d'infra-harmoniques.

### I.3.4. Effets des Harmoniques sur le Réseau Electrique

La présence d'harmoniques de courant ou de tension conduit à des effets néfastes sur le réseau de distribution qui sont résumés par les points suivants [12]

- ◆ L'échauffement des conducteurs, des câbles, des condensateurs et des machines dû aux pertes cuivre et fer supplémentaires ;
- ◆ L'interférence avec les réseaux de télécommunication, causée par le couplage électromagnétique entre les réseaux électriques et les réseaux de télécommunication qui peut induire dans ces derniers des bruits importants;
- ◆ Le dysfonctionnement de certains équipements électriques comme les dispositifs de commande et de régulation. En présence d'harmoniques, le courant et la tension peuvent changer plusieurs fois de signe au cours d'une demi-période. Par conséquent, les équipements sensibles au passage par zéro de ces grandeurs électriques sont perturbés ;
- ◆ Des phénomènes de résonance. Les fréquences de résonance des circuits 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, notamment de rayonnement électromagnétique.

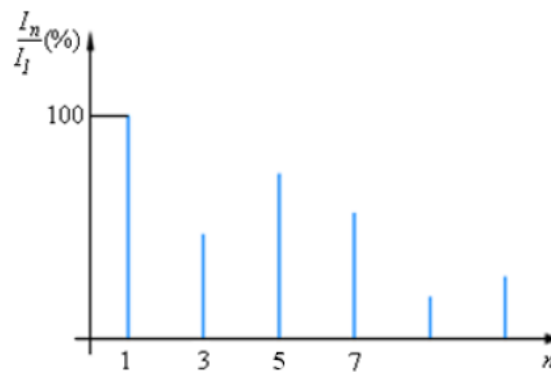
### I.3.5. Caractérisation des Harmoniques

Différentes grandeurs sont définies pour quantifier les perturbations harmoniques. Parmi celles-ci les plus utilisées sont :

#### I.3.5.1. Taux Harmonique de Rang n

Le taux harmonique (tension ou courant) est défini par le rapport entre l'amplitude de la composante harmonique d'ordre n et l'amplitude de la composante du terme fondamental.

$$S_n = \frac{c_n}{c_1} \quad (I.9)$$



**Figure 1.6.** Spectre de fréquences d'un courant non-sinusoidal.

#### I.3.5.2. Taux Global de Distorsion Harmonique (Total Harmonic Distortion)

Le taux global de distorsion harmonique (Total Harmonic Distortion *THD*) représente le rapport de la valeur efficace des harmoniques à la valeur efficace du fondamental. Lorsque le *THD* est égal à zéro, on peut conclure qu'il n'y a pas d'harmoniques sur le réseau. Il est défini par la relation :

$$THD = \sqrt{\sum_2^{\infty} \left(\frac{X_n}{X_1}\right)^2} \quad (I.8)$$

#### I.3.5.3. Facteur de Puissance (Power Factor)

Normalement, pour un signal sinusoidal le facteur de puissance est donné par le rapport entre la puissance active  $P$  et la puissance apparente  $S$ ,  $FP = P/S = P^2/(P^2+Q^2)$ . 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 [7].

Il est donc possible de caractériser les harmoniques par leur participation dans la puissance apparente. Nous utilisons alors la notion de puissance déformante  $D$ , d'où la puissance apparente dans le cas d'un réseau triphasé équilibré sera exprimée sous la formule suivante :

$$S = 3 \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} \cdot \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} = 3V \cdot I \quad (\text{I.9})$$

La puissance active  $P$ , la puissance réactive  $Q$  et la puissance déformante  $D$  sont données par les relations suivantes :

$$P = 3 \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \cos \varphi_n \quad (\text{I.10})$$

$$Q = 3 \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \sin \varphi_n \quad (\text{I.11})$$

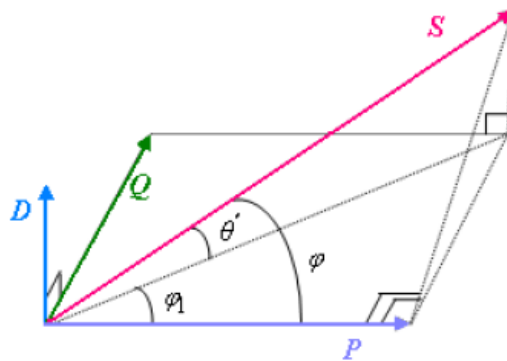
$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (\text{I.12})$$

Le facteur de puissance  $F_p$  est exprimé par l'expression suivante :

$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \cos \varphi_n}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} \cdot \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}} \quad (\text{I.13})$$

D'après le diagramme de Fresnel des puissances représentées sur la figure I.7, le facteur de puissance peut être écrit sous une autre forme :

$$F_p = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \cos \theta' \cdot \cos \varphi_1 \quad (\text{I.14})$$



**Figure 1.7.** Diagramme de Fresnel des puissances pour le cas d'une charge non-linéaire.

Le cas particulier, où la source de tension est considérée comme parfaitement sinusoïdale (réseau de distribution idéal) conduit à une simplification des écritures. En effet, les nouvelles expressions des puissances sont :

$$P = 3VI_1 \cos \varphi_1 \quad (\text{I.15})$$

$$Q = 3VI_1 \sin \varphi_1 \quad (\text{I.16})$$

En ce qui concerne le facteur de puissance, il devient :

$$F_{Ps} = \frac{I_1 \cos \varphi_1}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}} = \frac{\cos \varphi_1}{\sqrt{I_{T.H.}^2 D_i^2}} = F_d \cos \varphi_1 \quad (\text{I.17})$$

L'équation (I.17) montre que le facteur de puissance à la source se compose de deux termes:

- ◆ Le premier terme  $F_d$  désigné sous le nom facteur de distorsion qui qualifie la qualité du courant de source ;
- ◆ Le deuxième terme  $\cos \varphi_1$  représente le facteur de déplacement qui donne une image sur la puissance réactive consommée.

On constate que la dégradation du facteur de puissance est due à la consommation de l'énergie réactive et l'injection des harmoniques sur le réseau.

#### I.3.5.4. Facteur de Crête (Crest Factor)

Le facteur de crête est le rapport entre la valeur de crête du courant ou de la tension et la valeur efficace.

$$F_c = \frac{X_{max}}{X_{eff}} \quad (\text{I.18})$$

- ◆ Pour un signal sinusoïdal, ce facteur est donc égal à  $\sqrt{2}$ .
- ◆ Pour un signal non sinusoïdal, il peut être soit inférieur, soit supérieur à  $\sqrt{2}$ .

Ce facteur est plus particulièrement utile pour attirer l'attention sur la présence de valeurs de crête exceptionnelles par rapport à la valeur efficace. Un facteur de crête très élevé signifie des surintensités ponctuelles importantes. Ces surintensités, détectées par les dispositifs de protections, peuvent être à l'origine de déclenchements intempestifs.

### CONCLUSION

Nous avons présenté dans ce chapitre les divers problèmes de pollution du réseau électrique engendrés par les charges polluantes (non-linéaires)

En premier lieu, nous avons exposé les problèmes de pollution du réseau qui influent

négalement sur la qualité de l'énergie du réseau électrique. Après avoir recensé les origines et les conséquences néfastes des harmoniques sur les différents éléments constitutifs du réseau et sur les récepteurs raccordés à un réseau pollué, nous avons mis l'accent sur les harmoniques produits par les convertisseurs statiques, insistant sur les harmoniques générés par les redresseurs à commutation naturelle (pont de diodes).

Dans la prochaine chapitre et a fin d'améliorer la qualité de l'énergie du réseau électrique tout en respectant les limites imposées par les normes standards, nous avons présenté deux types de solutions, et les différents moyens de dépollution.

# **CHAPITRE 02**

## **SOLUTIONS**

### **TRADITIONNELLE ET**

### **MODERNE**



## II.1 INTRODUCTION :

Le choix de la solution la plus appropriée dépend des caractéristiques de l'offre au niveau du point de connexion, les exigences de la charge et de l'économie .

Il existe deux possibilités pour l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique, l'une est appelée conditionnement de la charge qui consiste à rendre les équipements du processus industriel moins sensibles aux problèmes de la qualité de l'énergie, en leur permettant ainsi de les surmonter,

l'autre possibilité réside dans l'installation d'un dispositif de conditionnement capable de minimiser ou empêcher les perturbations provenant du réseau .

## II.2- Normes standards pour limiter les harmoniques

Afin de garantir un niveau de qualité de l'énergie satisfaisant en limitant les effets des perturbations harmoniques. Les distributeurs d'énergie et les utilisateurs sont amenés à respecter des normes standards des harmoniques qui ont été établies par des institutions internationales pour limiter les niveaux des harmoniques de courant en vue d'une bonne qualité de l'énergie. Ces normes harmoniques et pratiques indiquent les limites sur les niveaux de distorsion des harmoniques de courant et de tension aux différentes fréquences harmoniques. Parmi les principales normes, on cite [13] :

- **EN50 006** : "Limitation des perturbations dans les réseaux électriques causées par des appareils domestiques et semblables équipés de dispositifs électroniques" norme européenne du Comité Européen de Normalisation Electronique (CENELEC).

- **Norme IEC555-3** : préparée par la Commission Electrotechnique Internationale (CEI).

- **Normes allemandes** : VDE 0838 : pour les appareils électroménagers ;

VDE 0160 : pour les convertisseurs ;

VDE 0712 : pour les ballasts de lampes fluorescentes.

- **Norme IEEE** : L'IEEE définit les exigences et les recommandations pratiques pour le contrôle des harmoniques dans les systèmes électriques de puissance. Cette norme s'applique aussi bien aux fournisseurs qu'aux utilisateurs et couvrent toutes les plages de puissance.

Dans ce standard, les limites sont données par rapport au quotient des courants de court circuit au point de raccordement du réseau et du courant de charge fondamental.

La norme IEEE 519-1992 recommande notamment une distorsion harmonique totale de tension inférieure à 5% pour les systèmes de moins de 69 KV et une distorsion harmonique individuelle de tension inférieure à 3%.

· **BSI-5406(UK)** : Ces normes indiquent les limites strictes de distorsion de courant, très difficiles à respecter pour les industriels pour garantir une bonne qualité de puissance. Alternativement, la limite maximale permise pour les différents harmoniques dominants est également parfois employée comme mesure de la qualité de l'énergie, une limite pratique de moins de 5% du THD doit être utilisée par tous les concepteurs de système et/ou les utilisateurs pour assurer la conformité aux normes établies.

### **II.3. 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.

Deux groupes de solutions de dépollution pour compenser toutes les perturbations peuvent être distingués : les solutions traditionnelles et les solutions modernes.

#### **II.3.1. Solutions traditionnelles**

##### **a) Action sur la structure de l'installation :**

Il est souhaitable d'alimenter un grand pollueur par un transformateur à part, afin de le séparer d'un récepteur sensible. Face à un pollueur moyen il est préférable d'effectuer l'alimentation par des câbles distincts au lieu de les connecter en parallèle. Une distribution en étoile permet le découplage par les impédances naturelles et/ou additionnelles [15].

##### **b) Augmentation de la puissance de court-circuit :**

La puissance harmonique augmente lorsque la puissance de court circuit diminue si l'on ne prend pas en compte les phénomènes de résonance [16]. La diminution de l'impédance totale en amont de la charge non-linéaire permet de réduire la tension créée par les harmoniques de courant, et donc de diminuer le taux de distorsion harmonique en tension au point de raccordement. En revanche, les courants harmoniques ne sont pas atténués [11].

##### **c) Placement d'une inductance de ligne :**

Dans le but de limiter la prolifération des effets nocifs dans le réseau, il est possible de limiter les courants harmoniques de certains convertisseurs [17]. Cette solution est utilisée pour les entraînements à vitesse réglable (variateurs de vitesse) et les redresseurs triphasés. Elle consiste à introduire une inductance série en amont d'une charge non linéaire. La distorsion en courant est divisée approximativement par deux [18].

##### **d) Rééquilibrage des courants du réseau électrique :**

Répartition égale des charges sur les trois phases.

- Compensateur passif, par exemple montage de Steinmetz qui provoque un fort déséquilibre pour les fréquences différentes de 50HZ avec des résonances qu'il faut éviter d'exciter a proximité d'un générateur d'harmonique [19].

#### **e) Surdimensionnement ou déclassement de l'installation électrique :**

L'utilisateur ne souhaite pas résoudre les problèmes de pollution mais seulement le souci de la bonne santé de ses équipements. Cette approche, économiquement très contraignante ne s'applique que pour des nouvelles installations [16]. On procède généralement au surdimensionnement des équipements afin d'assurer leur tenue aux surcharges harmoniques. Cette solution n'agit pas sur les harmoniques qui ne subissent aucune action curative de la part de l'utilisateur [15].

#### **f) Compensation de la puissance réactive :**

La puissance réactive est majoritairement consommée par les moteurs asynchrones et plus récemment par des dispositifs à base d'électronique de puissance. Différentes méthodes de compensation sont utilisées pour relever le facteur de puissance [20]. La plus simple consiste à placer des batteries de condensateurs en parallèle avec le réseau, à proximité des charges qui ont un mauvais facteur de puissance pour la compensation locale ou pres d'un transformateur d'alimentation pour la compensation globale [19].

#### **g). Les filtres passifs**

##### **g.1) Classification des filtres passifs :**

Les solutions conventionnelles aux problèmes de distorsion harmonique existent depuis longtemps. Le filtrage passif est la plus simple solution conventionnelle pour atténuer la distorsion harmonique [21]. Les filtres passifs sont des éléments a base d'inductance, capacité et résistance configurés et réglés pour contrôler les harmoniques. On peut classifier les filtres passifs suivant leur **fréquence de résonance**, leur mode de connexion et leur emplacement sur le réseau. Cela permet de définir deux grands modes de filtres passifs: les filtres séries utilisé pour les charges génératrices de tensions harmoniques et les filtres parallèles utilisé dans le cas des charges génératrices de courants harmoniques et suivant le modèle choisi, les harmoniques peuvent être : précisément bloqués par une grande impédance série entre le convertisseur, déviés par une faible impédance en parallèle ou une combinaison des deux.

##### **g.2) Filtre passif série :**

Une façon d'atténuer les harmoniques générées par les charges non linéaires est d'introduire un filtre passif série (Figure II.1), dans l'alimentation d'entrée ligne de sorte que le filtre offre une impédance élevée à la circulation des harmoniques à partir de la source à la charge non-linéaire.

Depuis le filtre passif série est accordé sur une fréquence particulière, il offre une impédance élevée à sa seule fréquence d'accord. Selon la propriété physique de  $L$  et  $C$  choisie, il existe généralement une bande étroite autour de la fréquence d'accord lorsque l'impédance reste élevée [22].

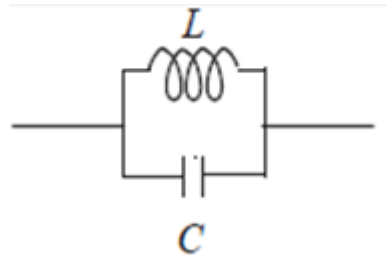


Fig II.2 Filtre passif parallèle

### g.3) Filtre passif parallèle :

Le filtre passif parallèle est montré sur la Figure II.2. Il est constitué d'une inductance en parallèle avec un condensateur. Il présente une impédance faible pour tous les harmoniques et une impédance suffisamment importante par rapport au fondamental, ce qui empêche les courants harmoniques de se propager vers le réseau.

Le filtre passif parallèle à un comportement inductif pour les fréquences inférieures à la fréquence fondamentale et un comportement capacitif pour les fréquences supérieures à la fréquence fondamentale, ce qui est un avantage majeur pour le contrôle du courant dans l'inductance [23].

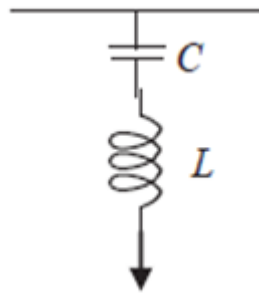
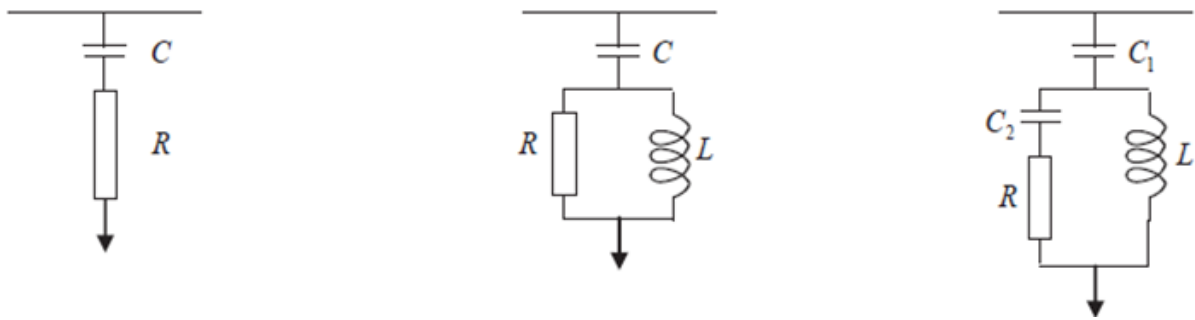


Fig II.1 Filtre passif série

En général dans l'usage, on rencontre deux types de filtres passifs parallèles : le filtre passif amorti et le filtre passif résonant.

#### ❖ Filtre passif amorti :

Le filtre amorti peut réduire le risque de résonance non souhaitée, et permet de réduire considérablement la taille du filtre passif, en fonctionnant sur une large gamme de fréquence. On distingue trois types de filtre amorti : le filtre de premier ordre est très peu utilisé car il exige une grande capacité et provoque des pertes de puissance élevées. Les filtres de deuxième et troisième ordres sont plus performants [24].



a) Filtre amorti de 1<sup>er</sup> ordre

b) Filtre amorti de 2<sup>ème</sup> ordre

c) Filtre amorti de 3<sup>ème</sup> ordre

Fig II.3 filtre amorti

**II.3.1.9. Filtre résonant :**

Le filtre passif résonnant est constitué d'un circuit résonnant composé d'un condensateur et d'une inductance en série accordés sur la fréquence de l'harmonique que l'on veut éliminer. Ce filtre possède une impédance faible pour l'harmonique concerné et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau [25]. Lorsque l'on souhaite réaliser le filtrage d'un signal déformé entaché par plusieurs courants harmoniques, il est nécessaire de prévoir un ensemble de filtres ou chacun d'entre eux agit sur le rang harmonique à éliminer voir la figure II.4 [33].

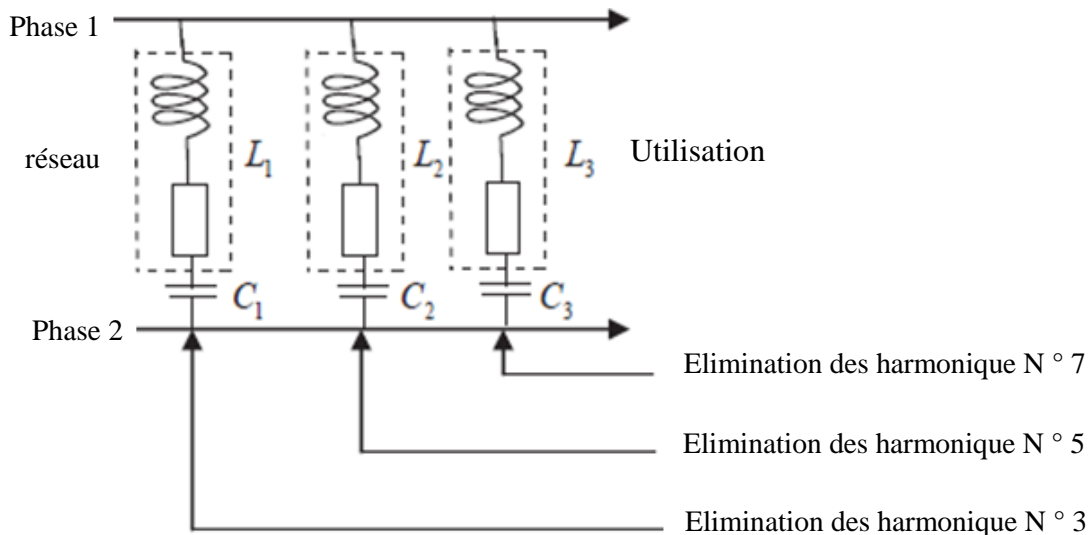


Fig II.4 filtres résonants agissant sur plusieurs rangs harmoniques

**g.4) Les avantages et les inconvénients des filtres passifs :**

Le filtrage passif a déjà largement fait ses preuves dans le milieu industriel grâce à son coût faible, son efficacité et son adaptation pour des réseaux de forte puissance [27]. Cependant Il présente les inconvénients suivants:

- L'impédance du réseau en présence des filtres passif peut faire apparaître des résonances.
- Le filtrage passif peut absorber les courants harmoniques d'autres charges non linéaires et dans ce cas, le filtre passif peut être surchargé.
- Le filtrage passif est peu flexible et, en cas de modifications dans le réseau, il peut avoir du mal à s'adapter aux nouveaux besoins du filtrage.
- La conception des filtres passifs doit considérer la tolérance de fabrication et les dérives paramétriques qui apparaissent à l'usage.

Ainsi, avant d'installer un filtre de ce type, une étude détaillée doit être menée afin d'analyser, cas par cas, les risques de résonance et de surcharge [14].

**II.3.2 Solutions modernes - Les filtres actifs- :****II.3.2.1 introduction :**

Traditionnellement, un filtre passif est utilisé pour éliminer les harmoniques, cependant cet équipement de compensation comporte certains inconvénients, pour cela les filtres actifs ont été proposés pour bien améliorer la qualité d'énergie électrique [28]. Une des applications principales de filtres actifs est l'élimination ou la réduction des harmoniques de courant et de tension [29]. Le principe du filtrage actif est de compenser les harmoniques présents sur les réseaux électriques en injectant des harmoniques de même amplitude mais en opposition de phase [30]. La Figure II.5 présente les composants d'un système typique du filtre actif et de leurs connexions. L'information concernant les courants harmoniques et d'autres variables de système sont transmises à la compensation de (courant/tension) estimateur de signal de référence. Le signal de référence de compensation de l'estimateur conduit le contrôleur du système dans son ensemble et fournit la commande du générateur de signal de déclenchement. La sortie du générateur de signal de déclenchement commande le circuit d'alimentation par l'intermédiaire d'une interface appropriée. Enfin, le circuit d'alimentation dans le diagramme généralisé peut être connecté en configuration parallèle, série ou parallèle –série « filtre actif universelle (UPQC) » [21].

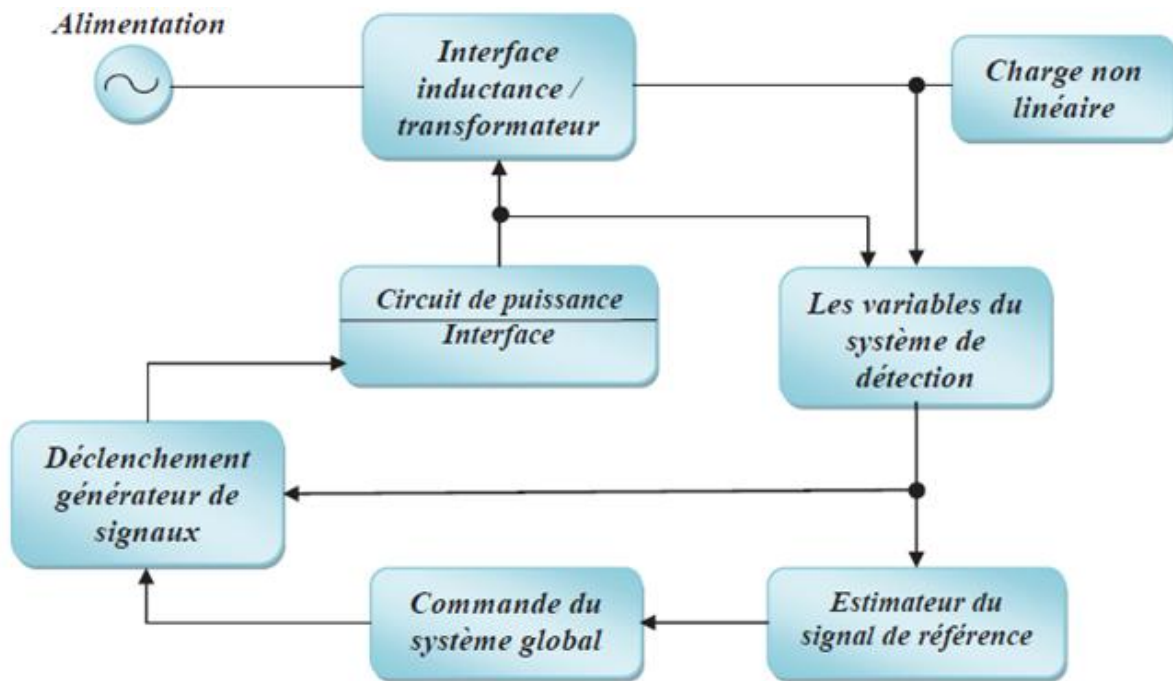


Fig II.5 : schéma généralisé pour le filtre actif

### II.3.2.2 Classification des filtres actifs :

Dans la littérature il existe une grande variété de types de filtres actifs. Ils sont classés de différentes manières selon le nombre de phases «monophases ou triphases», la technologie de l'onduleur «avec ou sans neutre raccordé», et la topologie «l'onduleur de tension ou de courant» [26].

#### II.3.2.2.1. Filtre actif parallèle :

Les filtres actifs parallèles sont les plus utilisés et les plus traités dans les travaux de recherches depuis plus de 30 ans [16].

Le système qui est montré dans la figure II.6, comprend en balance sources d'alimentation de trois phases de tension, un redresseur triphasé à pont de diodes « charge non linéaire » et charge d'inductance  $L_c$  et de résistance  $R_c$ . Le filtre actif parallèle est connecté à la ligne triphasée à travers l'inductance  $L$  [31]. Ce filtre est le plus souvent commandé comme un générateur de courant, il génère des courants harmoniques, en opposition de phase avec le réseau, afin que la somme avec ceux-ci soit nulle [19]. Ceci est réalisé par l'élaboration de la forme d'onde de compensation de courant ( $i_c$ ), en utilisant les commutateurs de l'onduleur. La forme du courant de compensation est obtenue par la mesure du courant de charge ( $i_l$ ) et en la soustrayant la référence sinusoïdale. Le but de filtre actif parallèle est d'obtenir une source de courant sinusoïdale ( $i_s$ ) [21].

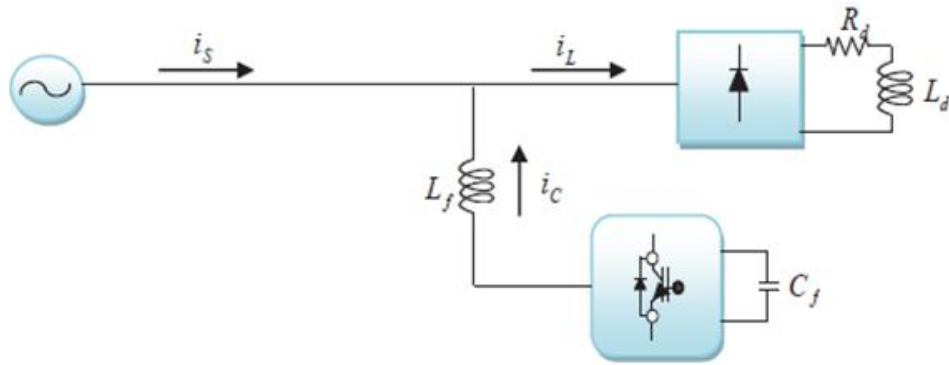


Fig II.6 : principe de configuration de filtre actif parallèle

### II.3.2.2. Filtre actif série :

Le filtre actif série est connecté en série avec l'alimentation par l'intermédiaire d'un transformateur d'adaptation, de sorte qu'il est applicable à la compensation des harmoniques d'un redresseur à diodes de grande capacité avec un condensateur de liaison à courant continu. L'approche est basée sur le principe d'isolement harmonique en contrôlant la tension de sortie du filtre actif série. Ceci est obtenu par l'injection de tensions harmoniques ( $v_c$ ) à travers le transformateur d'interface.

Les tensions injectées harmoniques sont ajoutées / soustraites, à/de la tension de source afin de maintenir une forme d'onde de tension sinusoïdale pure à travers la charge non linéaire. Il est commandé de telle sorte qu'il présente une impédance nulle pour la composante fondamentale, mais apparaît comme une résistance à haute impédance pour les fréquences de composante harmoniques [21].

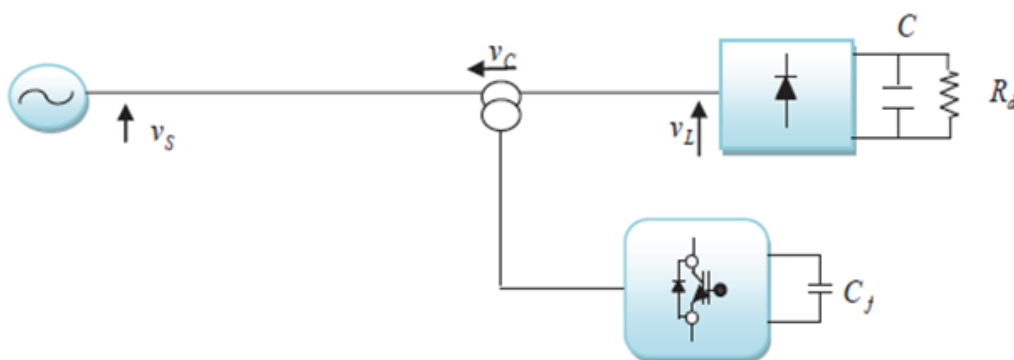


Fig II.7 : principe de configuration de filtre actif série

### II.3.2.2.3. Filtre actif universelle (UPQC) :

La figure II.8 montre la combinaison parallèle série, elle est appelée UPQC (Unified Power Quality Conditioner), elle résulte de l'association des deux filtres actifs parallèle et série, [26].



Le but principal du filtre actif série est d'isoler les harmoniques entre un système de sous-transmission et un système de distribution. En outre, le filtre actif série a la capacité de compenser le déséquilibre de tension, ainsi que la régulation de tension et la compensation des harmoniques. Le but principal du filtre actif parallèle est d'absorber les harmoniques de courant, pour compenser la puissance réactive et le courant inverse, et de régler la tension continue intermédiaire entre les deux filtres actifs. Le filtre actif universel présente de bonnes performances, cependant son coût est élevé et sa commande est complexe. Du fait qu'il y a beaucoup de semi-conducteurs impliqués [23].

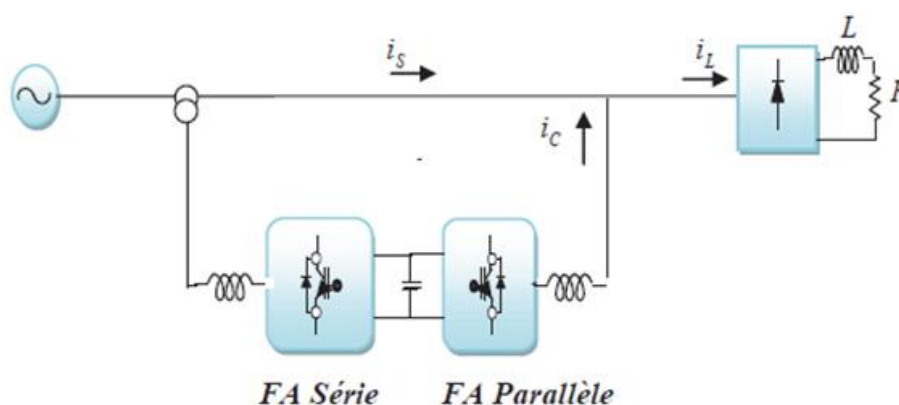


Fig II.8 : principe de configuration de filtre actif universel « UPQC »

### II.3.2.3. Les avantages et les inconvénients du filtre actif:

Le filtre actif offre de nombreux avantages [25]:

- Il peut compenser plusieurs rangs harmoniques (dans la limite de sa bande passante); Il s'adapte automatiquement à l'évolution des charges et du réseau.
- Il est insensible à la variation des caractéristiques du réseau.
- Il n'y a aucun risque de surcharge lorsque le niveau de pollution harmonique à compenser dépasse le dimensionnement du filtre actif, puisque il fonctionne au maximum de ses capacités et tout risque de destruction est écarté; La compensation de la puissance réactive est envisageable.
- Le risque de résonance (amplification des harmoniques) entre filtre et impédance du réseau, qui existe avec un filtre passif est supprimé.

Toutefois, le filtrage actif présente quelques inconvénients [27]:

- Le filtrage actif n'est possible que dans le cas des réseaux de faible puissance.
- Il permet la compensation de l'énergie réactive, mais à un coût très élevé par rapport au filtrage passif.

- Son coût est beaucoup plus élevé que celui du filtre passif.

#### II.3.2.4.Filtre hybride :

Afin de réduire le dimensionnement et par conséquent le prix des filtres actifs, l'association de filtres actifs a des filtres passifs peut être une solution. Dans ce cas on connectera en parallèle ou en série des filtres passifs pour compenser les harmoniques prépondérants [16]. Ainsi, les filtres passifs éliminent les harmoniques en basses fréquences, ce qui permet de réduire le dimensionnement du filtre actifs qui ne compense que le reste des perturbations. En conséquence, le filtre hybride est plus petit que pour un filtre actif et la réponse est bien meilleure qu'avec des filtres passifs seuls. Cette structure permet d'améliorer les caractéristiques de compensation des filtres passifs et de réaliser ainsi une réduction de la valeur nominale du filtre actif. Souvent le filtre passif est formé par deux R filtres réglés aux fréquences des harmoniques 5 et 7 et un filtre passe haut réglé autour de la fréquence de l'harmonique 11. Ainsi dans ce cas, le filtre actif permet d'éviter des resonances entre les éléments passifs et le réseau [.

#### II.4 Comparaison des différents types de perturbations

Le tableau.1.1 montre une comparaison des différents types de perturbations ainsi leurs solutions [7].

Types de perturbation	Origines	Conséquences	Exemples de solutions
<b>Creux de tension</b>	Court-circuit, commutation de charge de forte puissance (démarrage moteur...).	- Perturbation ou arrêt d procédé: pertes de données, ouverture de contacteurs, verrouillage de variateurs de vitesse, ralentissement ou décrochage de moteurs.	- ASI, compensateur automatique en temps réel, Régulateur électronique dynamique de tension, démarreur progressif, compensateur électronique série - - Augmenter la puissance de court-circuit (Pcc).
<b>Déséquilibre de tension</b>	- Charges déséquilibrées (charges monophasées de forte puissance).	Couples moteurs inverses (vibrations) et sur échauffement des machines asynchrones	- Equilibrer les charges. - Compensateur électronique shunt, régulateur électronique

			dynamique de tension. - Augmenter la Pcc.
<b>Variations et Fluctuations de tension</b>	Variations importantes de charges (machines à souder, fours à arc...).	Fluctuation de la luminosité des lampes (papillotement ou flicker).	-Compensateur électromécanique d'énergie réactive, compensateur automatique en temps réel compensateur électronique série, régulateur en charge.
<b>Harmoniques</b>	- Charges non linéaires (variateurs de vitesse, fours à arc, machines à souder, lampes à décharge, tubes fluorescents...).	Surcharges (du conducteur de neutre, des sources...), déclenchements intempestifs, vieillissement accéléré, dégradation du rendement énergétique, perte de productivité.	-Self anti-harmonique, filtre passif ou actif, filtre hybride, -Inductance de ligne. -Augmenter la Pcc. -Confiner les charges polluantes. - Déclasser les équipements.
<b>Interharmonique</b>	- Charges fluctuantes (fours à arc, machines à souder...), convertisseur de fréquence.	Perturbation des signaux de tarification, papillotement (flicker).	-Réactance série

Tableau II.1 : Les solutions des équipements spécifiques pour les différents types de perturbations

## II.5 CONCLUSION

Comme nous avons pu le constater dans ce premier chapitre, la qualité de l'énergie électrique est affectée pas des les différents type des perturbations comme les creux de tension, le déséquilibre ainsi que les harmonique, qui engendrent la dégradation de la qualité de l'énergie et donc une mauvaise satisfaction et prestation du client.

Cependant aux perturbations elles subies des solutions existent, soit traditionnelles ou modernes, doivent être prise afin de minimiser les effets des perturbations et garantir une alimentation de qualité. Les solutions traditionnelles comme les filtres passifs qui ne sont pas très performants avec des charges non linéaire et variable. Pour cela et avec les progrès de l'électronique de puissance et de l'informatique, les travaux de recherches ont été orientés vers des nouvelles solutions à savoir les filtres actifs : série, parallèle et hybride, dans ce contexte un état de l'art actuel des filtres actifs a été dressé dans ce chapitre pour qui il nous aide à déterminer la stratégie et les points de contributions de notre travail.

Dans le chapitre suivant, nous présenterons l'étude détaillée du filtre actif parallèle ainsi que leurs stratégies de commande.

# **CHAPITRE 03**

## **FILTRE ACTIF PARALLELE**

### III.1 Introduction

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

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

### III.2 Principe de filtre actif parallèle

Ce filtre est le plus souvent commandé comme un générateur de courant, il génère des courants harmoniques, en opposition de phase avec le réseau, afin que la somme avec ceux-ci soit nulle. On obtient alors des courants alternatifs au niveau du réseau. Il permet donc de supprimer au point de raccordement tous les harmoniques de courants de charge non linéaire. En générale, le filtre actif parallèle est utilisé pour la dépollution des réseaux BT et MT. Son impédance totale vis à vis de la source et de la charge lui confère une bonne auto-adaptabilité avec les performances appréciables [10]. Sa structure est la suivante :

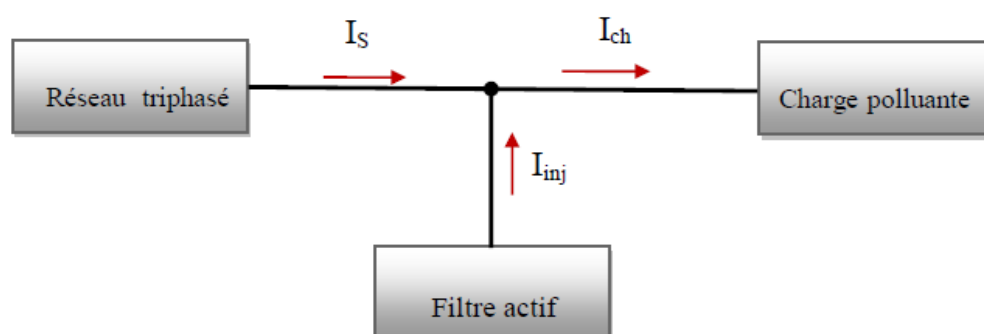


Figure III.1 Principe de filtre actif parallèle

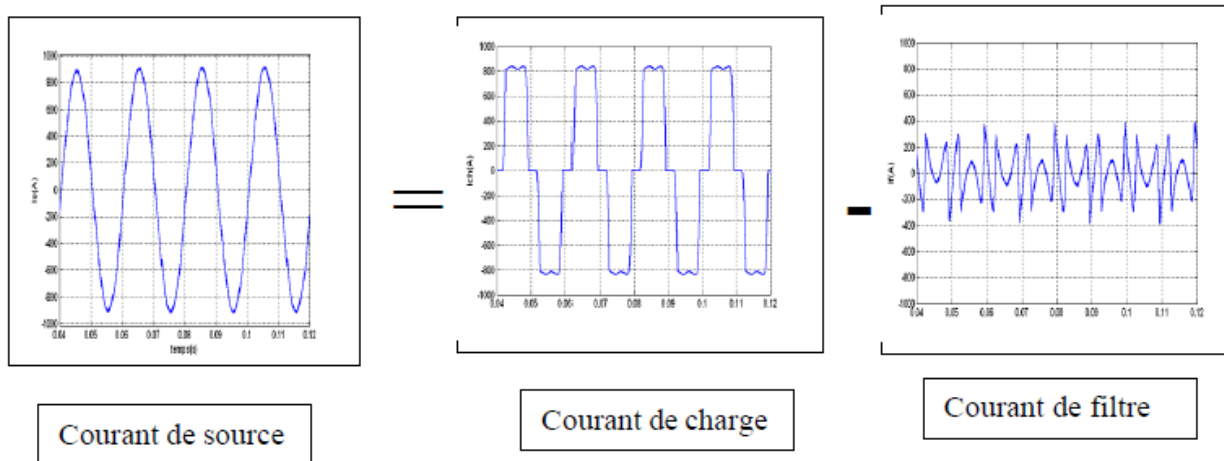


Figure III.2 : Courant de source, charge et filtre

### III.3. La Structure générale d'un filtre actif parallèle :

Nous distinguons donc deux types de filtres actifs parallèles, le filtre actif à structure tension et le filtre actif à structure courant. Nous nous intéressons uniquement au filtrage actif parallèle à structure tension.

Le filtre actif se compose de deux parties distinctes: La partie puissance et la partie commande. La partie puissance est constituée d'un élément de stockage d'énergie, d'un pont onduleur triphasé et d'un filtre de sortie généralement du premier ordre. Pour la partie commande, on a le bloc d'identification des courants de références, le contrôle des courants injectés au réseau ainsi que la commande des interrupteurs.

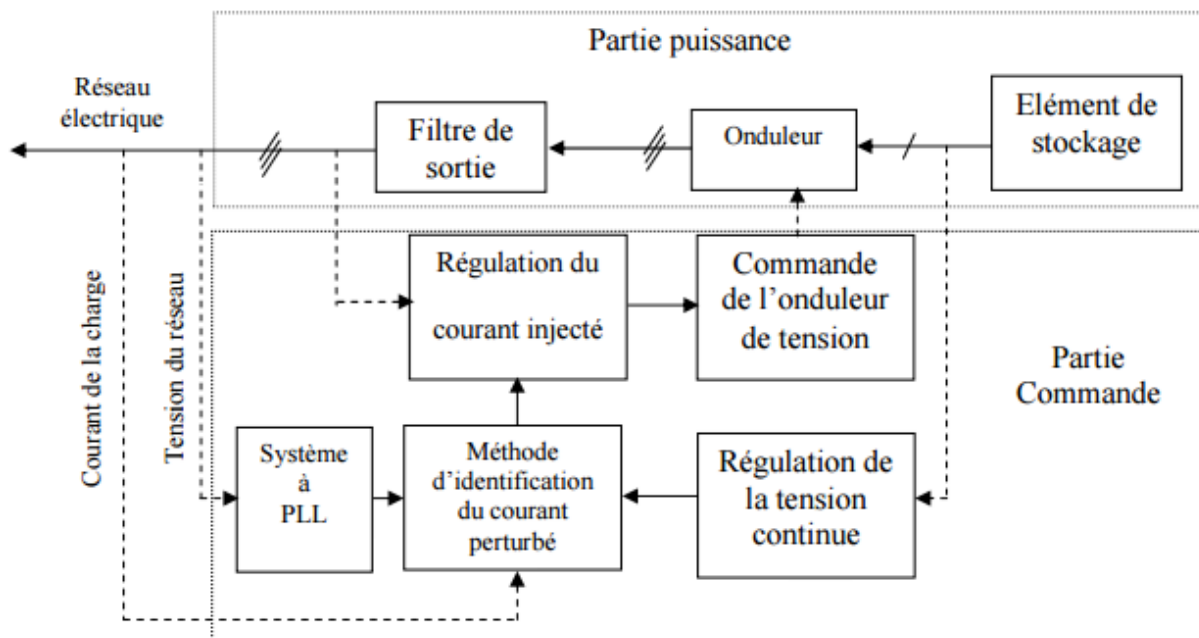


Figure III.3. La Structure générale d'un filtre actif parallèle

La partie puissance qui est constituée :

- D'un onduleur de tension
- D'un circuit de stockage d'énergie, souvent capacitif.
- D'un filtre de sortie

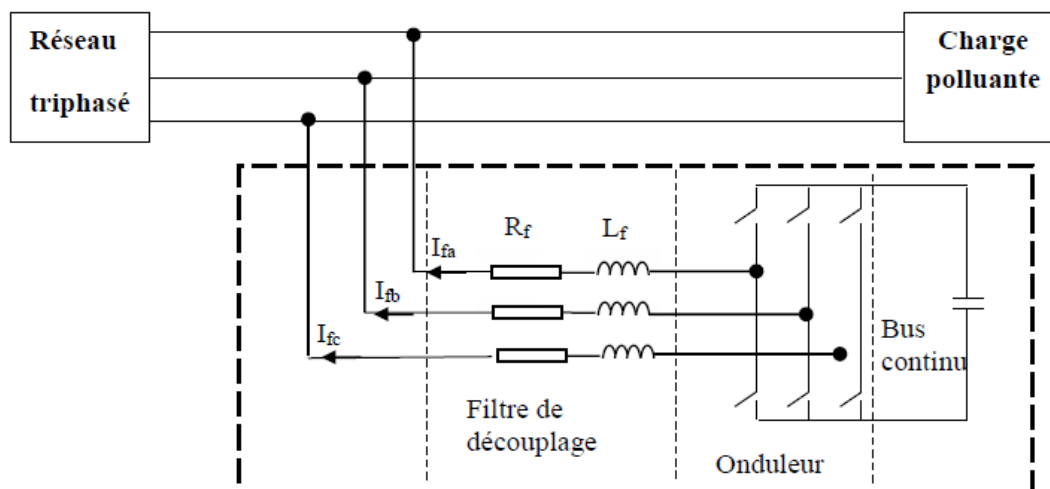
La partie de commande qui constituée :

- D'un circuit d'identification des courants perturbés.
- D'un système a base PLL (boucle de verrouillage de phase) qui sera intégré dans la méthode d'identification des courant.
- De la régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie.
- De la régulation du courant injecté sur le réseau a partir de l'onduleur de tension.

### III.4 La partie puissance d'un filtre actif parallèle à structure tension

Le schéma du circuit de puissance d'un filtre actif parallèle à structure tension est donné sur la figure (III.4) On y distingue trois éléments :

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



III.4 : schéma du circuit de puissance d'un filtre actif parallèle a structure

La figure (II.5) 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.

### III.4.1 L'onduleur de tension

L'onduleur de tension, de par sa capacité a réaliser un grand nombre de fonctionnalités, a été naturellement mis a contribution pour réaliser des objectifs de compensation.

L'onduleur de tension est composé de trois bras chacun a deux interrupteurs bidirectionnels en courant commandés a l'amorçage et au blocage, ils sont réalisés avec un transistor (MOSFET, IGBT, GTO) associé a une diode antiparallèle pour réversibilité en courant.



Figure (III.5) Interrupteurs de puissance

L'onduleur triphasé est constitué d'interrupteurs bidirectionnels en courant. Ils sont réalisés par des semi-conducteurs command-ables 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 mets-en-antiparallèle de diodes au niveau des interrupteurs.

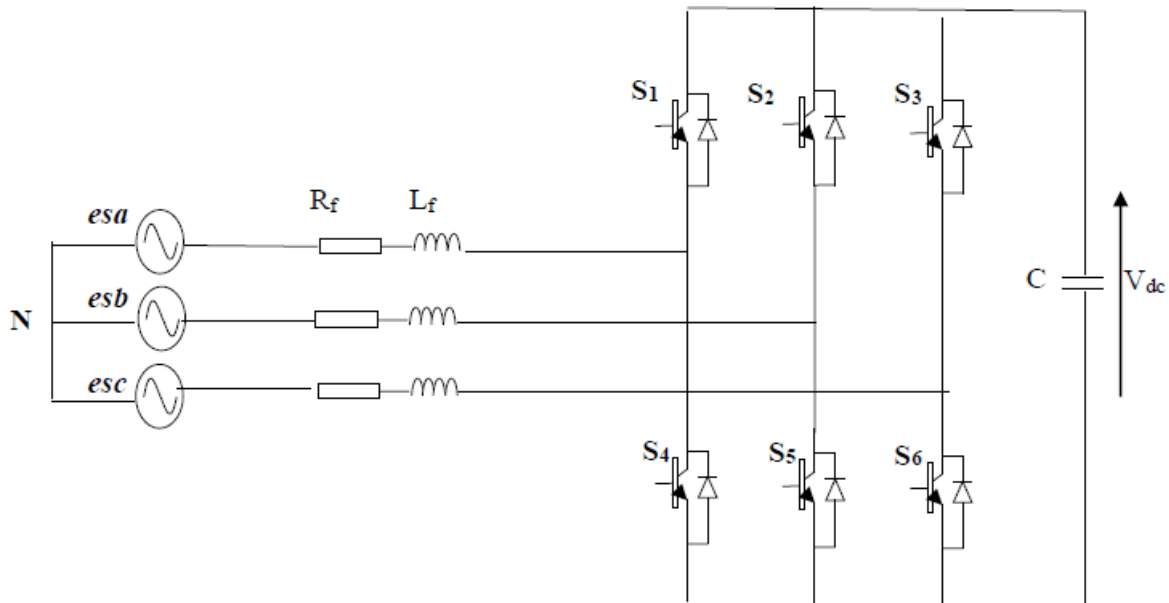


Figure III.6. filtre actif a structure tension

**III.4.2.Tension fournie par l'onduleur :**

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(III.5) dépendent de l'état de trois signaux de commande (T1, T2, T3), définis ci-dessous :

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

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

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

Les tensions de ligne, imposées par l'onduleur, sont alors définies par :

$$\begin{bmatrix} V_{f1} & - & V_{f2} \\ V_{f2} & - & V_{f3} \\ V_{f3} & - & V_{f1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 & - & S_2 \\ S_2 & - & S_3 \\ S_3 & - & S_1 \end{bmatrix} \tag{III.1}$$

Les tensions de sortie de l'onduleur, poses par  $v_{fx}$  ; avec ( $x = \{1, 2, 3\}$ ), sont référencées par rapport au neutre du réseau et vérifient l'équation suivante :

$$V_{fx} = V_{sx} + L_f \frac{di_{fx}}{dt} + R_f i_{fx} \quad (\text{III.2})$$

Les tensions du réseau étant supposées équilibrées et sachant que la somme des courants injectés par l'onduleur est nulle, on peut écrire :

$$\begin{cases} V_{s1} + V_{s2} + V_{s3} = 0 \\ I_{f1} + I_{f2} + I_{f3} = 0 \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

Nous pouvons donc déduire des équations (2.5) et (2.6) la relation suivante :

$$V_{f1} + V_{f2} + V_{f3} = 0 \quad (\text{III.4})$$

A partir des équations (2.4) et (2.7), nous obtenons :

$$\begin{bmatrix} V_{f1} \\ V_{f2} \\ V_{f3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2S_1 & -S_2 & -S_3 \\ -S_1 & 2S_2 & -S_3 \\ -S_1 & -S_2 & -2S_3 \end{bmatrix} \frac{V_{dc}}{3} \quad (\text{III.5})$$

Puisque les grandeurs  $S_1$ ,  $S_2$  et  $S_3$  peuvent prendre chacune deux valeurs (0 ou 1), il en résulte huit commandes possibles, présentées dans le tableau 2.1.

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  $T_3$ ,

### III.4.3. Filtre de découplage

Le but du filtre de découplage est de permettre la connexion de l'onduleur de tension au réseau électrique qui est très souvent considéré comme une source de courant qui génère des courants harmoniques à partir de la différence des tensions entre la sortie du pont onduleur et le réseau [4].

Ce filtre est un filtre qui limite certes la dynamique du courant mais réduit en même temps la propagation sur le réseau électrique des composantes dues aux commutations.

Dans ce travail, nous avons utilisé un filtre entre l'onduleur et le réseau électrique qui se compose d'une inductance  $L_f$  de résistance interne  $R_f$ , comme le montre la figure (II.5). Notons toutefois que des filtres de découplage du troisième ordre, de type L-C-L, pourraient également être utilisés. Dans notre étude, nous emploierons ce filtre du premier ordre..

#### II.4.4 Système de stockage d'énergie

Le stockage de l'énergie du côté continu se fait souvent par un système de stockage capacitif représenté par un condensateur  $C_{dc}$  qui joue le rôle d'une source de tension continue  $V_{dc}$ . Le choix des paramètres du système de stockage ( $V_{dc}$  et  $C_{dc}$ ) se répercute sur la dynamique et sur la qualité de compensation du filtre actif parallèle.

En effet, une tension  $V_{dc}$  élevée améliore la dynamique du filtre actif.

De plus, les ondulations de la tension continue  $V_{dc}$ , causées par les courants engendrés par le filtre actif et limitées par le choix de  $C_{dc}$ , peuvent dégrader la qualité de compensation du filtre actif parallèle. Ces fluctuations sont d'autant plus importantes que l'amplitude du courant du filtre est grande et que sa fréquence est faible.

Le condensateur du côté continu a deux fonctionnalités principales : Maintenir la tension avec un faible taux d'ondulation en régime permanent, être un réservoir qui sert à fournir la différence d'énergie de la charge et la source durant le régime transitoire.

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

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

### III.5 Contrôle des courants du filtre actif (partie commande)

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

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

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

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

#### III.5.1. Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)

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

Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur (modulatrice) à partir de l'écart entre le courant mesuré et sa référence. Cette dernière est ensuite comparée avec un signal triangulaire (porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs. Le Schéma de principe est donné par la figure (III.7) et (III.8).

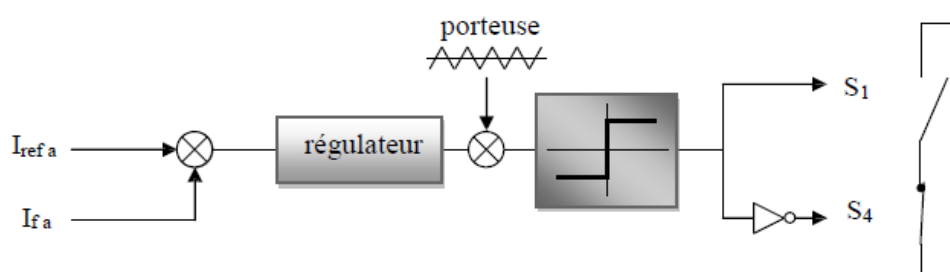


Figure III 7: principe de commande par MLI

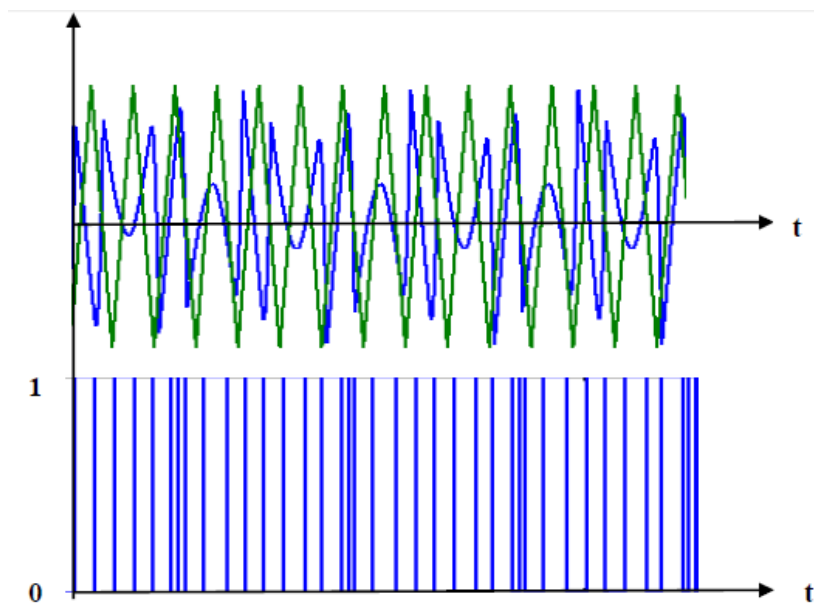


Figure III 8 : signal de commande et référence

**Conclusion :**

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

**CHAPITRE 04**

**MODULISATION ET**

**REGULATION D'UN FILTRE**

**ACTIF PARALLELE**

## IV.1 Introduction

La structure d'un filtre actif parallèle se décompose en deux parties, soit d'une partie puissance et d'une partie commande. La partie puissance se compose d'un onduleur à base d'interrupteurs de puissance, command-ables à l'amorçage et au blocage (GTO, IGBT,... etc.) avec des diodes en antiparallèle, d'un filtre de couplage et d'un élément passif fait un circuit de stockage d'énergie, souvent capacitif.

La partie commande, sert au contrôle de la commutation des éléments onduleur, la méthode d'identification des courants perturbés.

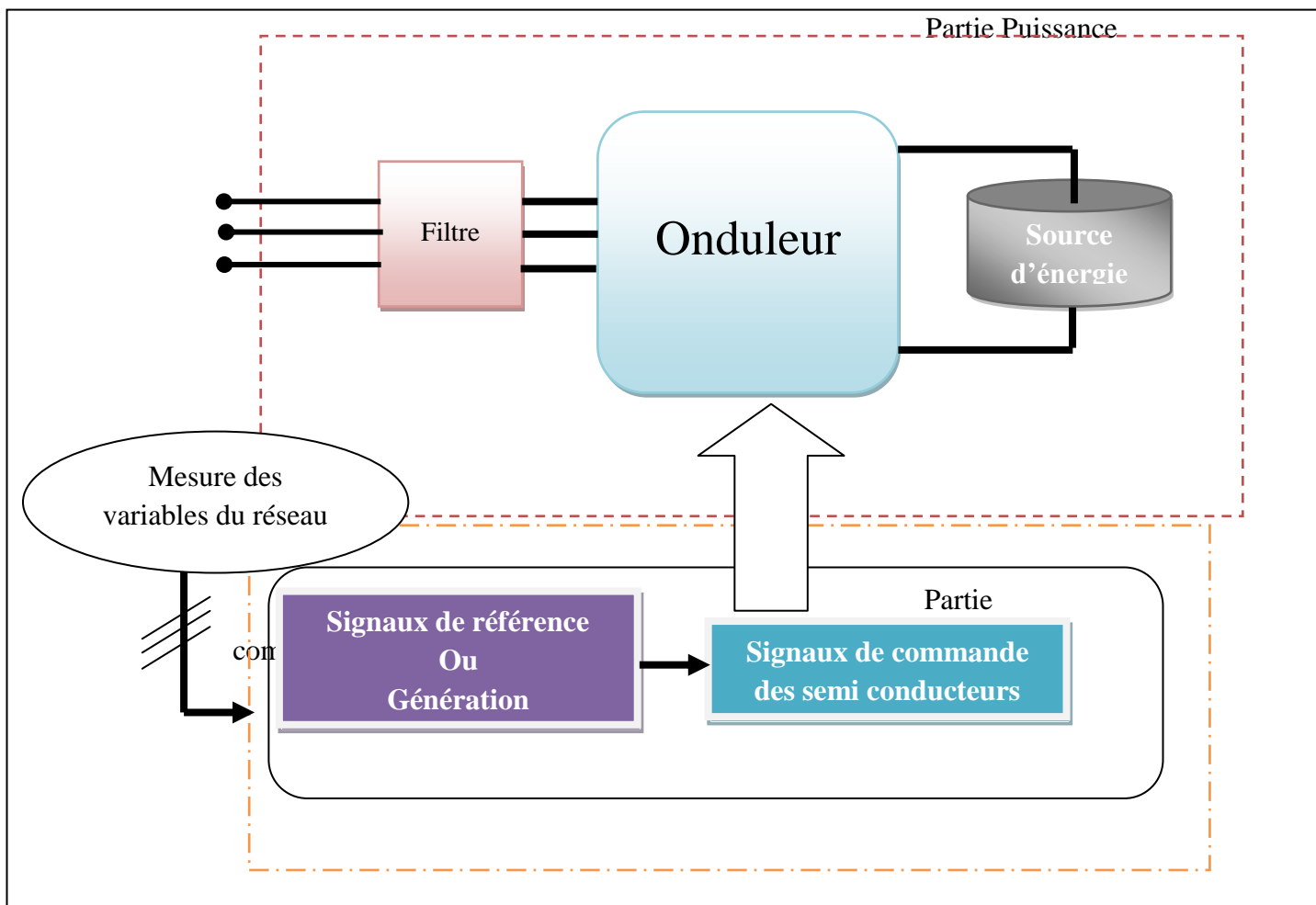


Figure IV-1 la structure général d'un filtre actif parallèle

## IV.2 Structure du filtre actif

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



en courant et peut donc se comporter comme une source de tension ou de courant vis-à-vis du circuit extérieur. En pratique, suivant le type de correction à apporter au réseau, une structure sera préférée à l'autre si elle rend plus aisée et moins onéreuse la réalisation de l'ensemble convertisseur commande.

La source d'énergie composant le filtre peut être une source de tension ou de courant. Comme l'onduleur n'a pas à fournir de puissance active, cette source peut être un élément réactif, condensateur ou inductance, dans lequel on maintient constante la valeur moyenne de l'énergie stockée. Cet élément de stockage d'énergie n'a pas besoin d'être lui-même alimenté par une source continue. La raison est que le filtre actif peut être contrôlé de manière à suppléer aux pertes de sa source d'énergie à partir du courant fondamental générée par la source du réseau auquel il est connecté.

### IV.3. Filtre actif parallèle à structure de tension

La figure illustre le filtre actif parallèle à structure de tension. Seul le circuit de stockage caractérise la structure, une capacité ou une inductance servant de source d'énergie est la capacité  $C$  qui doit délivrer une tension à valeur presque constante est inférieure à la tension supportable par les semi-conducteurs. De plus, l'inductance  $L_f$  du filtre à des limites, car cela affecterait les performances de compensation du filtre actif. L'inductance par laquelle l'onduleur est relié au réseau sert à filtrer les courants harmoniques hautes fréquences. Ces courants harmoniques sont causés par les impulsions de tension générées par l'onduleur.

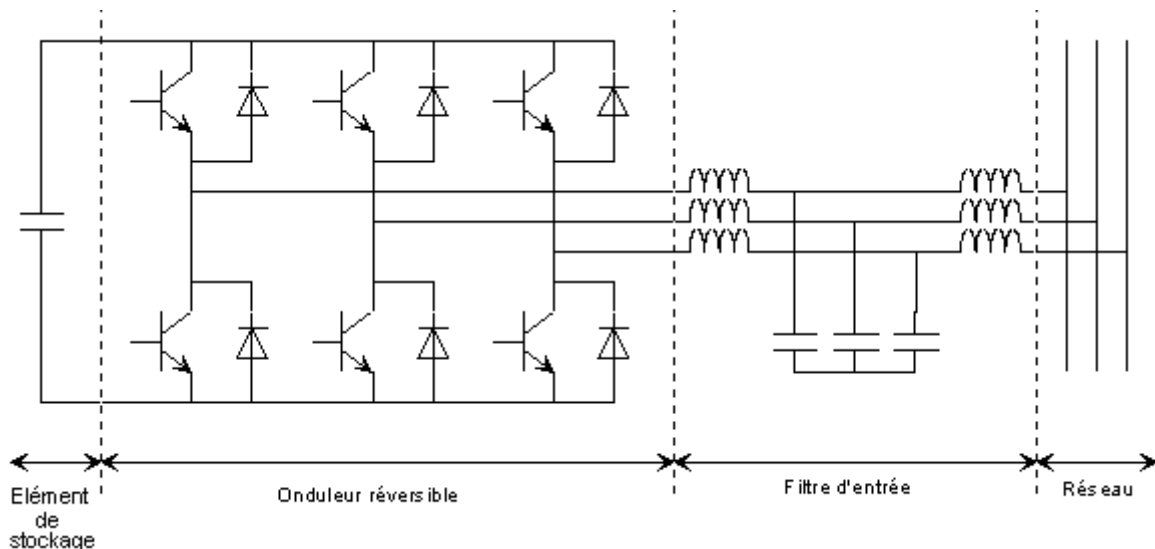


Figure IV-2 la structure d'un FAP a base de tension

### IV.4. Filtre actif parallèle à structure de courant

Sur la figure suivante 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'éliminée le phénomène de résonance, des résistances peuvent être insérées dans le filtre passe-bas.

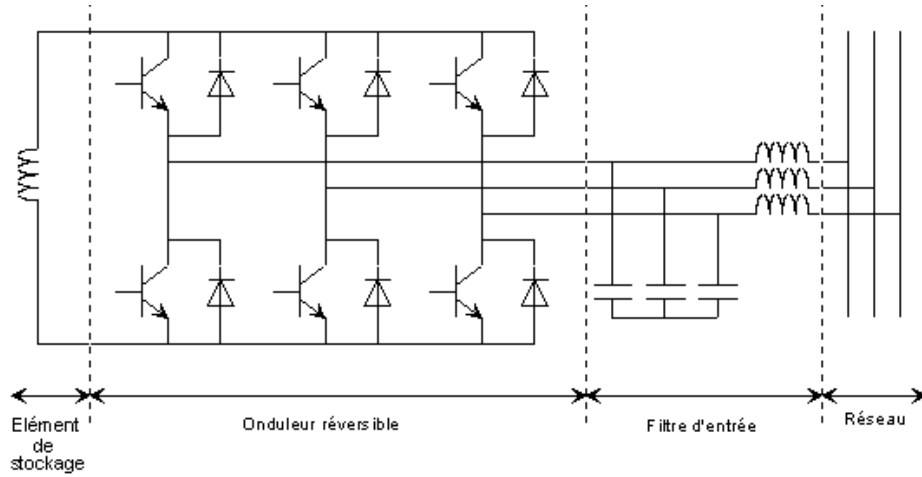


Figure IV-3 la structure d'un FAP a base de courant

Pour que les états des interrupteurs ne dépendent que des signaux de contrôle, il faut commander un seul composant par demi-pont. Le problème est lors du passage de court d'une phase à l'autre, phénomène d'empiétement. Des trois interrupteurs reliés à la même borne de la source de courant continu, il faut qu'il y en ait toujours un fermé pour que cette source de courant ne soit jamais en circuit ouvert.

Numéro de l'état	Interrupteur fermée	$I_{m 1}$	$I_{m 2}$	$I_{m 3}$
1	$T_1, T_5$	$I_{df}$	$-I_{df}$	0
2	$T_1, T_6$	$I_{df}$	0	$-I_{df}$
3	$T_2, T_6$	0	$I_{df}$	$-I_{df}$
4	$T_2, T_4$	$-I_{df}$	$I_{df}$	0
5	$T_3, T_4$	$-I_{df}$	0	$I_{df}$
6	$T_3, T_5$	0	$-I_{df}$	$I_{df}$
7	$T_1, T_4$	0	0	0
8	$T_2, T_5$	0	0	0
9	$T_3, T_6$	0	0	0

Tableau IV-1 Courants générés par l'onduleur a structure de courant

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

#### IV.5.Stratégie de commande

La stratégie de commande se base sur la détection des courants perturbateurs dans le domaine temporel. Trois possibilités d'identification des courants perturbateurs ont déjà été proposées :

- 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 tension de la source.

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

En présence des harmoniques, la puissance apparente est composée de trois parties active, réactive et déformante.

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad \text{IV-1}$$

Dans cette stratégie de contrôle, les mesures des tensions et des courants exprimés sous forme triphasée ( $a-b-c$ ) sont converties en système biphasé ( $\alpha-\beta$ ) équivalent à l'aide de la transformée de Concordia qui laisse la puissance invariante :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad \text{IV-2}$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad \text{IV-3}$$

La puissance réelle instantanée  $p$  et la puissance réactive instantanée  $q$  peuvent être exprimées de façon équivalente en système biphasé par :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad \text{IV-4}$$

Ce qui nous donne :

$$p = v_\alpha * i_\alpha + v_\beta * i_\beta \quad \text{IV-5} \quad \text{puissance réelle instantanée}$$

$$q = v_\alpha * i_\beta - v_\beta * i_\alpha \quad \text{puissance imaginaire instantanée}$$

La puissance réelle instantanée ainsi que la puissance imaginaire instantanée peuvent être exprimées de la façon suivante

$$P = \bar{p} + \tilde{p}$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q}$$

Où  $p$  et  $q$  sont, de façon respective, les composantes des puissances moyennes actives et réactives correspondant au courant de charge fondamentale (50 Hz), alors que  $\tilde{p}$  et  $\tilde{q}$  correspondent aux composantes alternatives liées au courant harmonique. La compensation d'harmoniques par le filtre actif se fait par la génération de ces dernières :

$$p^* = \tilde{p} \quad , \quad q^* = \tilde{q}$$

En conséquence, l'élimination de la composante fondamentale dans les équations 5.6 et 5.7 s'effectue à l'aide de deux filtres passe-bas de Butterworth (figure 5.1) d'ordre deux [26].

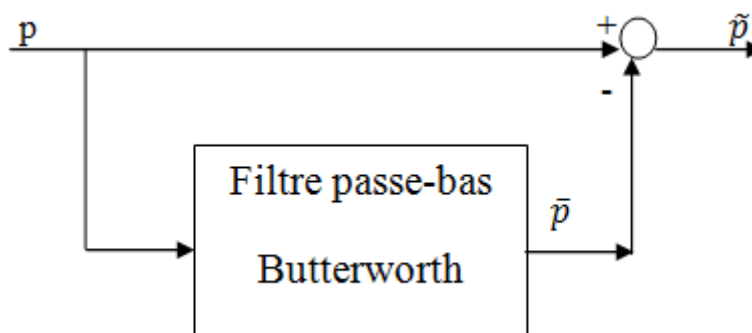


Figure IV-4 filtrage de la composante de la puissance continue

Les courants de compensation de référence se calculent par la formule suivante

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha^* \\ i_\beta^* \end{bmatrix} \quad \text{IV-6}$$

$$\text{Ou : } \begin{bmatrix} i_\alpha^* \\ i_\beta^* \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p^* \\ q^* \end{bmatrix}$$

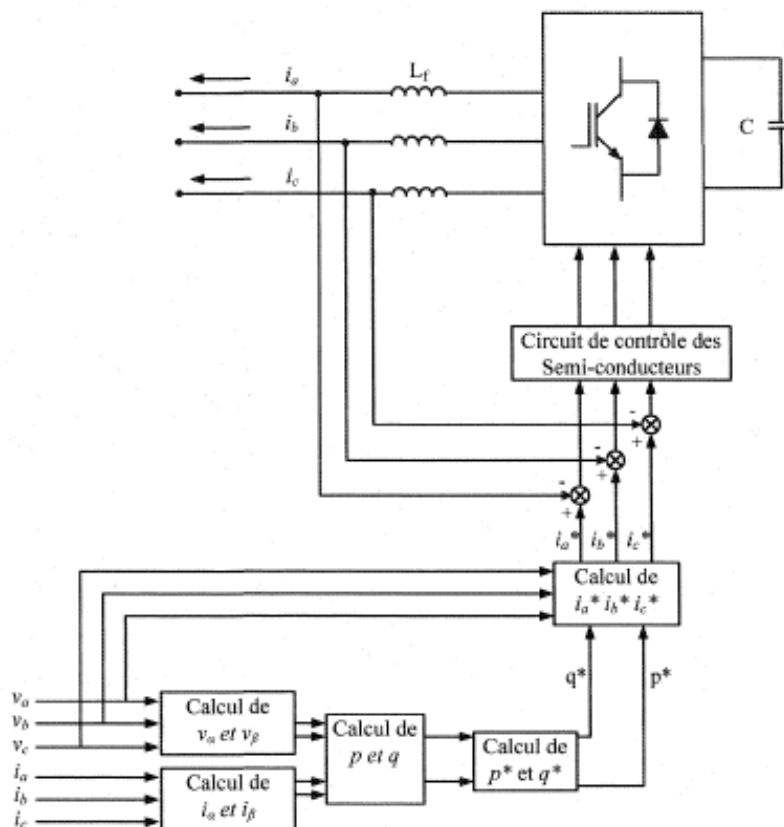


Figure IV-5 calcul de courant de référence

La méthode des puissances instantanées possède les quelques caractéristiques suivantes:

- Elle est une théorie inhérente aux systèmes triphasés.
- Elle 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 lui donne de bons temps de réponse dynamique.
- Le nombre d'harmoniques compensé dépend de la bande passante des semi-conducteurs composant 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).

#### IV.6. La régulation et l'adaptation du filtre actif :

Pour que le filtre actif s'adapte aux variations de la charge on doit agir sur deux paramètres essentiels qui sont la tension continue à l'entrée de l'onduleur et le courant du filtre actif parallèle.

#### IV.6.1. Régulation de la tension continue

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 dans le filtre actif (semi-conducteur et filtre de sortie). La régulation de la tension moyenne aux bornes du condensateur de stockage d'énergie doit se faire par l'adjonction des courants fondamentaux actifs dans les courants de référence. La sortie du régulateur  $P_c$  s'ajoute, à un signe près, à la puissance active perturbatrice  $\tilde{P}$  et donne lieu à un courant fondamental actif corrigeant ainsi  $V_{dc}$  ( $C_f$ . Fig). La puissance  $P_c$  représente la puissance active nécessaire pour maintenir la tension  $V_{dc}$  égale à la valeur de la tension de référence souhaitée ( $V_{dc-ref}$ ).

Le régulateur employé ici est un régulateur proportionnel simple ( $K_c$ ) avec une action de filtrage au préalable sur la tension mesurée  $V_{dc}$ , réalisée par un filtre passe-bas du deuxième ordre de manière à atténuer les fluctuations à 300 Hz.

En négligeant les pertes de commutations dans l'onduleur ainsi que l'énergie stockée dans l'inductance du filtre de sortie, la relation entre la puissance absorbée par le filtre actif et la tension aux bornes du condensateur peut s'écrire sous la forme suivante :

$$p_c = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} C_{dc} \cdot V_{dc}^2 \right) \quad \text{IV-7}$$

Notons que la relation (IV-7) est non linéaire. Pour des faibles variations de la tension  $V_{dc}$  autour de sa référence  $V_{dc-ref}$ , elle peut être linéarisée à travers les relations suivantes :

$$\begin{cases} P_c = C_{dc} V_{dc-ref} \frac{d}{dt} (V_{dc}) \\ \Leftrightarrow V_{dc}(s) = \frac{p_c(s)}{V_{dc-ref} C_{dc} s} \end{cases} \quad \text{IV-8}$$

La régulation de la tension continue peut être fonctionnellement représentée par la fig IV-7

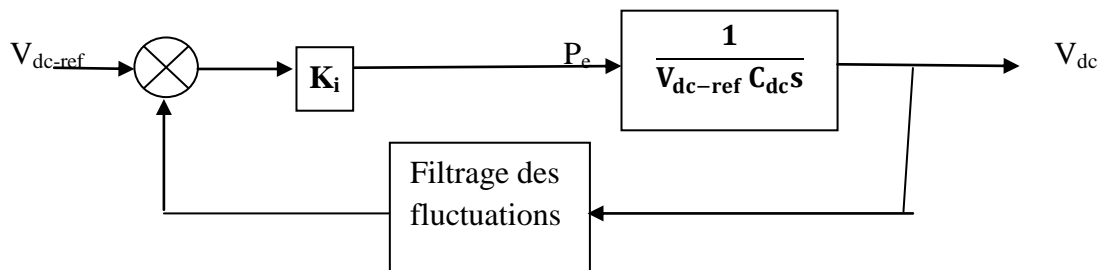


Figure IV-6 boucle de régulation de tension continue

### IV.6.2. régulation du courant du filtre actif parallèle

En négligeant les effets de la capacité  $C_{dc}$  et des résistances du filtre de sortie sur le courant de référence  $I_{inj}$  (pour les harmoniques basses fréquences qui sont loin de la fréquence de commutation), nous pouvons écrire la relation suivante caractérisant le courant du filtre actif  $I_{inj}$  :

$$L_f \frac{d}{dt} \vec{I}_{inj} = \vec{V}_f - \vec{V}_s$$

avec  $L_f = L_{f1} + L_{f2}$  IV-9

Notons par  $f_I$  la différence entre le courant de référence et le courant mesuré à partir de la relation suivante :

$$\Delta \vec{I}_f = \vec{I}_{ref} - \vec{I}_{inj}$$
 IV-10

Des équations (II.26) et (II.27), nous obtenons l'expression ci-dessous :

$$L_f \frac{d}{dt} \Delta \vec{I}_f = (\vec{V}_s + L_f \frac{d}{dt} \vec{I}_{ref}) - \vec{V}_f$$
 IV-11

Le premier terme de la partie droite de la relation (II.28) peut être défini comme tension de référence ( $V_{f-ref}$ ), ce qui nous donne l'expression suivante :

$$\vec{V}_{f-ref} = \vec{V}_s + L_f \frac{d}{dt} \vec{I}_{ref}$$
 IV-12

L'écart entre  $V_{f-ref}$  et  $V_f$  produit alors une erreur sur le courant. Selon la relation (II.29), la tension de référence est composée de deux termes à fréquences différentes. Le premier représente la tension du réseau  $V_s$  directement mesurable. Le second est égal à la chute de tension aux bornes de l'inductance  $L_f$ , lorsque celle-ci est traversée par un courant égal à celui de la référence. Ce terme doit être élaboré par un régulateur de courant, comme le montre la Fig. IV-7.

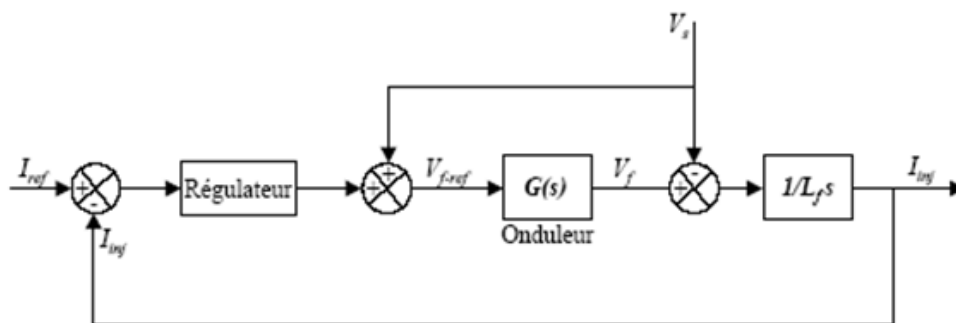


Figure IV-7 schéma de la régulation des courants du F.A.P

#### **IV.7.Méthode de régulation par PI**

Un régulateur doit satisfaire aux objectifs généraux de la régulation ainsi qu'aux contraintes liées au rejet des perturbations. Dans le cas d'un régulateur aussi simple que le régulateur *PI*, et à cause du manque de degré de liberté que nous impose ce dernier, seule la poursuite des références pour un point de fonctionnement fixe pourra être envisagée. A cela s'ajoute le problème du compromis à trouver dans le cas d'une structure de *filtre actif parallèle* avec un filtre de sortie du premier ordre (choix de l'inductance). En effet, un régulateur *PI* ne peut pas assurer, avec les seuls paramètres de correction *KP* et *KI*, les objectifs de régulation en boucle fermée pour un système d'origine d'ordre supérieur à un.

Par conséquent, pour résoudre des problèmes plus complexes de contrôle-commande de *filtre actif parallèle*, il est souhaitable d'aborder des régulateurs plus avancés, dont le nombre de paramètres se détermine en fonction de l'ordre du système d'origine. Le choix d'une méthode de régulation basée sur un régulateur *RST* peut répondre à ces critères de régulation plus sévère.

#### **IV.8.Méthode de régulation par logique floue :**

##### **IV.8.1. Historique et principe de la logique floue :**

Aujourd'hui, la logique floue (en anglais fuzzy logic) est de grande actualité. Il s'agit d'une nouvelle méthode de traitement pour les problèmes de réglage et de prise de décision parvenant du Japon. Cependant, cette argumentation n'est pas du tout correcte [26]. Il apparaît, au début des années 1960, à LOTFIA ZADEH (automaticien contemporain de Kalman de l'université de Californie de Berkeley) que la méthode classique utilisée en contrôle des processus (modélisation mathématique du système) n'est pas toujours viable, notamment dans le cas des systèmes complexes. Il publie un article intitulé « fuzzy sets » présentant la théorie des ensembles flous, qui est l'origine de la logique floue [27]. Dès 1975, on trouve les premières applications au niveau des systèmes de réglage. En 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.

##### **IV.8.2. 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 logiques (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 référence à une certaine connaissance du comportement du système [28]. Toute une série de notions fondamentales sont



développées dans la logique floue. Ces notions permettent de justifier et de démontrer certains principes de base. Dans ce qui suit, on va étudier ces notions et leurs domaines d'applications. Par exemple, Les notions de température moyenne ou de courant faible sont relativement difficiles à spécifier de manière précise. On peut fixer des seuils et considérer que l'on attribue tel ou tel qualificatif en fonction de la valeur de la variable par rapport à ces seuils. Ceci ne peut exprimer qu'un avis très tranché du qualificatif "température moyenne" par exemple. L'aspect "vague" de ce qualificatif n'est pas représenté figure IV.8.

On peut définir le degré d'appartenance de la variable température à l'ensemble "faible" comme le "degré de vérité" de la proposition "la température est faible". En logique booléenne, le degré d'appartenance ( $\mu$ ) ne peut prendre que deux valeurs (0 ou 1). La température peut être :

- ◆ Faible :  $\mu_{\text{faible}}(T)=1, \mu_{\text{moyenne}}(T)=0, \mu_{\text{élevée}}(T)=0$
- ◆ moyenne :  $\mu_{\text{faible}}(T)=0, \mu_{\text{moyenne}}(T)=1, \mu_{\text{élevée}}(T)=0$
- ◆ élevée :  $\mu_{\text{faible}}(T)=0, \mu_{\text{moyenne}}(T)=0, \mu_{\text{élevée}}(T)=1$

Elle ne peut pas prendre deux qualificatifs à la fois.

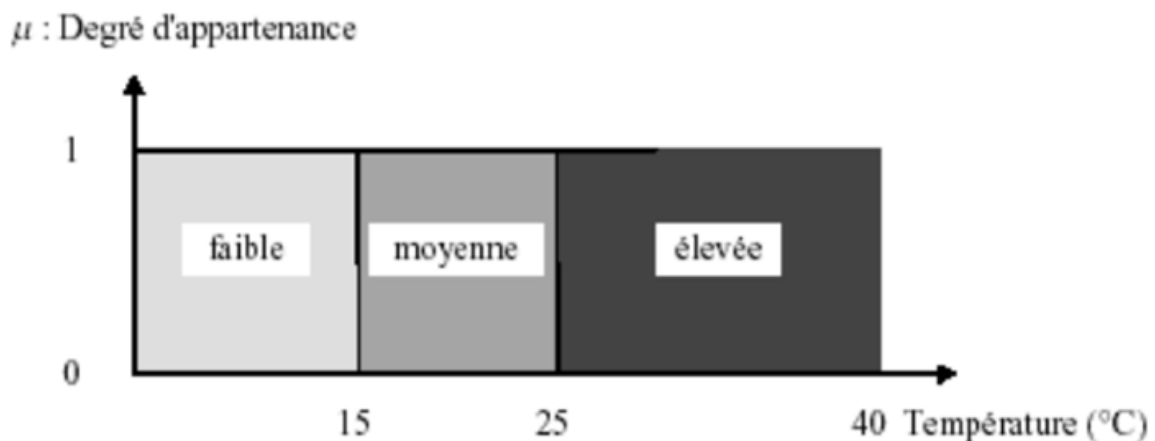


Figure IV.8: Exemple d'ensembles considérés en logique booléenne

En logique floue, le degré d'appartenance devient une fonction qui peut prendre une valeur réelle comprise entre 0 et 1 inclus.  $\mu_{\text{moyenne}}(T)$ , par exemple, permet de quantifier le fait que la température puisse être considérée comme moyenne. Dans ce cas, la température peut être considérée, à la fois, comme faible avec un degré d'appartenance de 0,2 et comme moyenne avec un degré d'appartenance de 0,8 ; figure IV.8.

$$\mu_{\text{faible}}(T) = 0.2, \mu_{\text{moyenne}}(T) = 0.8, \mu_{\text{élevée}}(T) = 0$$

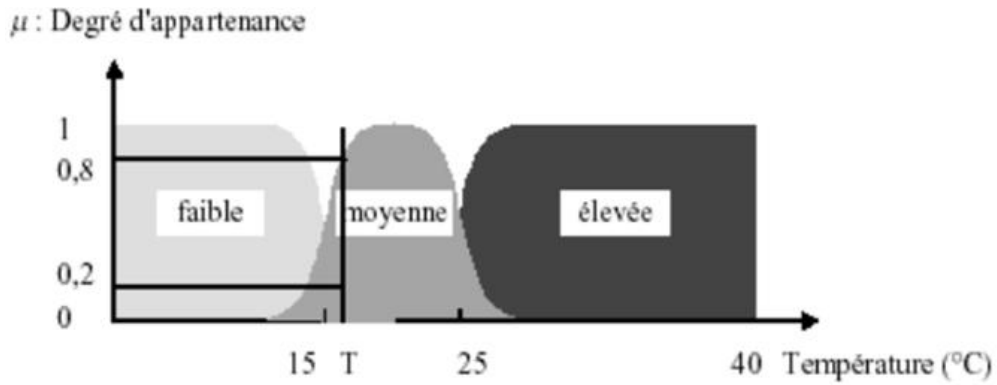


Figure IV-9 : exemple d'ensembles considérés en logique floue

Pour la variable floue  $x$ , on définit un ensemble flou  $A$  sur un univers de discours  $X$  par une fonction degré d'appartenance :

$$\mu_A : X \longrightarrow [0, 1] \tag{IV.13}$$

$$x \longrightarrow \mu_A(x)$$

L'univers de discours est l'ensemble des valeurs réelles que peut prendre la variable floue  $x$  et  $\mu_A(x)$  est le degré d'appartenance de l'élément  $x$  à l'ensemble flou  $A$ , Figure IV.3. Plus généralement, le domaine de définition de  $\mu_A(x)$  peut être réduit à un sous ensemble de  $X$  [29], On peut ainsi avoir plusieurs fonctions d'appartenance, chacune caractérisant un sous-ensemble flou. C'est par l'association de tous les sous ensembles flous de l'univers de discours, que l'on obtient l'ensemble flou de la variable floue  $x$  [30]. Par abus de langage, les sous-ensembles flous sont fort souvent confondus avec l'ensemble flou.

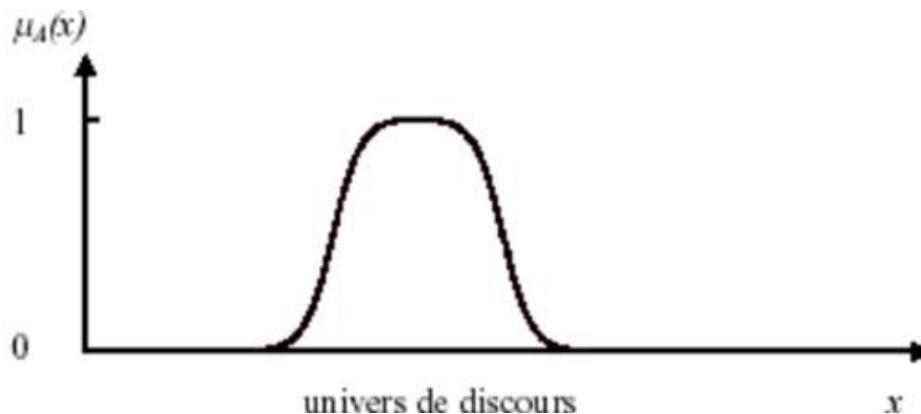


Figure IV-10 : représentations d'un ensemble flou par sa fonction d'appartenance

Dans notre exemple, la variable floue est la température, l'univers de discours est l'ensemble des réels de l'intervalle  $[0, 40]$ . On attribue à ces variables trois sous-ensembles flous : faible,

moyenne et élevée. Chacun est caractérisé par sa fonction degré d'appartenance :  $\mu$  faible (T),  $\mu$  moyenne(T),  $\mu$  élevée(T)

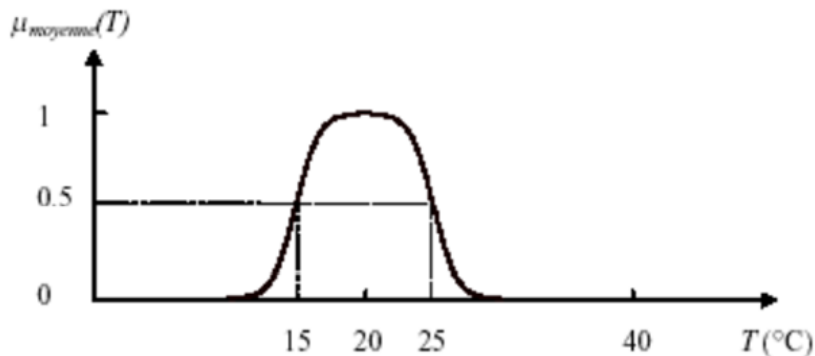


Figure IV-11: cas de l'ensemble flou « moyenne » de la variable température

On peut définir la fonction degré d'appartenance  $\mu_{moyenne}$  sur tout l'univers de discours :

$$\mu_{moyenne} = \begin{cases} \frac{1}{1 + \exp(15-x)} ; x \in [0,20] \\ 1 - \frac{1}{1 + \exp(25-x)} ; x \in [20,40] \end{cases} \quad \text{IV .14}$$

**IV.8.3. Bases de la logique floue :**

Les éléments constituant la théorie de base de la logique floue sont [24] : • Les variables linguistiques et les ensembles flous ; • Les fonctions d'appartenance ; • Les inférences à plusieurs règles floues.

**IV.8.3.1 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 discrétion d'un procédé, elle sera formulée en général avec une succession de condition suivies d'opérations tel que :

$$\left( \begin{array}{l} \textit{Si condition 1, alors opération1, ou.} \\ \textit{Si condition 2, alors opération2, ou} \\ \quad \dots \dots \\ \quad \dots \dots \\ \textit{Si condition n, alors opération n,} \end{array} \right)$$

### IV.8.3.2 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.

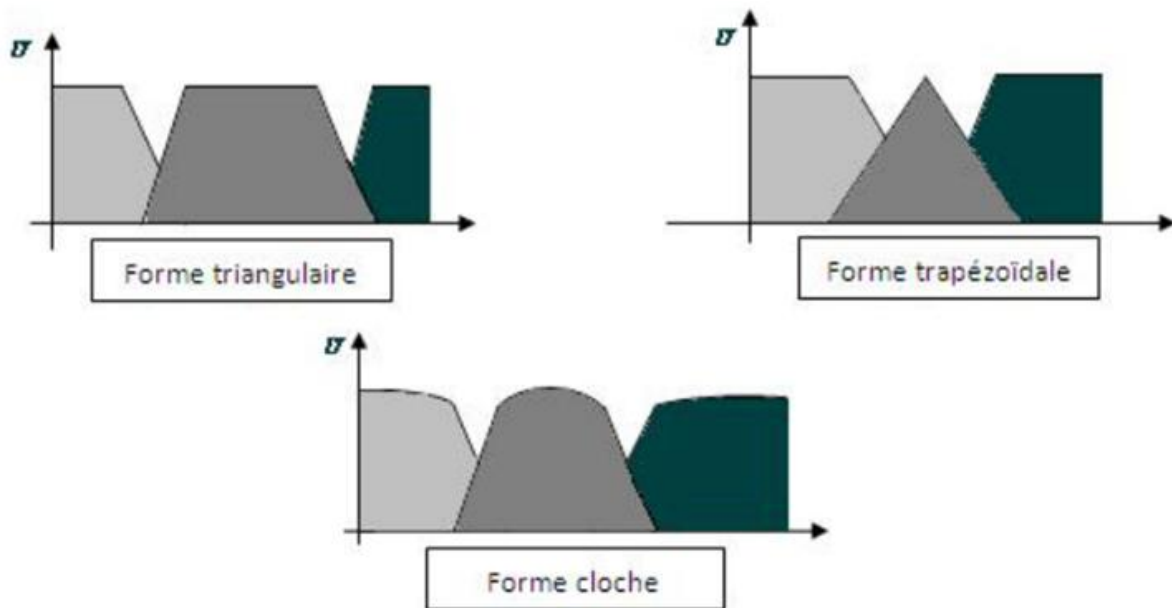


Figure IV-12 différentes forme des fonctions d'appartenance

### IV.8.3.3 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 [25]:

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

#### IV.8.3.3.1 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  $\mu_{x1}, \mu_{x2}, \dots, \mu_{xn}$ . Dont les valeurs numériques (facteurs d'appartenance) qui sont en générale différentes pour chaque élément  $I=1,2,\dots,n$ .

#### IV.8.3.3.2 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 :

$$\left( \begin{array}{l} \textit{Si condition 1 alors opération 1 ou.} \\ \textit{Si condition 2, alors opération 2 ou} \\ \dots \dots \\ \dots \dots \\ \textit{Si condition n alors opération n} \end{array} \right)$$

#### IV.8.3.3.3 Opération de la logique floue :

Au niveau des inférences, les valables linguistiques sont liées entre elles par des opérations de la logique floue tel que « ET » « OU » qui interviennent sur les fonctions d'appartenances représentant les variables linguistiques [26].  $\otimes$ Opération –Non : Le complément d'un ensemble floue A, dénoté par :

est défini comme

$$\left\{ \begin{array}{l} C = \bar{A} \quad (\textit{ou en anglais not A}) \\ \mu_c(x) = 1 - \mu_a(x) \end{array} \right.$$

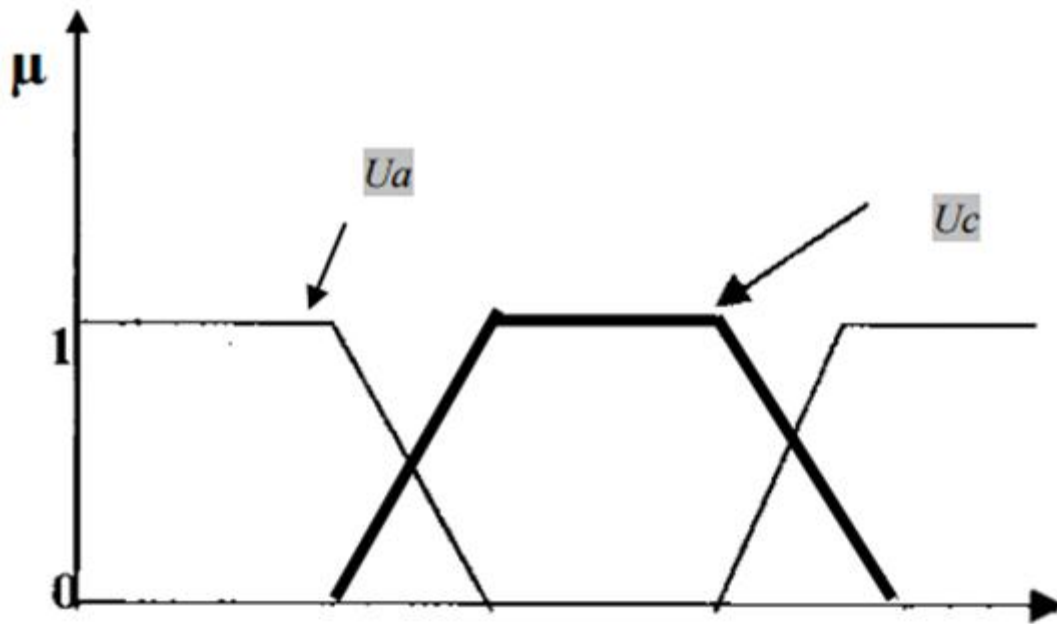


Figure IV-13 opérateur NON  $\bar{\cap}$  Opération ET :

L'opération « ET », correspond à l'intersection de deux ensembles A et B, ou écrit :  $C = A \cap B$  ou (A et B) (IV.4)

Elle est réalisée par la formulation du minimum, appliquée aux fonctions d'appartenances  $\mu_a(x)$  et  $\mu_b(x)$  des deux ensembles « A ET B » qui s'écrit par :

$$\mu_c(x) = \min [\mu_a(x), \mu_b(x)] \tag{IV.15}$$

Le résultat de l'opération peut ne pas atteindre la valeur 1 comme le montre la figure IV.6. La commutativité et l'associativité restent valables même pour des variables différentes.

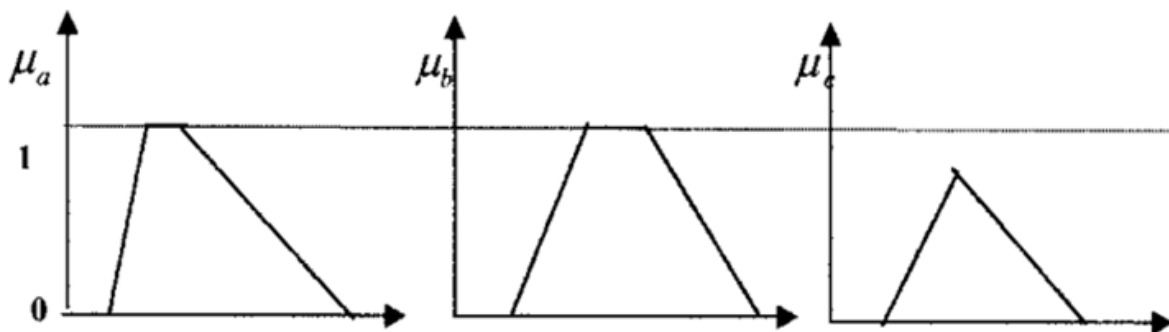


Figure IV-14 opérateur « et »

Opérateur OU : L'opération « OU » correspond à l'union de deux ensembles A et B, on écrit :  $C = (A \cup B)$ , ou (A ou B)

La réalisation de l'opérateur « OU » de la logique floue se fait par la formation du maximum, appliquée aux fonctions d'appartenance  $\mu_a(x)$  et  $\mu_b(x)$  des deux ensembles A et B qui s'écrit par :  $\mu_c(x) = \max [\mu_a(x), \mu_b(x)]$  IV.16

Il est possible que la fonction d'appartenance  $\mu_c(x)$  résultante atteigne deux fois la valeur 1. Comme le montre la figure IV.14. La commutativité et l'associativité restent valables même pour des variables différentes.

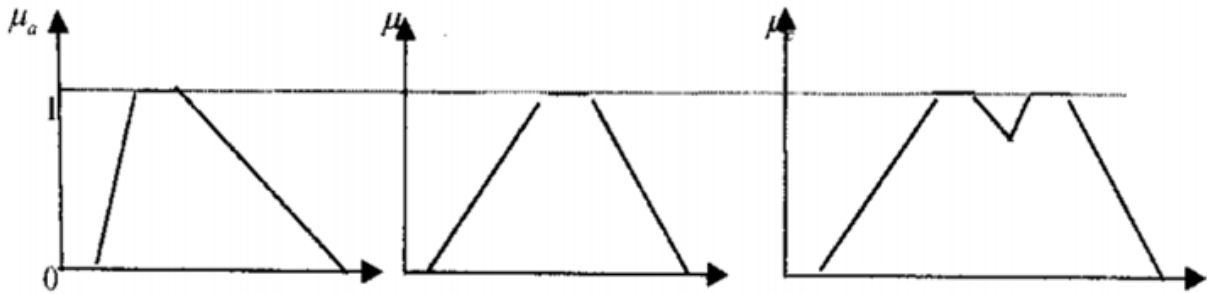


Figure IV-15 opération « ou » réalisé par le maximum

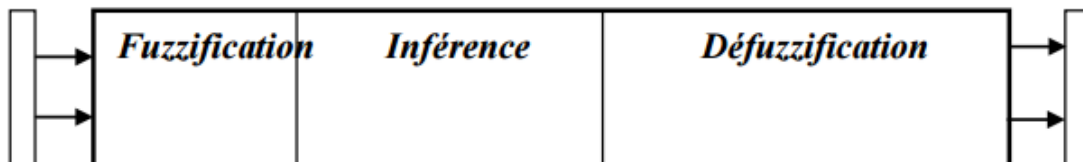
Dans la plupart d'application, ces deux cas sont combinés.

**IV.9. Etape de mise en œuvre d'un contrôleur flou :**

Il existe trois étapes essentielles dans la mise en œuvre d'un régulateur flou comme le montre le schéma ci-dessous :

**Entrées réelles**

**Sorties réelles**



### IV.9.1. 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 [34]:

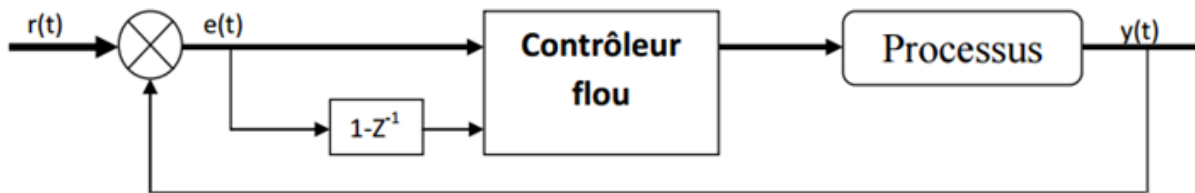


Figure IV-17 schéma de principe d'un régulateur flou

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.

### IV.9.2 Etape d'Inférence « Le moteur d'inférence » :

C'est l'étape où l'on établit les règles floues qui permettent d'aboutir à la commande en fonction des valeurs de l'erreur et de sa variation [27]. En général, la commande dépend non seulement de l'erreur mais aussi de sa variation. Il effectue simplement une identité entre les fonctions d'appartenance des entrées et les coefficients de sorties. Pour obtenir de telles identités, il faut se baser sur des règles prédéfinies. Une règle floue comporte une prémisse du genre « si l'erreur est négative ET la variation de l'erreur est négative » et une déduction floue du type « alors U est positive grande ». Dans le cas où les deux variables d'entrée sont définies, chacune, par 3 ensembles flous, on aboutit à 9 règles floues.



e/ $\Delta e$	N	Z	P
N	PG	P	Z
Z	P	Z	N
P	Z	N	NG

Tableau 2 représente cas des deux variables d'entrée sont définies, chacune, par 3 ensembles flous

Après l'édition des règles, il reste à calculer les degrés d'appartenance de la variable de sortie à tous les ensembles flous qui lui sont associés.

Aux 5 ensembles flous de la variable de sortie correspondent 5 déductions floues. 1. SI (e est N) ET ( $\Delta e$  est N) ALORS (u est PG) 2. SI (e est N) ET ( $\Delta e$  est Z), OU, (e est Z) ET ( $\Delta e$  est N) ALORS (u est P) 3. SI (e est Z) ET ( $\Delta e$  est Z) OU (e est P) ET ( $\Delta e$  est N) OU (e est N) ET ( $\Delta e$  est P) ALORS (u est Z) 4. SI (e est P) ET ( $\Delta e$  est Z) OU (e est Z) ET ( $\Delta e$  est P) ALORS (u est N) 5. SI (e est P) ET ( $\Delta e$  est P) ALORS (u est NG) Chaque règle est composée de prémisses liées par les opérations ET, OU et donne lieu à une implication par l'opération ALORS. Pour le réglage par logique floue, on utilise généralement les méthodes suivantes : • Méthode d'inférence (min et max), [méthode de Mamdani]. • 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.

#### IV.9.3 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 centre de gravité : C'est la méthode de défuzzification la plus courante. L'abscisse du centre de gravité de la fonction d'appartenance résultant de l'inférence correspond à la valeur de sortie du régulateur.

$$dU_a = \frac{\int x U_R(x) dx}{\int U_R(x) dx}$$

IV-17

Il apparaît que plus la fonction d'appartenance résultante est compliquée, plus le processus de défuzzification devient long et coûteux en temps de calcul. • Méthode par valeur maximum : Cette méthode est beaucoup plus simple. La valeur de sortie est choisie comme l'abscisse de la valeur maximale de la fonction d'appartenance.

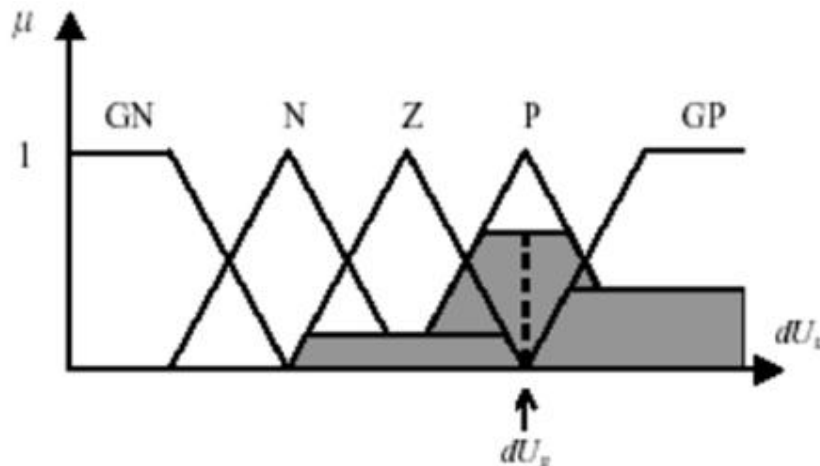


Figure IV-18 défuzzification par valeur maximum

• Méthode des hauteurs pondérées : Elle correspond à la méthode de centre de gravité quand les fonctions d'appartenance ne se recouvrent pas

$$dU_a = \frac{\sum x U_{Ri}(x)}{\sum U_{Ri}(x)}$$

IV-18

Cette méthode est surtout utilisée quand les fonctions d'appartenance de la variable de sortie sont des singletons

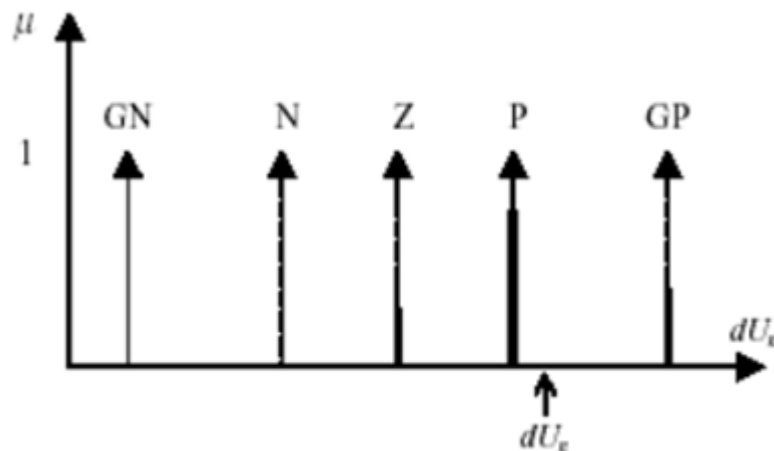


Figure IV-19 défuzzification par méthode des hauteurs pondérées

Dans ce cas, le calcul du centre de gravité se trouve grandement simplifié. Le régulateur n'est plus de type MAMDANI mais de type SUGUENO de part la façon dont la sortie est calculée.

Le régulateur flou à deux entrées est représenté par sa surface caractéristique figure IV.11. Cette dernière exprime les variations de la valeur réelle de la sortie du régulateur en fonction des entrées quand ces dernières parcourent l'univers de discours [28].

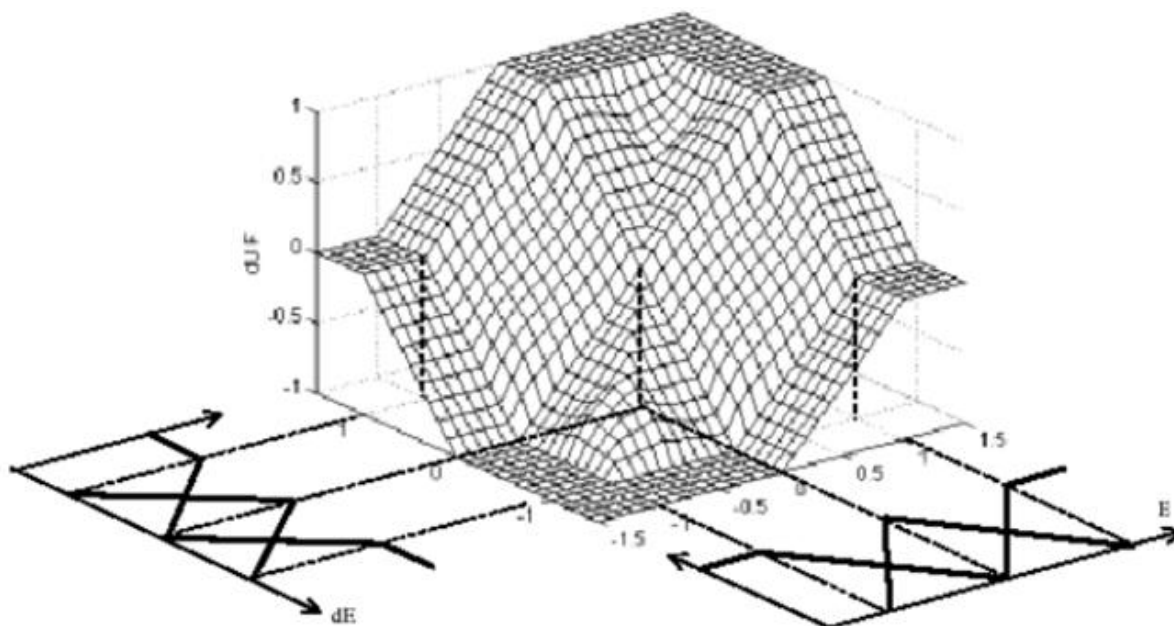


Figure IV-20 surface caractéristique d'un régulateur flou

#### IV.10. Paramètres de la simulation :

##### IV.10.1 boucle de régulateur tension :

La stratégie du contrôle par logique floue est représentée précédemment. Elle consiste à comparer la tension  $V_{dc}$  mesurée avec la tension de référence  $V_{dc\_réf}$ . Cette erreur « e » est considérée comme étant une première variable d'entrée, tandis que sa dérivé «  $\Delta e$  » est considérée comme une deuxième variable d'entrée. Sept niveaux flous sont définis pour e et  $\Delta e$ , qui sont répartis comme suit : négative grand (NG), négatif moyen (NM), négatif petit (NP), zéro (ZE), positif petit (PP), positif moyen (PM), et positif grand (PG). Chaque variable de l'entrée est assignée à une valeur d'appartenance à chaque ensemble flou, basée sur le degré d'appartenance correspondante. Les fonctions d'appartenance sont représentées par les figures : IV.12 et IV.13

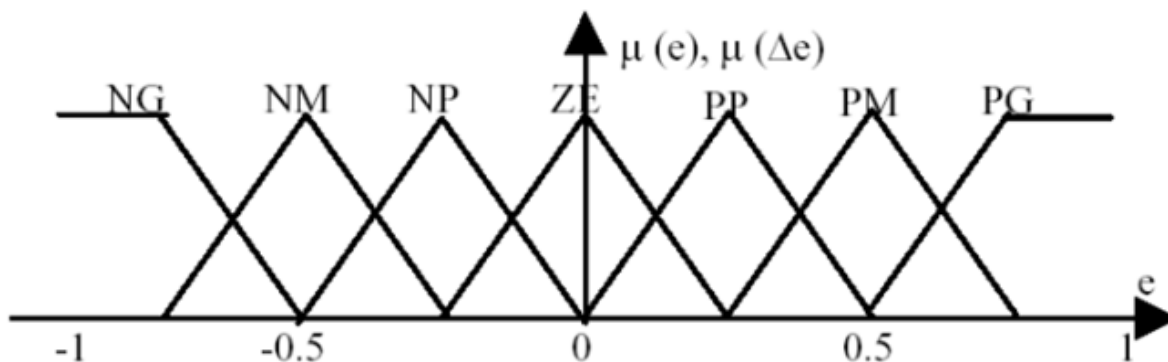


Figure IV-21 fonction de répartition pour (e) et « Δe »

Notons ici que la sortie du régulateur flou est une fonction de répartition triangulaire qui a cinq ensembles flous : zéro (ZE), positif petit (PP), positif le moyen (PM), positif grand (PG), et positif grand (PTG).

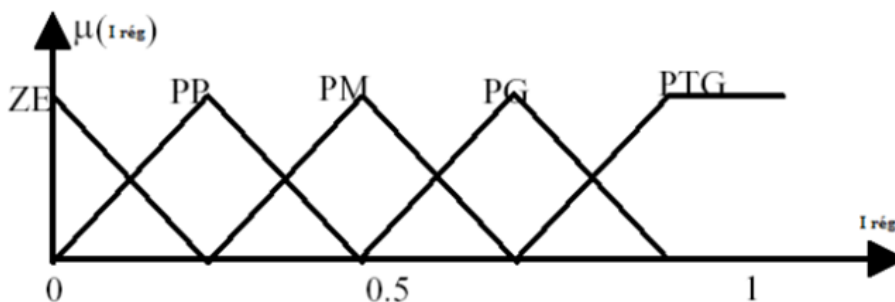


Figure IV-22 fonction de répartition pour la sortie

La stratégie de commande utilise une matrice d'inférence (tableau 2).

e	NG	NM	NP	EZ	PP	PM	PG
Ae							
NG						PG	PG
NP				PP		PG	PG
NP	PP	PM	PP	EZ	EZ	PG	PTG
EZ	PG	PM	EZ	EZ	PM	PM	PTG
PP	PTG	PM	PP	EZ	PM	PP	PM
PM	PTG	PG		PP			
PG	PTG	PG					

Tableau IV.3. Base de règles gérant la sortie en fonction de e et Δe

**IV.5.2 Boucle de régulation courant A :**

l'entrée du régulateur courant, on introduit deux grandeurs: l'erreur du courant  $e_a$  de la phase a (respecté b et c) et la variation de l'erreur courant  $\Delta e_a$  (respecté  $\Delta e_b$  et  $\Delta e_c$ ). Pour ce régulateur nous avons considéré trois ensembles représentés par des fonctions d'appartenances sous formes triangulaires, qui sont répartis comme suit : négative grand (NG), zéro (ZE) et positif grand (PG). Les figures IV.14 et IV.15 montrent la fuzzification des grandeurs d'entrées et de sortie.

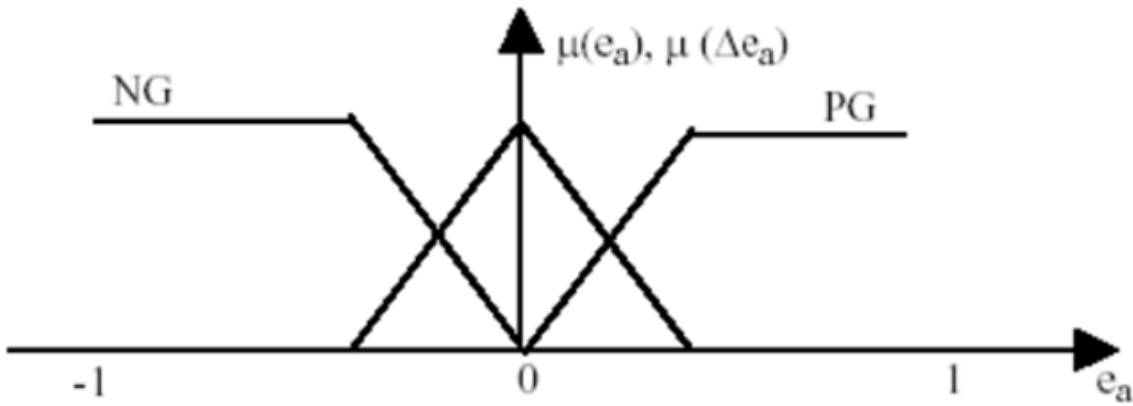


Figure IV-23 fonction d'appartenance de «  $e_a$  » et «  $\Delta e_a$  »

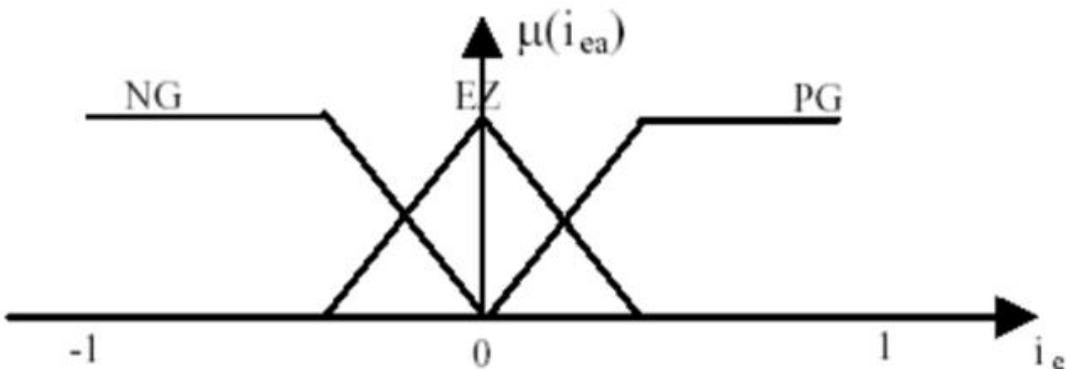


Figure IV-24 fonction d'appartenance pour la sortie  $I_e$

La stratégie de commande utilise une matrice d'inférence (tableau 3). Tableau IV.3. Base de règles géant la sortie en fonction de «  $e_a$  » et «  $\Delta e_a$  »

	EI			
$\Delta e_l$		NG	EZ	PG
NG		EZ	PG	PG
EZ		NG	EZ	PG
PG		NG	NG	EZ

Tableau IV-4 base de règles géant la sortie en fonction de «  $e_a$  » et «  $\Delta e_a$  »

**Conclusion :**

Dans ce chapitre , une introduction de quelques concepts sur les deux différentes techniques pour la régulation . la prochaine chapitre présente des études sur les résultat entre les deux techniques .

# **CHAPITRE 05**

## **RÉSULTAT**

### **DE SIMULATION**

## V. Résultats de simulation et discussions

La Figure V .1 présente l'ensemble de la structure du *filtre actif parallèle* et de son environnement fonctionnel, lequel se compose :

- d'un réseau électrique triphasé à trois fils.
- d'un pont redresseur à diodes triphasé alimentant une charge ( $R_{ch}$ - $L_{ch}$ ) pour la représentation d'une charge non linéaire génératrice des courants harmoniques.
- du *filtre actif parallèle*, lequel est composé d'un onduleur de tension de trois bras à interrupteurs réversibles en courant et bi-commandables (IGBTs avec des diodes antiparallèles). L'élément de stockage de l'énergie continue est une capacité  $C_{dc}$  qui joue le rôle d'une source de tension continue  $V_c$ . Le filtre de sortie est un filtre passif du premier ordre représenté par ( $L_{fp}$ ).

La modélisation globale de la structure, présentée sur la Figure V.1, a permis d'étudier la validité du *filtre actif parallèle pour la compensation des harmoniques et de la puissance réactive* à travers plusieurs simulations. Les valeurs des éléments caractérisant cette structure ont été regroupées dans le Tableau V.1. Les simulations ont été réalisées à partir du MATLAB simulink et nous ont permis d'analyser les performances du filtre aussi bien dans le domaine temporel que spectral.

<b><u>Réseau électrique</u></b>	
<u><math>S_{cc} / S_{ch} = 3000</math></u>	
<b><u>Charges perturbatrices</u></b>	
<u>Charge non linéaire</u>	<u>80 kVA</u>
<u><math>L_d</math></u>	<u>0,1 mH</u>
<b><u>Filtre actif parallèle</u></b>	
<u><math>V_c</math></u>	<u>850V</u>
<u><math>C_{dc}</math></u>	<u>4.4mF</u>
<u><math>L_{fp}</math></u>	<u>1mH</u>
<u>Technique de commande de l'onduleur</u>	<u>commande par hystérésis</u> <u>(H=1A)</u>
<u>méthode d'identification des courants perturbés</u>	<u>Méthode p-q</u>

Tableau V.1 : Valeurs des éléments construisant la structure du FAP étudiée



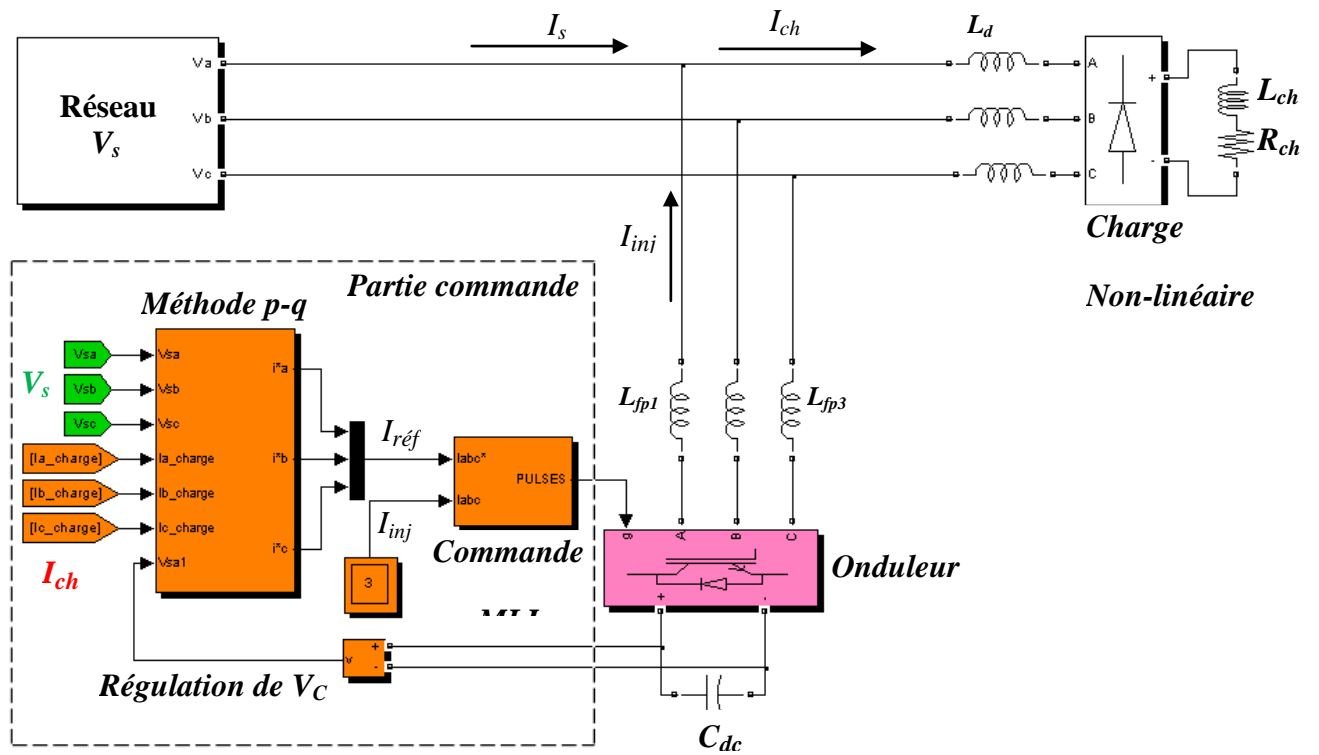


Fig. V.1 : Structure générale du filtre actif parallèle étudié

### X.1 Compensation des courants harmoniques

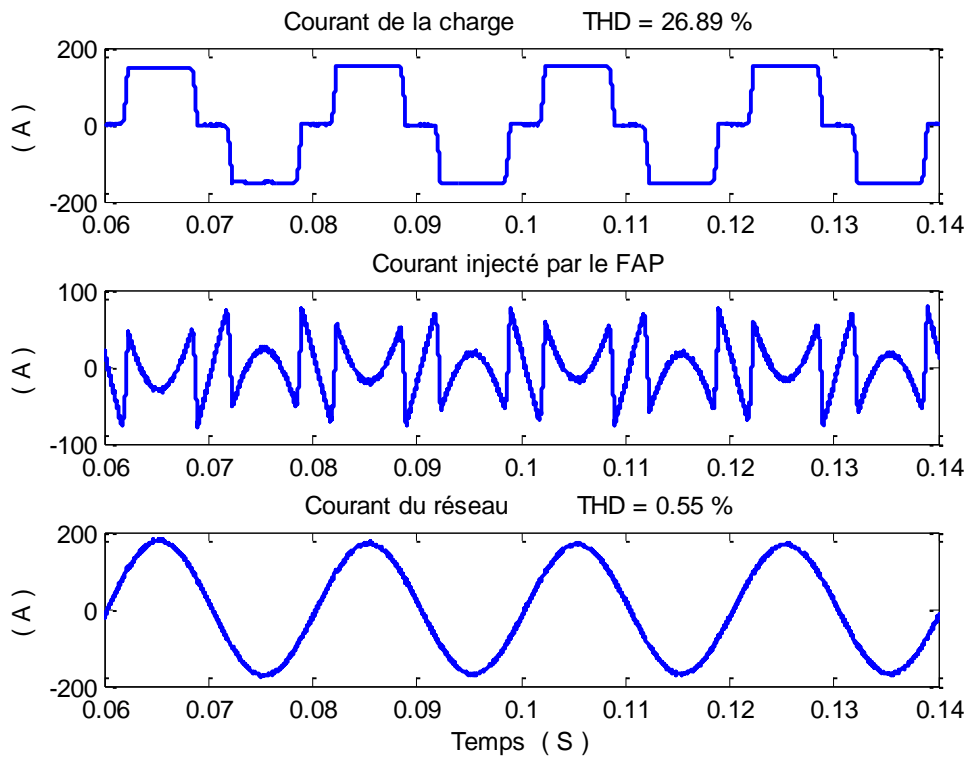


Fig. V.2 : Compensation des courants harmoniques

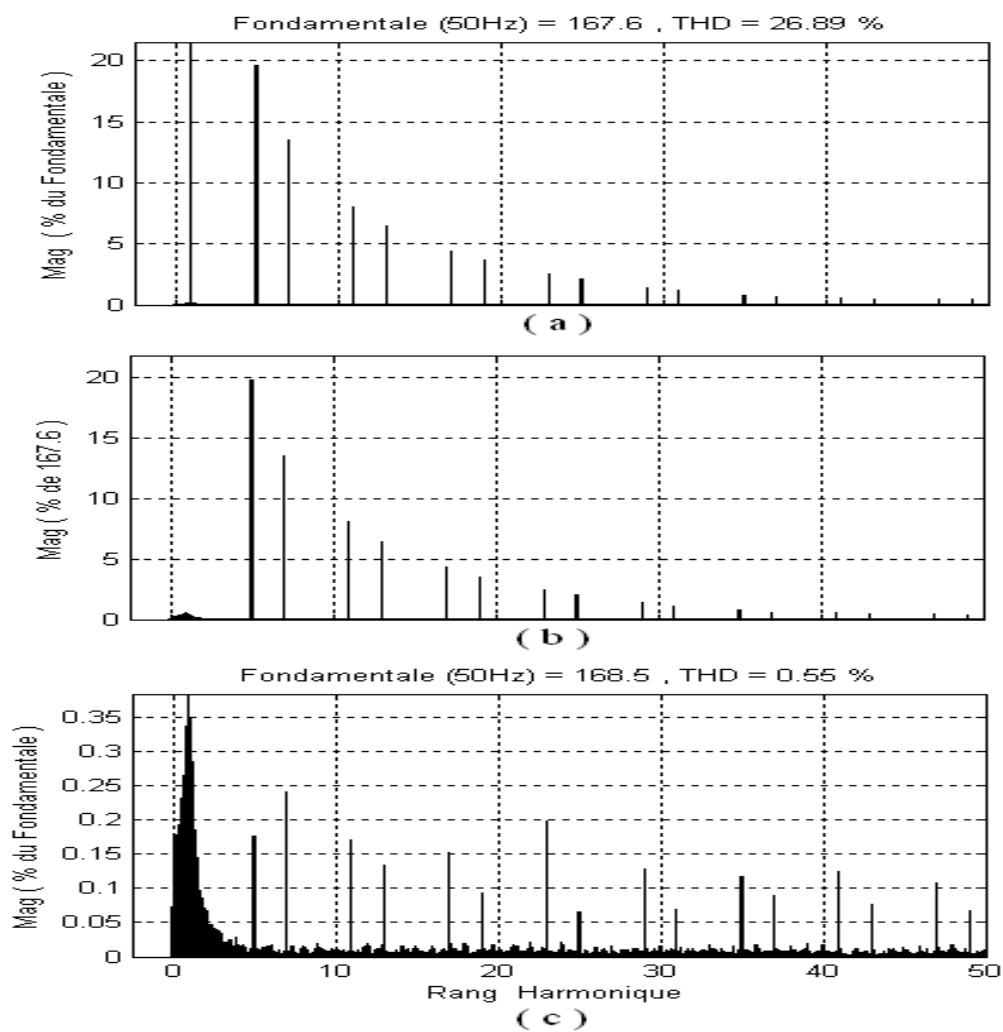


Fig. V.3 : Décomposition spectrale, (a) Courant de la charge, (b) Courant injecté par le FAP (c) courant du réseau

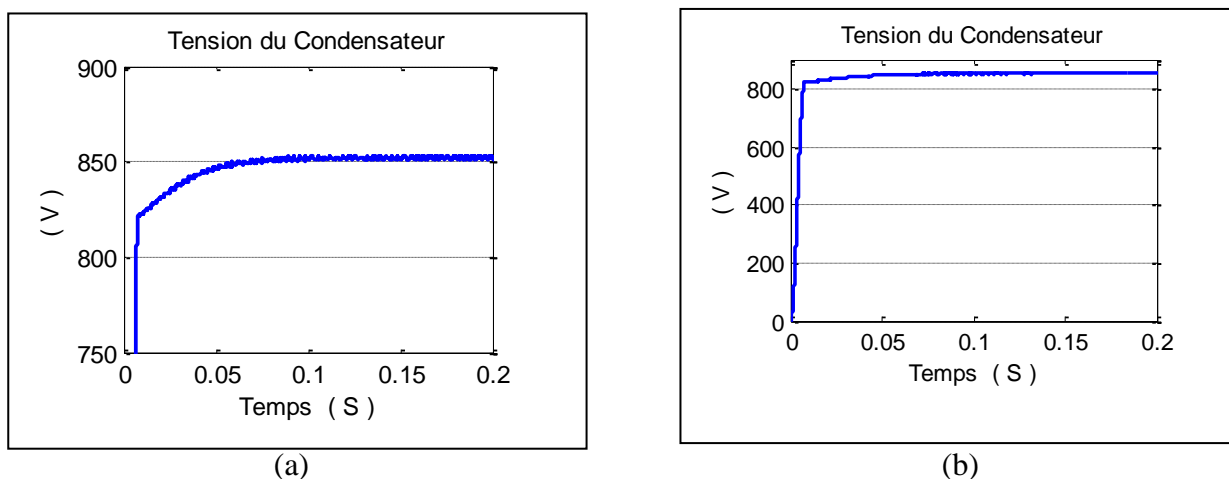


Fig. V.4 : Régulation de la tension du condensateur du FAP

( a ) Tension aux bornes du condensateur

## Discussions :

La Fig. V.2 présente l'analyse temporelle de la phase (a) du courant de la charge ( $i_{ch}$ ), des courants injectés par le FAP ( $i_{inj}$ ) et du courant du réseau après filtrage ( $i_s$ ). On peut voir clairement que La forme du courant du réseau après filtrage est quasi sinusoïdale et l'analyse spectrale de ce dernier qui est donnée par la Fig. V.3.c donne un THD de 0.55 % ce qui est selon la norme IEEE 519-1992 est très satisfaisant donc on peut conclure que le FAP est très efficace pour le filtrage des harmoniques.

La Fig. V.4 montre la régulation de la tension du condensateur du FAP. On remarque que la boucle de régulation de la tension continue est caractérisée par une réponse rapide, pas de dépassement ni d'oscillations et une erreur statique presque nulle, donc on peut dire que nous avons une bonne régulation.

### V.2. La régulation de la tension contenu :

Table V.2. Qualité d'énergie avant et après compensation

<u>Qualité d'énergie</u>	<u>Sans compensation</u>	<u>FAP avec régulateur PI</u>	<u>FAP avec contrôleur flou</u>
(%) THD <sub>i</sub>	<u>20,90%</u>	<u>3,68%</u>	<u>2,31%</u>
<u>Robustesse</u>		<u>4,55</u>	<u>5,89</u>

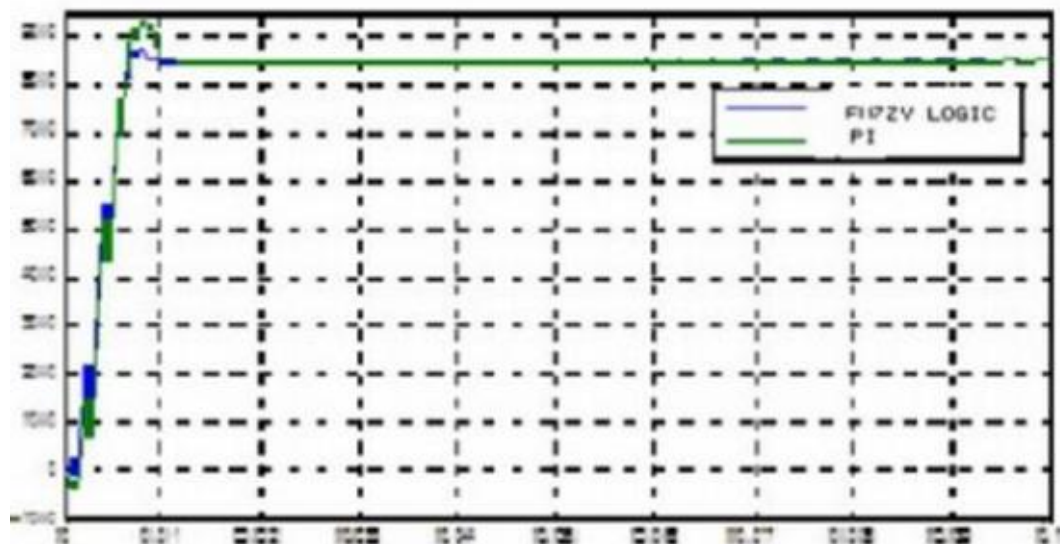


Fig V.5 régulation de la tension contenu  $V_{dc}$  avec contrôleur classique et contrôleur flou

<u>parametres</u>	<u>Régulateur PI</u>	<u>Contrôleur flou</u>
<u>Gain <math>K_p</math></u>	<u>0,1</u>	
<u>Gain <math>K_i</math></u>	<u><math>1/6e^7</math></u>	
<u>Dépassement</u>	<u>%11,0247</u>	<u>%3,7920</u>
<u>Temps de monté</u>	<u>S 0,0068</u>	<u>S 0,006789</u>
<u>Erreur quadratique</u>	<u><math>4,4629e^{+000}</math></u>	<u><math>4,0341e^{+000}</math></u>

Table V.3.Comparaison paramètres PI et Flou

Le régulateur flou est utilisé pour contrôler et réguler la tension de bus continu du filtre actif parallèle, les résultats de simulation montrent l'efficacité du régulateur flou en termes de la diminution remarquable des harmoniques dans le réseau électrique, d'après ces résultats on peut dire que le contrôleur FLC est meilleur, performant et robuste que le régulateur PI.

### **Conclusion :**

les résultats de simulation montrent l'efficacité du régulateur flou en termes de la diminution remarquable des harmoniques dans le réseau électrique, d'après ces résultats on peut dire que le contrôleur FLC est meilleur, performant et robuste que le régulateur PI.

CONCLUSION

GÉNÉRALE

## **Conclusion générale**

Ce travail a été consacré à l'étude et la simulation d'un filtre actif parallèle pour la compensation et de rééquilibrage dynamique de la tension d'un réseau triphasé.

Dans ce contexte, nous nous sommes penchés sur l'étude du cas le plus fréquent où le déséquilibre est produit par le raccordement de charges déséquilibrées linéaires ou non linéaires.

Nous avons en premier lieu, cité les caractéristiques et les origines de la pollution électrique ainsi que les solutions de dépollution traditionnelles et modernes. Ensuite, nous avons axé notre étude sur le compensateur actif de rééquilibrage des courants de ligne. Les méthodes d'identification en temps réel des courants perturbateurs de référence et du dimensionnement des éléments du convertisseur ont été employées avec succès. Un filtre de sortie a également été proposée afin d'empêcher les composantes, dues aux découpages de l'onduleur, de se propager au réseau bien que son emploi rende plus complexe la partie contrôle commande de l'onduleur.

Au niveau du pilotage de l'onduleur, partie essentielle dans le compensateur actif, nous avons eu recours à des correcteurs PI pour satisfaire la nécessité d'équilibrer des tensions aux bornes de chaque condensateur du bus continu. La réalisation d'une régulation des courants injectés dans la ligne du réseau par l'utilisation de la commande MLI donné des résultats fructueux et satisfaisants en matière de réduction du déséquilibre qui se manifeste essentiellement dans le conducteur du neutre.

L'introduction de la théorie des ensembles flous dans la régulation des processus industriels s'avère très bénéfique et meilleure. Du fait que la conception du régulateur flou repose entièrement sur l'expérience acquise par des manipulateurs expérimentés qui sera par la suite traduite en des règles linguistiques a considérablement poussé nos résultats vers l'atteinte des objectifs voulus. Comparativement avec la commande MLI, la commande par logique floue fait preuve de plus de performances et de progrès en matière de poursuite des courants à injecter dans le réseau aux courants de références désirés voire même superposés dans notre simulation.

Donc, avoir un réseau sain et fidèle demande au distributeur d'énergie un investissement important pour satisfaire les clients de la qualité de service. Le coût d'un tel dispositif de compensation active dépend évidemment, de l'acuité du déséquilibre en courant et du niveau de tension au point de raccordement de la charge.

## SYMBOLES

$U_{i}$	Composante inverse de tension
$U_{o}$	Composante homopolaire de tension
$U_{d}$	Composante directe de Tension
$U_{i}$	Rapport de la composante inverse sur la composante directe
$U_{0}$	Rapport de la composante homopolaire sur la composante directe
$v_{s}$	Tension de source
$i_{s}$	Courant de source
$R_{s}$	Résistance de court circuit de réseau
$L_{s}$	Inductance de court circuit de réseau
$R_{c}$	Résistance de ligne
$L_{c}$	Inductance de ligne
$R_{d}$	Résistance de la charge
$L_{d}$	Inductance de la charge
$R_{f}$	Résistance de filtre de sortie
$L_{f}$	Inductance de filtre de sortie
$C_{dc}$	Condensateur de stockage
$v_{dc}$	Tension continue de l'onduleur
$v_{f}$	Tension de filtre
$i_{f}$	Courant de filtre
$i_{l}$	Courant de charge
$i_{h}$	Courant harmonique
$i_{ref}$	Courant de référence
$v_{dc\ ref}$	Tension de référence
$X_{\alpha} ; X_{\beta}$	Valeur dans le repère $(\alpha\beta)$
$P$	Puissance instantané active

Q	Puissance instantané réactive
$\bar{p}, \bar{q}$	Puissance continue liée à la composante fondamentale active et réactive du courant
$\tilde{p}, \tilde{q}$	Puissance alternative liées à la somme des composantes harmonique du courant
$v_u$	Vecteur unité
$i_p$	Projection de courant sur l'axe p
$i_q$	Projection de courant sur l'axe q
$i_r$	Projection de courant sur l'axe r
$v_p$	Projection de tension sur l'axe p
$v_q$	Projection de tension sur l'axe q
$v_r$	Projection de tension sur l'axe r
$I_{loss}$	Le courant de référence additionnel
$K_p, k_i$	Les termes du correcteur PI
$\varepsilon$	Coefficient d'amortissement
$\omega_c$	Fréquence de la coupure
$f_c$	Fréquence de la commutation



# **BIBLIOGRAPHIE**

- [1]. I. Etxeberria-Otadui « Sur les systèmes de l'électronique de puissance dédiés à la distribution électrique-application à la qualité de l'énergie », Thèse Doctorat. Institut national polytechnique de Grenoble 2003.
- [2]. B. CHARIER « La qualité de l'énergie électrique: critères et définitions », Revue technologie 2009.
- [3]. N. Gheorghe « Perturbations dans les réseaux électriques », Revue Polyewpert Technique N°53 2008.
- [4]V. Ignatova « Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique Application aux creux de tension et à la pollution harmonique », Thèse Doctorat. Université de Grenoble 2006.
- [5]. V. Ignatova « Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique Application aux creux de tension et à la pollution harmonique », Thèse Doctorat. Université de Grenoble 2006.
- [6]. B. Gattal « Méthodes d'analyse des perturbations électriques dans la qualité de l'énergie électrique en utilisant des nouvelles techniques pour l'application aux creux de tension », Mémoire de Magister. Université de Batna 2012.
- [6]. A. Arora « Solutions innovatrices pour l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique », Revue Qualite De L'energie Electrique ABB 3/1998.
- [7]. C. Fetha « Analyse et amélioration de l'indice de la non-symétrie de tension dans la qualité de l'énergie électrique », Thèse Doctorat. Université de Batna 2006.
- [8]. A. Sannino « Power -electronic solutions to power quality problem », Electric Power Systems Research 66, Elsevier Science B.V 2003.
- [9]. K.J.P. MACKEN« Mitigation of voltage dips through distributed generation systems », IEEE Transactions on Industry Applications, pp.1686-1693, Vol.40, No.6, November/December 2004.
- [10]. A.V. Jouanne « Assessment of voltage unbalance », IEEE Transactions on power delivery, pp.782-790, Vol.16, No.4, October 2001.
- [11]. T. GOURAUD « Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution électrique», Thèse Doctorat. Université de Nantes 1997.
- [12]. A.L.D. Bermeo « Commandes avancées des systèmes dédiés a l'amélioration de la qualité de l'énergie : de la basse tension a la montée en tension », Thèse Doctorat. Institut National Polytechnique de Grenoble 2006.
- [13] S. Kerrouche, "Développement et implémentation d'un système de filtrage actif de puissance à base d'onduleur triphasé", Mémoire de magister, Université Ferhat Abbas Sétif (UFAS), Algérie, 2009.

- [14] M. Shafiee Khor, "Amélioration de la qualité de l'énergie à l'aide de compensateurs actifs : série, parallèle ou conditionneurs unifiés de réseaux électriques", Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, Nantes, 2006.
- [15]. D. Ould Abdeslam « Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques: application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension », Thèse Doctorat. Université de Haute-Alsace 2005.
- [16]. F. Defaÿ « Commande prédictive directe d'un convertisseur multicellulaire triphasé pour une application de filtrage actif », Thèse Doctorat. Université De Toulouse 2008.
- [17]. M.D. Epanya « Application du filtrage actif pour une mise en oeuvre de méthode de prédiction et de contrôle d'harmoniques dans un réseau de distribution électrique», Mémoire comme exigence partielle de la maîtrise en génie électrique. Université du Québec 2010.
- [18]. S. Bernard et G. Trochain « Compensation des courants harmoniques générés par les ordinateurs grâce à un compensateur actif d'harmoniques révolutionnaire », Publication: MGE UPS SYSTEMS-01/2000.
- [19]. H. Kouara « Application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un réseau basse tension », Mémoire de Magister. Université de Batna 2006.
- [20]. M.A.E. Alali « Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension », Thèse Doctorat. Université Strasbourg I 2002.
- [21]. C. Tan Perng « A single-phase hybrid active power filters with photovoltaic application », Thèse de Master en Genie Electrique, Université de Technologie Malaysia 2006.
- [22]. M.M. Swamy « Passive techniques for reducing input current harmonics », WP.AFD.01 Copyright by Yaskawa Electric America, Inc. 2005.
- [23]. A. Hamadi « Contribution à l'étude des filtres hybrides de puissance utilisés pour améliorer la qualité de l'énergie dans le réseau électrique de distribution», Thèse Doctorat. Université du Québec 2010.
- [24]. F. Hamoudi « Contribution aux stratégies de commande avancées d'un filtre actif shunt à quatre fils », Thèse Doctorat. Université de Batna 2012.
- [25]. M. Magraoul « Validation de techniques de commande d'un filtre actif parallèle», Mémoire comme exigence partielle à l'obtention de la maîtrise en génie électrique. Université du Québec 2007.
- [26]. S.A. Tadjer « Etude d'un système de compensation d'harmonique en utilisant un générateur photovoltaïque 'GPV' », Mémoire de Magister. Université de Boumerdes 2008.

[27]. S. Rechka « Etude de méthodes de filtrage des harmoniques dans les réseaux électriques de distribution », Mémoire comme exigence partielle pour l'obtention d'un diplôme de maître en sciences appliquées en génie électrique. Université du Québec à Trois-Rivières 2002.

[28]. S.P. Litrán « Control strategy for hybrid power filter to compensate unbalanced and non-linear, three phase loads », EPE 2009.

## Résumé

En se propageant à travers les réseaux électriques, les tensions et les courants sont idéalement des ondes sinusoïdales à la fréquence fondamentale du réseau. Cependant, selon les travaux de recherches publiées dans la littérature, nous constatons que la qualité de l'onde électrique est loin d'être parfaite, à cause de l'utilisation des charges non linéaires, ces charges génèrent des harmoniques de courant et consomment de la puissance réactive.

Pour cela l'objet du travail présenté dans ce mémoire est l'étude théorique et la simulation numérique du fonctionnement d'un filtre actif parallèle permettant de compenser les harmoniques, qui découle directement de la prolifération des charges non linéaires.

Après un rappel des origines et des effets de la pollution harmonique sur les réseaux électriques, les dispositifs actifs permettant d'y remédier ainsi que la modélisation et la mise en équation de l'ensemble réseau-charge polluante-filtre actif sont présentés.

La commande du filtre actif a été ensuite étudiée pour différentes techniques d'identification des harmoniques .

Des tests de simulation ont été présentés pour valider la fonctionnalité de cette des stratégies de commande stratégie proposées.

---

## ملخص-

بانتشارها من خلال الشبكات الكهربائية فان التيارات الكهربائية و التوترات تكون على شكل موجات جيبييه ترددها هو التردد الأساسي للشبكة، لكن من خلال الأبحاث المنشورة والمنجزة، فإننا نتأكد بان جودة الموجة الكهربائية ليست مثالية : و هذا راجع الى استعمال الحمولات الغير خطية التي تقوم بتوليد تيارات توافقية واستهلاك الطاقة الغير فعالة :من اجل هذا فان هدف هذا العمل المنجز في هذه المذكرة هو الدراسة النظرية و المحاكاة الرقمية لعمل المصفاه الفعال المربوط على التوازي الذي يعمل على تعويض التيارات التوافقية المولدة من الحمولات الغير خطية :يعد التذكير حول أسباب و اثار التلوث التوافقي على الشبكات الكهربائية و كيفية مواجهتها بالإضافة إلى عرض التصميم ووضع المعادلات بالنسبة للشبكة و الحمولة و المصفاه الفعال ,قمنا بدراسة طريقة التحكم في المصفاه الفعالة الموازية عدة تجارب تم عرضها من اجل التحقق من نتائج استعمال التقنيات الخاصة بالتحكم التي تم عرضها