

# *Remerciements*

*Nous tenons bien à remercier toute personne qui a contribué de près ou de loin pour achever ce mémoire avec l'aide de Dieu.*

*Nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadrant Mr. BELAROUCI Salim, maître de conférences B à l'école supérieure en sciences appliquées de Tlemcen pour bien vouloir nous encadrer, pour ses encouragements et ses conseils judicieux.*

*Nous adressons également nos sincères remerciements à notre Co-encadrant Mr. TAHOUR Ahmed, professeur à l'école supérieure en sciences appliquées de Tlemcen, qui a répondu à toutes nos questions et qui nous a beaucoup aidé pour mener à bien ce travail.*

*Nous remercions très chaleureusement les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'être rapporteur de notre mémoire.*

*Merci à tous nos enseignants qui ont veillé pour nous transmettre le jus de leurs années, et leur contribution majeure dans notre formation.*

# Tables des matières

Introduction générale.....	2
<b>Premier Chapitre : Perturbations et Solutions de filtrage des harmoniques.....</b>	<b>4</b>
Introduction .....	5
1.1 Les perturbations électriques .....	5
1.2 La pollution harmonique .....	6
1.2.1 Analyse de Fourier .....	6
1.2.2 Éléments d'identification des harmoniques .....	8
1.2.3 Analyse spectrale.....	8
1.2.4 Les équipements pollueurs .....	8
1.2.5 Effets néfastes de la pollution harmonique .....	9
1.3 Les normes internationales .....	9
1.4 Solutions de dépollution harmonique .....	10
1.4.1 Filtres actifs .....	10
1.4.2 Filtre actif parallèle (FAP) .....	10
1.4.3 Filtre actif série (FAS).....	11
1.4.4 Combinaison série parallèle des filtres actifs .....	11
1.4.5 Filtre hybride .....	12
1.5 Filtre actif parallèle.....	13
1.5.1 L'onduleur de tension.....	14
1.5.2 Le filtre inductif .....	15
1.5.3 Circuit de stockage d'énergie .....	15
1.5.4 Commande de l'onduleur .....	15
1.5.5 La méthode d'identification des courants perturbés.....	16
1.5.6 Régulation du courant .....	18
1.5.7 Régulation de la tension continue $V_{dc}$ .....	18
1.6 Dimensions du filtre actif parallèle .....	19
1.7 Conclusion .....	20
<b>Deuxième Chapitre : La Logique Floue.....</b>	<b>21</b>
2.1 Introduction .....	22
2.2 Bref historique sur la logique floue .....	22

2.3	Introduction à la logique floue.....	22
2.4	Principe de la logique floue .....	25
2.5	Les bases de la logique floue .....	26
2.5.1	Univers de discours .....	26
2.5.2	Variables et valeurs linguistiques.....	26
2.5.3	Fonction d'appartenance .....	27
2.5.4	Les opérateurs de la logique floue.....	28
2.5.5	Propriétés des ensembles flous.....	30
2.6	Les étapes d'un processus flou .....	31
2.6.1	La Fuzzification.....	31
2.6.2	L'inférence floue .....	31
2.6.3	La Défuzzification.....	32
2.7	Applications de la logique floue .....	33
2.8	Conclusion .....	34
	<b>Troisième Chapitre : Commande d'un FAP par logique floue .....</b>	<b>35</b>
3.1	Introduction .....	36
3.2	Utilisation de la logique floue dans un Filtre actif parallèle.....	36
3.3	Principe d'un régulateur PI.....	36
3.4	Régulateur flou de la tension continue Vdc .....	37
3.4.1	Synthèse du régulateur flou .....	38
3.5	Résultats de Simulations.....	41
3.5.1	Redresseur à diode .....	42
3.5.2	Variation brusque de la charge.....	45
3.5.3	Charge déséquilibrée .....	46
3.5.4	Charge à thyristor .....	47
3.5.5	Variation de Vdc – réf : .....	48
3.6	Comparaison des résultats .....	48
3.7	Conclusion .....	50
	Conclusion générale.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
	Références bibliographique.....	53

## Liste des figures

<b>Figure 1. 1 :</b> Décomposition harmonique d'un signal déformé.....	7
<b>Figure 1. 2 :</b> Signal déformé avec sa représentation spectrale (à droite). .....	8
<b>Figure 1. 3 :</b> Filtre actif parallèle.....	10
<b>Figure 1. 4 :</b> Filtre actif série. ....	11
<b>Figure 1. 5 :</b> Combinaison série parallèle des filtres actifs. ....	11
<b>Figure 1. 6 :</b> Filtre actif série avec filtres passifs parallèles. ....	12
<b>Figure 1. 7 :</b> Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.....	12
<b>Figure 1. 8 :</b> Filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles. ....	13
<b>Figure 1. 9 :</b> Principe de compensation des courant harmoniques par un FAP. ....	13
<b>Figure 1. 10 :</b> Structure générale du filtre actif parallèle. ....	14
<b>Figure 1. 11 :</b> Onduleur de tension triphasé schématisé avec de simples interrupteurs.....	14
<b>Figure 1. 12 :</b> Onduleur de tension connecté à une inductance $L_f$ .....	15
<b>Figure 1. 13 :</b> Circuit de stockage de la tension continue connecté à l'onduleur.....	15
<b>Figure 1. 14 :</b> Commande des interrupteurs par hystérésis. ....	16
<b>Figure 1. 15 :</b> Algorithme de calcul des courants de référence par la méthode PQ.....	16
<b>Figure 1. 16 :</b> Séparation des puissances avec un filtre passe bas.....	17
<b>Figure 1. 17 :</b> Emplacement du filtre passe bas dans le bloc d'identification. ....	18
<b>Figure 1. 18 :</b> Boucle de régulation de courant. ....	18
<b>Figure 1. 19 :</b> Boucle de régulation de la tension continue. ....	19
<b>Figure 2. 1 :</b> Comparaison des deux méthodes dans la détermination de la couleur. ....	23
<b>Figure 2. 2 :</b> Classification de la vitesse d'une voiture suivant la méthode classique. ....	24
<b>Figure 2. 3 :</b> Classification de la vitesse d'une voiture suivant la logique floue.....	24
<b>Figure 2. 4 :</b> Processus d'un régulateur flou. ....	25
<b>Figure 2. 5 :</b> Représentation de l'univers de discours. ....	26
<b>Figure 2. 6 :</b> Représentation des valeurs linguistiques. ....	27
<b>Figure 2. 7 :</b> Forme triangulaire. ....	27
<b>Figure 2. 8 :</b> Forme trapézoïdale .....	27
<b>Figure 2. 9 :</b> Forme gaussienne. ....	27

<b>Figure 2. 10</b> : Utilisation de l'opérateur insertion entre les deux premiers sous-ensembles (froid et moyen).....	29
<b>Figure 2. 11</b> : Utilisation de l'opérateur union entre les deux premiers sous-ensembles (froid et moyen).....	29
<b>Figure 2. 12</b> : La négation du premier sous-ensemble (froid).....	29
<b>Figure 2. 13</b> : Exemple de fuzzification .....	31
<b>Figure 2. 14</b> : Composition d'une règle de d'inférence.....	32
<b>Figure 2. 15</b> : (a) : Méthode du centre de gravité, (b) : méthode de la moyenne de maximum. ....	33
<b>Figure 2. 16</b> : Boucle de régulation floue.....	34
<b>Figure 3. 1</b> : Processus d'un régulateur flou [IA].....	38
<b>Figure 3. 2</b> : Schéma du principe de régulation floue. ....	38
<b>Figure 3. 3</b> : les fonctions d'appartenances : (a) de la variable d'entrée e, (b) de la variable d'entrée $\Delta e$ , (c) de la variable de sortie $\Delta u$ .....	39
<b>Figure 3.4</b> :Tracé de la surface de la variable de sortie en fonction des variables d'entrée...42	42
<b>Figure 3.5</b> : Implantation du filtre actif parallèle avec sa commande sous Simulink/Matlab..42	42
<b>Figure 3.6</b> : Schéma du régulateur flou sous Simulink.....42	42
<b>Figure 3. 7</b> : Représentations temporelle et spectrale du signal de courant appelé par une charge RL avant et après filtrage.....	43
<b>Figure 3. 8</b> : Régulation de la tension continue à une référence de 800V.....	43
<b>Figure 3. 9</b> : Représentations temporelle et spectrale du signal de courant appelé par une charge RC avant et après filtrage. ....	44
<b>Figure 3. 10</b> : Régulation de la tension continue à une référence de 800V.....	44
<b>Figure 3. 11</b> : Courant absorbé avant et après filtrage lors de la variation d'une charge.....	45
<b>Figure 3. 12</b> : Régulation de la tension stockage à 800 V lors d'une variation de la charge. .45	45
<b>Figure 3. 13</b> : Représentations temporelle et spectrale du signal de courant appelé par une charge déséquilibrée avant et après filtrage. ....	46
<b>Figure 3. 14</b> : Régulation de la tension continue à une référence de 800V.....	46
<b>Figure 3. 15</b> : Résultat d'essai à angle d'amorçage de 10° (avec R=60 $\Omega$ et L= 20mH).....	47
<b>Figure 3. 16</b> : Résultat d'essai à angle d'amorçage de 30° (avec R=60 $\Omega$ et L= 20mH).....	47
<b>Figure 3. 17</b> : Variation de la tension de référence de 800V à 900V.....	48

## Liste des Tableaux

<b>Tableau 1. 1 :</b> Les valeurs des éléments du filtre actif parallèle. ....	20
<b>Tableau 2. 1 :</b> Les opérateurs flous les plus utilisés.....	28
<b>Tableau 2. 2 :</b> Propriétés des ensembles flous. ....	30
<b>Tableau 2. 3 :</b> Quelques définitions de l'implication floue. ....	30
<b>Tableau 3. 1 :</b> La matrice des règles d'inférences. ....	40
<b>Tableau 3.2 :</b> Valeurs de THD obtenues par régulateur PI et par régulateur flou. ....	49
<b>Tableau 3. 3 :</b> Dépassement de la tension continue obtenu par un régulateur PI et par un régulateur flou. ....	49
<b>Tableau 3. 4 :</b> Temps de réponse de la tension continue obtenu par régulateur PI et par régulateur flou. ....	49

## Liste des abréviations et sigles

$a_0$ :	Valeur moyenne du signal
abc :	Axe du repaire triphasé
$A_F$ :	Amplitude du fondamental,
$A_h$ :	Amplitude des harmoniques
$\alpha\beta_0$ :	Axe du repère de Concordia
$a_n$ et $b_n$ :	Coefficients de Fourier.
$C_{dc}$ :	Capacité de stockage
CEI :	Commission Electrotechnique Internationale
COG :	Méthode du centre de gravité
$\Delta_e$ :	Variation de l'erreur
$\Delta_h$ :	Bande d'hystérésis
$\Delta_u$ :	Variation de la commande
e :	L'erreur
EN :	European Norm
FAP :	Filtre Actif Parallèle
FAS :	Filtre Actif Série
FLC :	Fuzzy Logic Controller
GTO :	Gate Turn-Off Thyristor
IGBT :	Insulated Gate Bipolar Transistor
$i_h$ :	Courants harmoniques
$K_i$ :	Coefficient integral
$K_p$ :	Coefficient proportionnel
$L_f$ :	Filtre de sortie
$L_s$ :	Inductance de la ligne du réseau électrique
MLI :	Modulation de Largeur d'Impulsion
MOM :	Moyenne de maximum
MOSFET :	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
$\mu$ :	Fonction d'appartenance
p :	Puissance active
$\bar{p}$ :	Puissance continue liée à la composante fondamentale active
$\tilde{p}$ :	Puissance alternative, liée à la somme des harmoniques.
$P_c$ :	Puissance active pour la compensation de la tension continue
PI :	Proportionnel et Integral
PID :	Proportionnel Intégral et Dérivée
q :	Puissance réactive
$\bar{q}$ :	Puissance continue liée à la composante fondamentale réactive
$\tilde{q}$ :	Puissance réactive alternative, liée à la somme des harmoniques
$R_s$ :	Résistance de la ligne du réseau électrique
T :	Transformée de Concordia
$T^{-1}$ :	Transformée de Concordia inverse
THD :	Total Harmonic Distorsion
THD <sub>F</sub> :	Total Harmonic Distorsion
U :	Univers de discours
$U_h$ :	Tensions harmoniques
$V_{dc}$ :	Tension continue aux bornes de la capacité de stockage
$V_s$ :	Tension simple du réseau
WAM :	Méthode de la Moyenne pondérée

---

# Introduction générale

---



## Introduction générale

Depuis plusieurs années, les critères fondamentaux de qualité pour les fournisseurs de l'énergie électrique ont été la garantie d'une alimentation stable en fréquence, stable en amplitude et disponible à tout instant. Aujourd'hui, avec l'arrivée des charges à base de composants de l'électronique de puissance tel que les semi-conducteurs et l'expansion de leur emploi dans l'industrie, le réseau électrique est de plus en plus perturbé par des harmoniques de courants ou de tensions provoquées par ces charges, dites charges non linéaires. Une forme non sinusoïdale du signal électrique provoque des dysfonctionnements et des dégâts aux matériels électriques tel que l'échauffement des câbles et des équipements électriques, voire même la destruction totale de tous ces équipements comme va être discuté dans le premier chapitre de ce mémoire.

Les ingénieurs ont donc imposé des normes respectées dans le monde entier, limitant la propagation et le taux de ces perturbations afin de protéger le matériel des clients. Par conséquent, aujourd'hui un autre critère est à prendre en considération pour les producteurs de l'énergie électrique, est d'assurer une forme sinusoïdale du signal de courant et de tension, à tout instant.

L'être humain utilise un raisonnement fondé sur la combinaison des expériences antérieures sauvegardées dans sa mémoire avec les informations extérieures observées dans son environnement. Cette pensée est généralement basée sur un raisonnement empirique ou l'analogie et l'intuition jouent un rôle prépondérant. Certaines grandeurs ne seront évaluées par nos sens et notre jugement que de manière imprécise ou vague : par exemple, la température extérieure nous apparaîtra très élevée ou très basse, ou comprise dans un certain intervalle, sans que nous puissions donner directement une valeur exacte de cette température. La logique floue se réfère à l'imprécision lexicale des expressions, se rapprochant ainsi de notre forme de raisonnement. La logique floue repose sur la théorie des ensembles flous développée par Zadeh (1965).

Elle ne déboucha réellement qu'en 1990 avec l'apparition de produits et de systèmes utilisant cette technique. Elle est utilisée dans de nombreuses applications ((grand public)) notamment au Japon. Sa mise en œuvre est maintenant facilitée par la disponibilité de composants dédiés et de puissants outils de développement.

Les phénomènes les plus perturbants du réseau électrique, les problèmes qu'ils causent, ainsi que les solutions pour les combattre, seront présentés dans le premier chapitre de ce mémoire. Aussi, la structure de l'une des solutions palliatives aux perturbations harmoniques ; le filtre actif parallèle, sera détaillée dans ce même chapitre.

Le principe de la logique floue sera expliqué et détaillé dans le deuxième chapitre de ce mémoire. C'est d'ailleurs cette logique qui va être implémentée dans la régulation de la

tension continue afin d'assurer une alimentation stable de l'onduleur utilisé dans le filtre actif parallèle.

Le troisième et dernier chapitre de ce mémoire est consacré à la présentation des résultats de simulation du filtrage des perturbations du réseau électrique par le filtre actif parallèle utilisant un régulateur flou. Ainsi, des comparaisons entre ces résultats et des résultats obtenus par logique classique (régulateur PI) vont être présentées dans ce chapitre.

---

**Premier chapitre :  
Perturbations et solutions de  
filtrage des harmoniques**

---

## Introduction

Les machines électriques, les équipements électriques et informatiques, les appareils de mesures ainsi que tout appareil électronique, nécessitent une alimentation électrique stable en fréquence, stable en amplitude et ayant une forme d'onde parfaitement sinusoïdale. Ces caractéristiques définissent la qualité de l'énergie électrique qui est un critère fondamental pour les utilisateurs et les producteurs d'électricité.

Cependant, l'énergie électrique, de sa production à sa consommation, est soumise à tout instant à des perturbations qui nuisent sa qualité et causant par conséquent des dysfonctionnements et des échauffements et même la destruction des équipements électriques et électroniques. Ces perturbations sont dues à des phénomènes naturels tel que la foudre et les tempêtes, mais aussi par les appareils branchés sur le réseau électrique. En effet, les équipements électriques sont de nos jours plus efficaces et plus rapides grâce au développement des semi-conducteurs, mais malheureusement, ces derniers déforment l'onde du signal, causant la dégradation de la qualité de l'énergie électrique.

Dans ce chapitre on va présenter les différentes sources de perturbations ainsi que les problèmes qu'ils causent, puis des solutions pour combattre ces perturbations et améliorer la qualité de l'onde électrique.

### 1.1 Les perturbations électriques

La qualité du signal électrique est affectée soit par des phénomènes naturels (la foudre, le vent, contact des files avec la végétation...etc), soit par des manipulations effectuées sur le réseau électrique (maintenance, essais...etc), ou soit par la nature des charges branchées sur ce réseau.

On cite les phénomènes les plus connus, causés par ces perturbations :

- **Fluctuation de tension** : C'est une courte diminution de la tension, ne dépassant pas 10% de la tension nominale. Quand la tension varie lentement en restant dans le seuil de référence, les appareils branchés sur le réseau ne vont pas être perturbés. Ce sont par contre les variations rapides qui peuvent causer des dégâts au niveaux des équipements électriques. Ils ont comme origine : la mise en service ou hors service des appareils dont la puissance absorbée varie de façon rapide [1].
- **Creux et coupures de tension** : la mise en service d'un appareil appelant un fort courant de démarrage ou la variation brusque de la charge, ou encore des phénomènes naturels aléatoires tel que la foudre, provoquent une brusque diminution de la tension de plus de 10% jusqu'à 90% de la tension nominale, cette chute est appelée creux de tension.  
Une chute au-delà de 90% est appelée coupure de tension [1].
- **Surtension (transitoires et permanentes)** : Une surtension transitoire est un dépassement brusque (d'une durée de moins 1s) de l'amplitude de la tension.

Une surtension permanente est une augmentation de la tension qui ne dépasse pas 10% de la tension nominale mais qui est maintenue pendant plusieurs cycles.

Les appareils électriques sont affectés par ces deux types de surtension dès que l'augmentation de la tension atteint une valeur supérieure à celle supportées par ces dernières [2].

- **Variation de la fréquence :** La fréquence doit être toujours contrôlée et maintenue à  $\pm 0,5$  Hz autour de 50 Hz ou 60Hz dans certains pays [3]. Une variation en dehors de cette plage, nuit le bon fonctionnement des transformateurs et les moteurs alternatifs. Les variations de fréquence peuvent être causées par des évolutions continues de la consommation, l'arrêt d'une centrale de production ou par des courts circuits.
- **Déséquilibre du réseau électrique :** Le réseau électrique est dit déséquilibré si l'un des deux cas suivants se manifeste : lorsque les trois tensions du système triphasé n'ont pas la même valeur efficace, et on parle dans ce cas d'un déséquilibre d'amplitude, ou lorsque le décalage entre les trois phases n'est pas égal à  $120^\circ$ , et on parle dans ce cas d'un déséquilibre de phase [4]. Le déséquilibre du réseau fait naître des courants supplémentaires (courants homopolaires) causant l'échauffement du fil neutre et les appareils branchés sur ce même réseau.
- **Les harmoniques :** Ce sont des courants ou des tensions supplémentaires qui se superposent aux courants et aux tensions sinusoïdaux de la source, déformant ainsi l'allure sinusoïdale du signal. Les sources d'harmoniques sont surtout les charges constituées par des composants d'électronique de puissance tel que les diodes, les transistors et tout élément semi-conducteur. Ces charges sont dites charges non linéaires. Ils posent aujourd'hui un véritable casse-tête pour les ingénieurs électrotechniciens à cause des dégâts qu'ils provoquent.

Dans ce qui suit, nous allons détailler ce type de pollution et présenter les solutions pour les combattre et réduire leurs effets sur la qualité du signal électrique.

## 1.2 La pollution harmonique

### 1.2.1 Analyse de Fourier

La décomposition d'un signal déformé montre que celui-ci est composé d'un signal sinusoïdal de fréquence et d'amplitude égales à celles du fondamental, cette sinusoïde est appelée d'ailleurs la fondamentale, en plus de celle-ci s'ajoute des signaux sinusoïdaux ayant des fréquences multiples entières de la fréquence du fondamental (figure 1.1) [5]. Ces signaux sont appelés harmoniques, et ce multiple entier est le rang de l'harmonique.

L'outil mathématique permettant la séparation de ces signaux est le théorème de Fourier, qui dit que tout signal périodique de période  $T$  et de variable réelle  $t$ , peut s'écrire comme une somme infinie de sinusoïdes dont la fréquence est multiple de la fréquence fondamentale  $\frac{1}{T}$ .

A ces termes purement sinusoïdaux peut se rajouter une éventuelle composante continue [6]. Il est défini par :

$$S(t) = a_0 + \sum_0^{\infty} [a_n \cdot \cos(n\omega t) + b_n \cdot \sin(n\omega t)] \quad 1.1$$

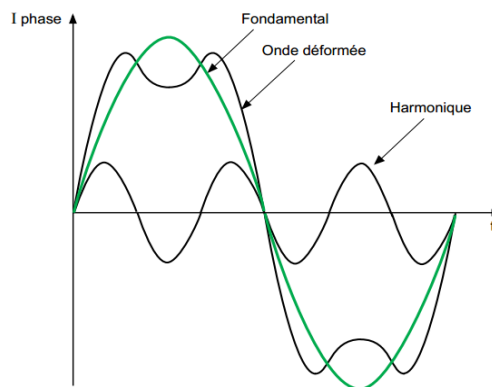
Avec :

$a_0$  est la valeur moyenne du signal, donnée par :

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T S(t) dt \quad 1.2$$

$a_n$  et  $b_n$  sont dits les coefficients de Fourier, ils représentent les amplitudes des harmoniques de rang  $n$  (valeurs efficaces), et sont définis par :

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) \cdot \cos(n\omega t) dt \quad \text{et} \quad b_n = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) \cdot \sin(n\omega t) dt \quad 1.3$$



**Figure 1. 1** : Décomposition harmonique d'un signal déformé.

Selon leur rang, les harmoniques sont séparés en harmoniques de rang impaire et en harmoniques de rang paire. Ces derniers sont généralement nuls à cause de la symétrie du signal.

On distingue aussi les harmoniques de courant et les harmoniques de tension. En effet, quand les récepteurs pollueurs appellent des courants riches en harmoniques qui, en circulant dans des conducteurs et des équipements électriques, rencontrent des impédances, des tensions harmoniques sont engendrées tout en obéissant à la loi d'Ohm [1] :

$$U_h = Z \times i_h \quad 1.4$$

### 1.2.2 Éléments d'identification des harmoniques

Un signal électrique de bonne qualité a une forme parfaitement sinusoïdale vide d'harmoniques. Plus le signal est chargé d'harmoniques plus sa forme est déformée. La mesure ou la quantification de cette pollution se fait en calculant des paramètres tel que le facteur de crête, le facteur de déformation, la valeur efficace...etc. Mais le plus important de ces paramètres est sans doute le Taux de Distorsion Global THD (Total Harmonic Distorsion en anglais). Il donne un pourcentage représentant la richesse harmonique d'un signal par rapport au fondamental. Il est calculé par :

$$THD = \frac{\sqrt{A_{h_2}^2 + A_{h_3}^2 + \dots + A_{h_n}^2}}{A_{\text{fondamental}}} \quad 1.5$$

### 1.2.3 Analyse spectrale

Contrairement à l'analyse temporelle, l'analyse spectrale permet la représentation du contenu fréquentiel du signal sous forme d'histogramme montrant l'importance des harmoniques par rapport au fondamental en fonction du rang ou de la fréquence. Dans la figure 1.2 on présente un signal déformé avec sa représentation spectrale (fréquentielle).

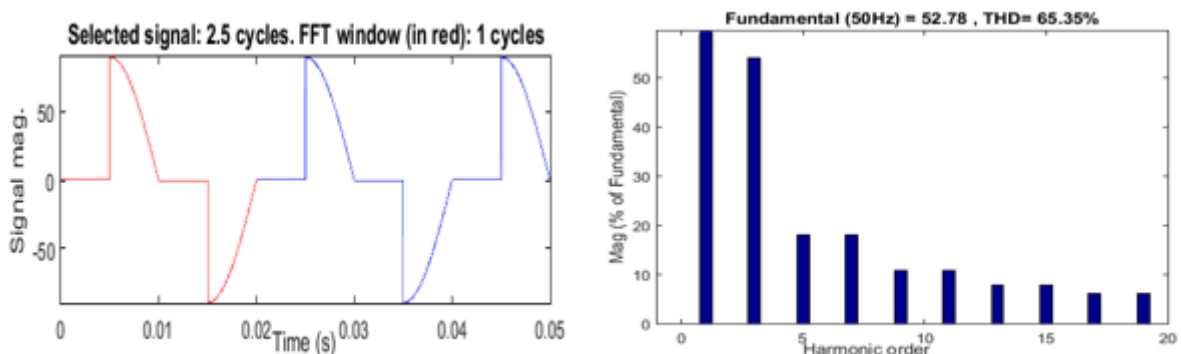


Figure 1. 2 : Signal déformé avec sa représentation spectrale (à droite).

### 1.2.4 Les équipements pollueurs

Les courants harmoniques sont générés par différents types d'appareillage, on cite comme exemples [7] :

- Les transformateurs, les moteurs et les générateurs,
- Les postes à souder et les fours à arc,
- Les convertisseurs d'électronique de puissance et outils de commande des machines (redresseurs, gradateurs, onduleurs, cyclo-convertisseurs).
- Les redresseurs monophasés et les lampes fluorescentes,
- Matériel électroménager, les climatiseurs et les téléviseurs.

### 1.2.5 Effets néfastes de la pollution harmonique

Avec l'augmentation des clients et la multitude de charges installées sur le réseau électrique, la pollution harmonique est de plus en plus présente, engendrant des dysfonctionnements et des dégâts aux autres charges installées sur ce même réseau. On cite quelques problèmes causés par cette pollution :

- Vibrations et bruits acoustiques anormaux au niveau des moteurs et transformateurs.
- Diminution de la précision des appareils de mesure.
- Destruction du matériel tel que les condensateurs à cause de la résonance.
- Dégradation du facteur de puissance.
- Échauffement des conducteurs.
- Fatigue mécanique du matériel industriel.
- Vieillesse prématurée des équipements.

Vu les effets néfastes et les dégâts que peut engendrer les charges non linéaires, les ingénieurs ont tenté plusieurs solutions pour pallier à ces problèmes, et chaque solution a ses caractéristiques et ses points forts dans l'élimination des harmoniques. Il existe des solutions dites traditionnelles, en agissant sur la conception de l'installation électrique ou en utilisant des filtres passifs. Cependant, ces solutions ne permettent pas une élimination totale des harmoniques, elles sont utilisées pour éliminer des harmoniques d'un rang déterminé, ils ne sont donc pas efficaces. Heureusement, ces dernières années, d'autres solutions plus flexibles et plus efficaces ont été envisagées, ce sont les solutions modernes, qui sont à base de compensateurs actifs, on parle alors de filtrage.

Dans la suite de ce chapitre, nous allons mettre l'accent sur les solutions modernes.

## 1.3 Les normes internationales

Les perturbations vues précédemment sont contrôlées d'une manière à ne pas dépasser certains seuils déterminés par des normes internationales afin de protéger le matériel électrique, parmi lesquelles :

- **La norme EN 50160** : L'objectif de cette norme est de limiter les phénomènes perturbateurs (creux de tension, fluctuation de tension, coupure...etc), qui affectent les caractéristiques de la tension en termes de sa fréquence, son amplitude ainsi que sa forme d'onde [8].
- **La norme EN 50160** : le taux global de distorsion harmonique de la tension fournie (incluant tous les harmoniques jusqu'au rang 40) ne doit pas dépasser 8 % [8].
- **La norme CEI 61000-3-2** : Cette norme concerne les équipements domestiques, autrement dit, les équipements consommant un courant inférieur ou égale à 16A par phase. Elle fixe les limites des courants harmoniques injectés par ces appareils dans le réseau [9].



- **La norme CEI 61000-3-4** : les émissions de courants harmoniques dans les réseaux publics de distribution basse tension pour les matériels ayant un courant assigné supérieur à 16 A sont limités par cette norme [10].

Pour le taux global de distorsion harmonique de courant, il n'existe pas une norme précise, mais avec l'expérience, les ingénieurs et les producteurs d'électricité l'ont limité à 10% [31].

## 1.4 Solutions de dépollution harmonique

### 1.4.1 Filtres actifs

Avec l'arrivée des semi-conducteurs tel que les IGBTs, les MOSFETs ou les GTOs, les filtres passifs ont été remplacés par des filtres beaucoup plus puissants et plus adaptatifs aux variations apportées, garantissant ainsi une qualité d'énergie électrique qui reste dans les normes. Ce sont les filtres actifs.

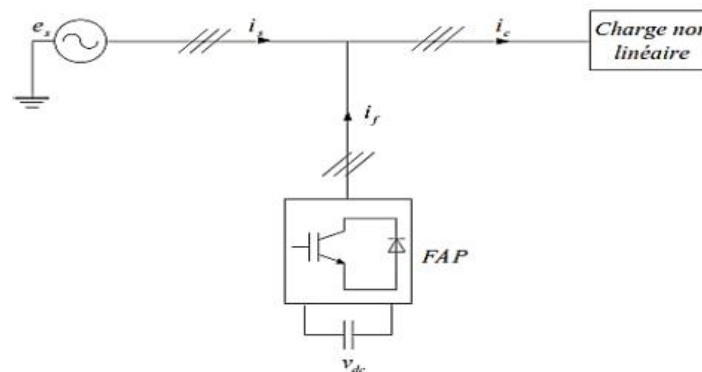
Le principe de fonctionnement d'un filtre actif est l'injection en temps réel, en série ou en parallèle, des courants ou des tensions harmoniques en opposition par rapport aux harmoniques existants dans le réseau électrique. La somme de ces deux courants ou tension opposés donne un courant ou une tension nulle. On parle alors de compensation.

Selon le type d'harmoniques à éliminer, les filtres actifs sont connectés soit en série, soit en parallèle ou soit en combinaison des deux (série et parallèle).

### 1.4.2 Filtre actif parallèle (FAP)

Le filtre actif parallèle est utilisé pour la compensation des harmoniques de courant. Connecté en parallèle au réseau comme montré sur la figure 1.3, il génère des courants harmoniques égaux à ceux générés par les charges non linéaires, mais en opposition de phase afin de les éliminer et reprendre la forme sinusoïdale du courant de la source [11]. Ce filtre peut aussi compenser l'énergie réactive en améliorant ainsi le facteur de puissance, mais cela nécessite un dimensionnement plus important [12].

La structure de ce filtre sera détaillée dans la suite de ce chapitre car c'est ce type de filtre qu'on va utiliser pour la compensation des harmoniques de courant.



**Figure 1.3** : Filtre actif parallèle.

### 1.4.3 Filtre actif série (FAS)

Le filtre actif série est placé en série avec le réseau à l'aide d'un transformateur (figure 1.4). Il permet non seulement la compensation des tensions harmoniques mais aussi la protection des charges contre les creux de tension et le déséquilibre. Ce filtre génère des tensions harmoniques qui s'oppose aux tensions perturbatrices afin de les éliminer et de préserver une forme de tension parfaitement sinusoïdale.

Toutefois, en cas de court-circuit de la charge, le filtre actif série devient la seule charge du réseau et risque d'être détruit. Ceci nécessite des protections supplémentaires [7].

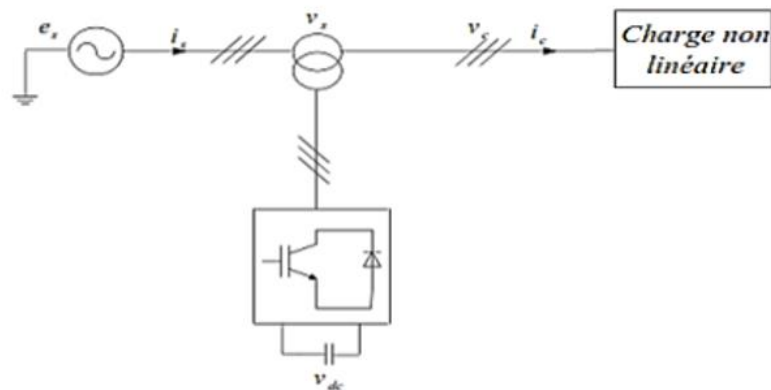


Figure 1. 4 : Filtre actif série.

### 1.4.4 Combinaison série parallèle des filtres actifs

La mise en forme d'une combinaison d'un filtre actif série avec un filtre actif parallèle permet de bénéficier des avantages des deux filtres, en compensant à la fois les tensions harmoniques et les courants harmoniques, assurant par conséquent une forme sinusoïdale au courant et à la tension du réseau. Cependant, l'utilisation de deux filtres puissants implique sans doute un coût important. Cette association est représentée dans la figure 1.5.

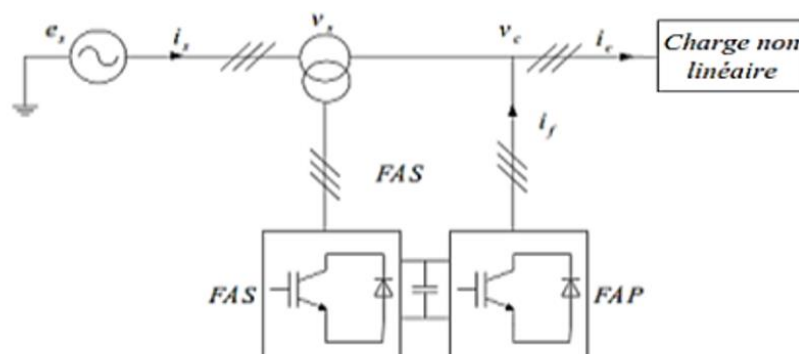


Figure 1. 5 : Combinaison série parallèle des filtres actifs.

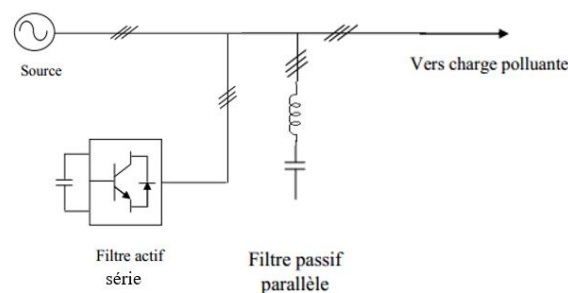
### 1.4.5 Filtre hybride

C'est une combinaison d'un filtre actif et d'un filtre passif afin d'augmenter la puissance du filtrage tout en gardant un coût raisonnable. En effet, les filtres passifs sont utilisés dans ce cas pour supprimer les harmoniques les plus importantes (de basses fréquences : 150Hz, 250Hz...), et le filtre actif est utilisé pour la compensation des autres harmoniques de hautes fréquences. Grâce à cette topologie, le dimensionnement et le coût du filtre actif sont réduits. Suivant le mode d'association des filtres passifs aux filtres actifs, il existe plusieurs types de filtres hybrides. On cite ici seulement les trois combinaisons les plus utilisées [13] :

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

#### 1.4.5.1 Filtre actif série avec filtres passifs parallèles

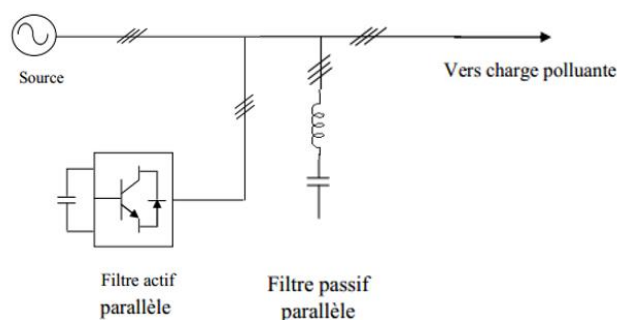
La structure de ce filtre est représentée sur la figure 1.6. Le filtre actif ici agit comme une résistance vis-à-vis les courants harmoniques et les oblige à circuler dans le filtre passif [13].



**Figure 1. 6 :** Filtre actif série avec filtres passifs parallèles.

#### 1.4.5.2 Filtre actif parallèle avec filtres passifs parallèles

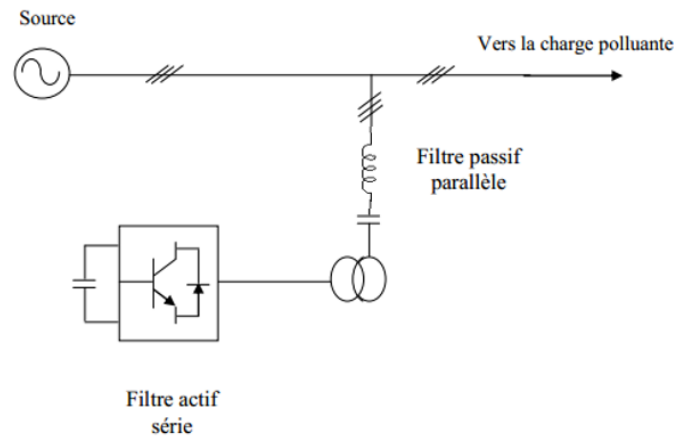
Dans cette structure (figure 1.7), le filtre passif s'occupe des harmoniques de rangs faibles et le filtre actif s'occupe des harmoniques de rangs élevés.



**Figure 1. 7 :** Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.

### 1.4.5.3 Filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles

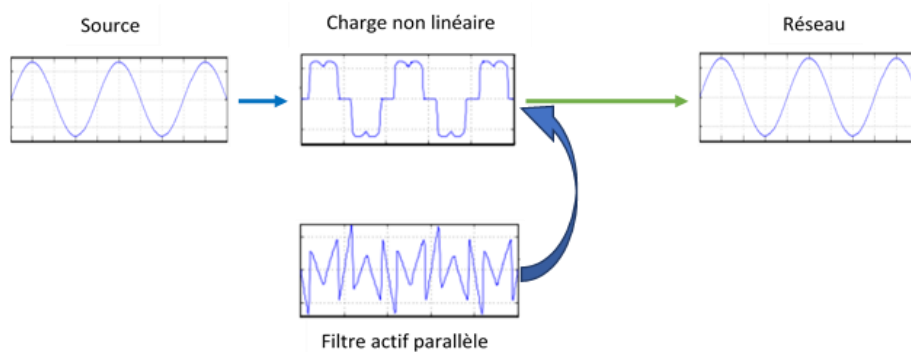
Dans la structure représentée sur la figure 1.8, le filtre actif est relié en série avec le filtre passif. Ce dernier minimise le courant absorbé par le filtre actif, réduisant par conséquent son dimensionnement. Aussi, le filtre passif présente une protection au filtre passif contre un éventuel court-circuit de la charge.



**Figure 1.8 :** Filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles.

## 1.5 Filtre actif parallèle

Le filtre actif parallèle est constitué de composants qui sont séparés en deux grandes parties (partie puissance et partie commande), lui permettant la compensation des courants harmoniques et de l'énergie réactive. La figure 1.9 explique le principe de compensation des harmoniques de courant par ce filtre, et la figure 1.10 regroupe tous les composants qui le constituent.



**Figure 1.9 :** Principe de compensation des courants harmoniques par un FAP.

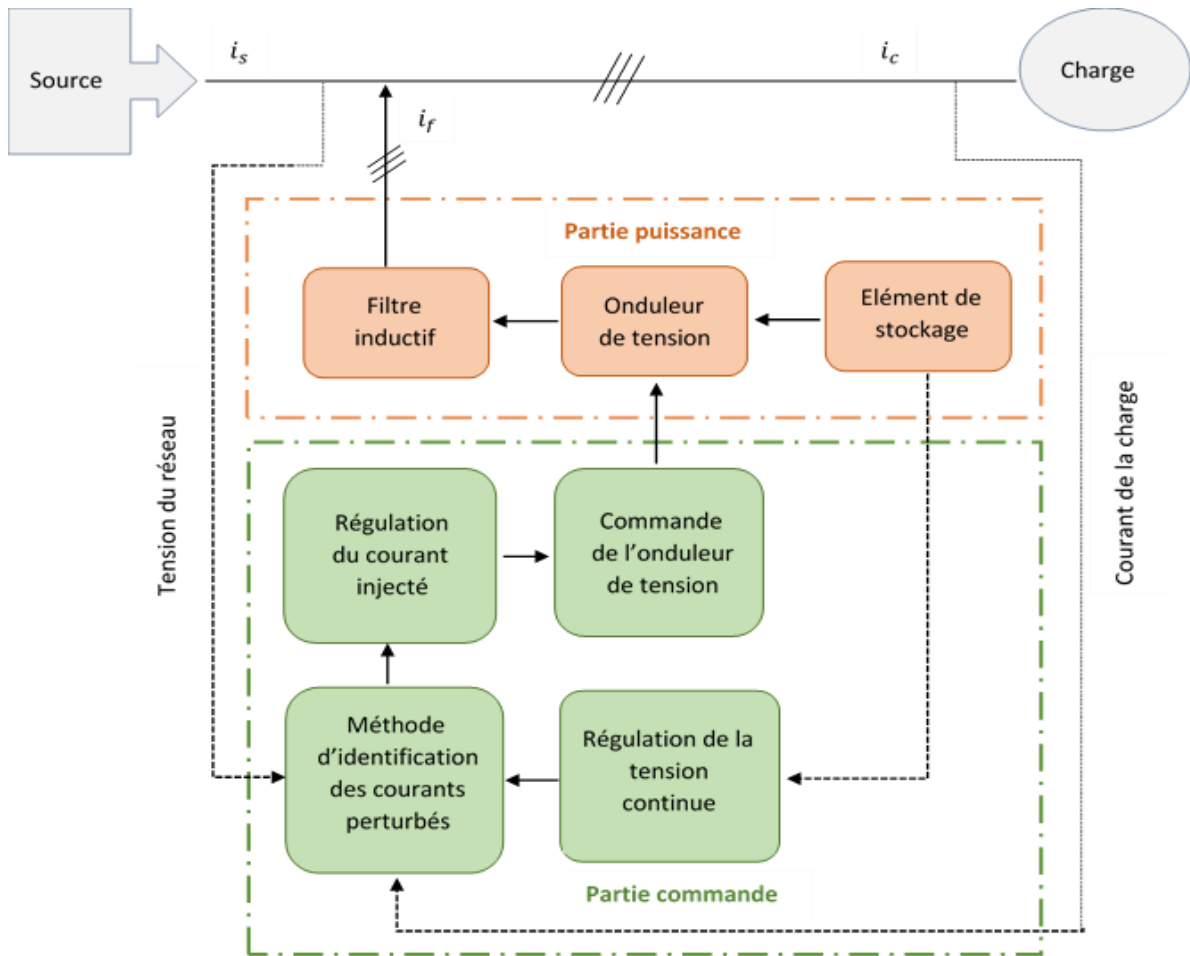


Figure 1.10 : Structure générale du filtre actif parallèle.

### 1.5.1 L'onduleur de tension

L'onduleur est l'élément qui permet la génération des harmoniques en opposition de phase à ceux absorbés par la charge. L'onduleur utilisé dans notre étude est un onduleur de tension à deux niveaux, constitué de trois bras comme illustré dans la figure 1.11 dont chacun est formé de deux interrupteurs de type IGBT.

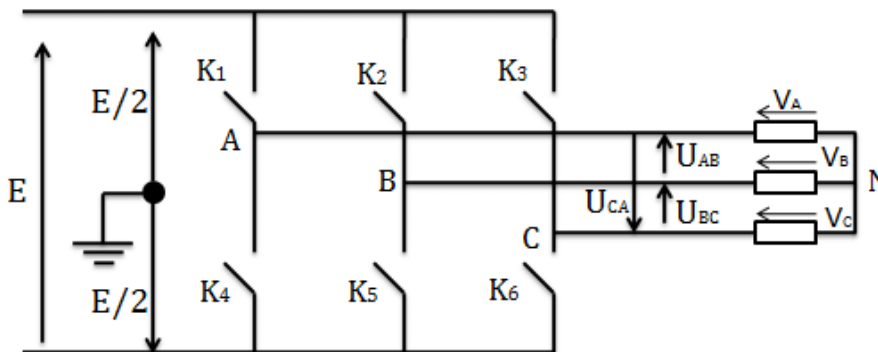
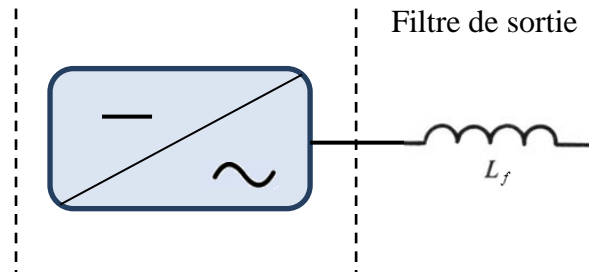


Figure 1.11 : Onduleur de tension triphasé schématisé avec de simples interrupteurs.

### 1.5.2 Le filtre inductif

Le filtre inductif (ou filtre de sortie) est une bobine placée à la sortie de l'onduleur de tension (figure 1.12) permettant de le faire travailler comme une source de courant, et de le relier au réseau électrique. Il assure aussi le lissage des courant injectés en empêchant les composantes dues aux commutations des transistors de se propager sur le réseau électrique, afin d'améliorer la qualité du signal de courant.



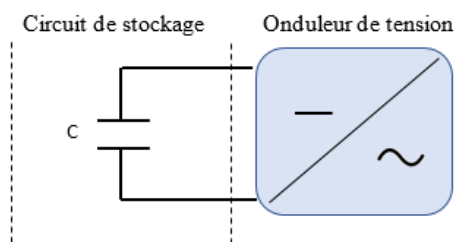
**Figure 1. 12 :** Onduleur de tension connecté à une inductance  $L_f$

Le bon dimensionnement de ce filtre est très important afin d'éliminer les harmoniques importants, tout en préservant une dynamique assez élevée du filtre actif.

### 1.5.3 Circuit de stockage d'énergie

L'alimentation de l'onduleur en tension continue est assurée par une capacité  $C_{dc}$  (figure 1.13) considérée comme un réservoir d'énergie en régime transitoire, et assure un faible taux d'ondulation à la tension en régime permanent [14].

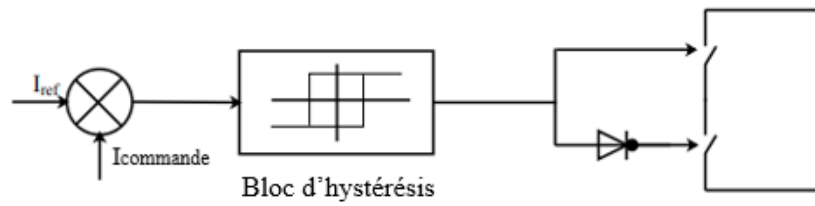
La valeur de la capacité  $C_{dc}$  et de la tension continue  $V_{dc}$  aux bornes de ce condensateur se répercutent sur la dynamique du filtre actif, ils doivent être alors choisis soigneusement.



**Figure 1. 13 :** Circuit de stockage de la tension continue connecté à l'onduleur.

### 1.5.4 Commande de l'onduleur

Les interrupteurs de l'onduleur doivent être commandés d'une façon complémentaire afin d'éviter les courts-circuits, et d'une manière à injecter en temps réel des courants harmoniques égales aux harmoniques du réseau en amplitude, en phase et en fréquence. La commande utilisée dans ce mémoire est la commande par hystérésis (figure 1.14).



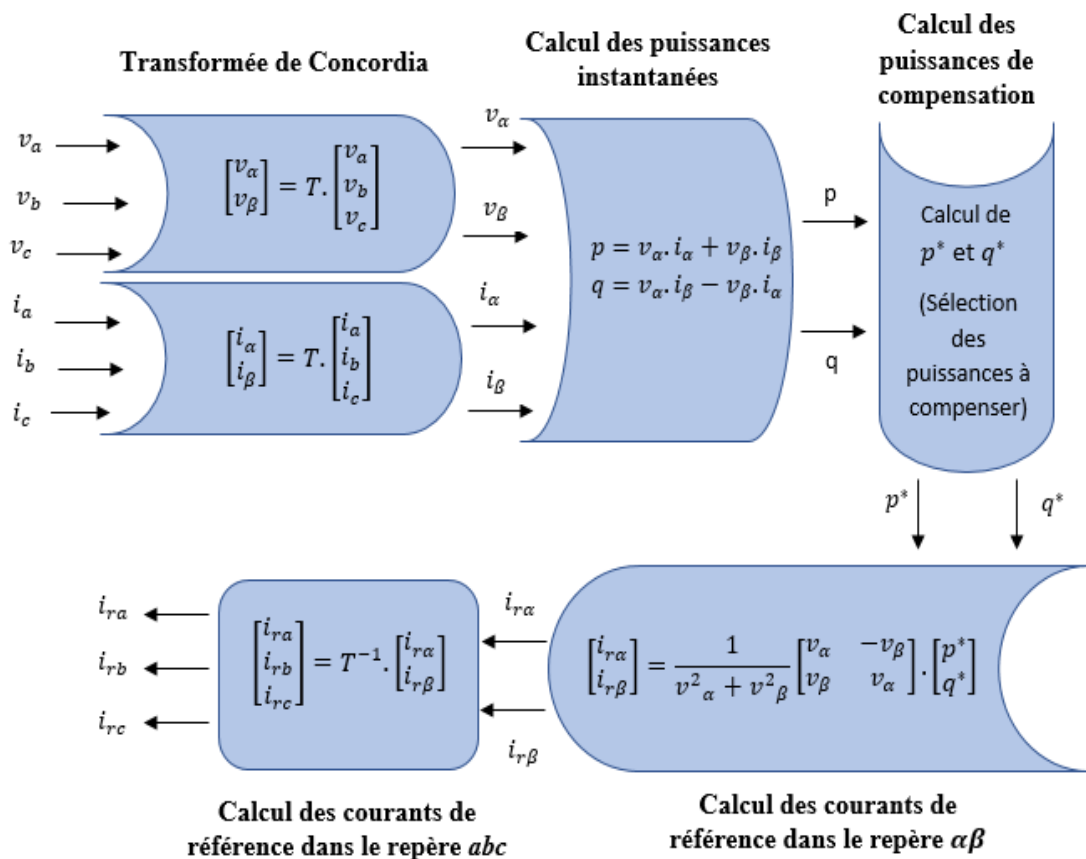
**Figure 1.14 :** Commande des interrupteurs par hystérésis.

Le bloc d'hystérésis piège l'erreur de courant entre deux seuils appelés bande d'hystérésis. L'ordre de commutation (enclenchement / déclenchement) change suivant l'augmentation ou la diminution de l'erreur entre le courant de référence et le courant injecté.

### 1.5.5 La méthode d'identification des courants perturbés

Le signal de commande de l'onduleur est déterminé en calculant à tout instant la différence (l'erreur) entre le signal injecté par l'onduleur et le signal de référence. Ce dernier doit être le plus proche possible du signal injecté, et cela nécessite un algorithme de calcul précis et aussi rapide.

La méthode d'identification des courants harmoniques utilisée dans ce mémoire est la méthode des puissances instantanées (appelée aussi méthode PQ). Cette méthode permet aussi la compensation de l'énergie réactive. L'organigramme de la figure 1.15 résume les étapes de cette méthode.



**Figure 1.15 :** Algorithme de calcul des courants de référence par la méthode PQ.

La transformée de Concordia  $T$  permet de simplifier la procédure d'identification en changeant le système de coordonnées triphasé  $(abc)$  en un système de coordonnées biphasé  $(\alpha\beta o)$ .

$p$  est la puissance réelle instantanée responsable à la compensation des harmoniques, et  $q$  est la puissance imaginaire instantanée responsable à la compensation de l'énergie réactive. En présence d'harmoniques, ces deux puissances instantanées, contiennent une puissance continue, image de la puissance du fondamental, et une puissance alternative, liée à la somme des harmoniques. Elles sont exprimées par la relation suivante :

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad 1.6$$

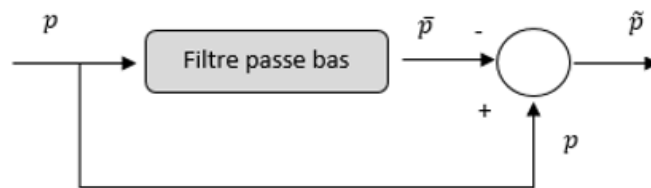
Avec :

$\bar{p}$  : Puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant ou de tension.

$\bar{q}$  : Puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant ou de tension.

$\tilde{p}$  et  $\tilde{q}$  : Puissances alternatives liées à la somme des composantes harmoniques.

La séparation de ces deux puissances se fait par un filtre passe bas relié à un soustracteur, comme montré dans la figure suivante :



**Figure 1. 16** : Séparation des puissances avec un filtre passe bas.

$p^*$  et  $q^*$  sont respectivement les puissances réelles et imaginaires de compensation après la sélection des puissance à compenser (puissance du fondamental et une puissance alternative).

$T^{-1}$  Est la transformée inverse de Concordia, permettant le calcul des courants de référence dans le système de coordonnées triphasé  $(abc)$ .

Dans la figure 1.17, on peut voir l'emplacement du filtre passe bas dans le bloc d'identification.



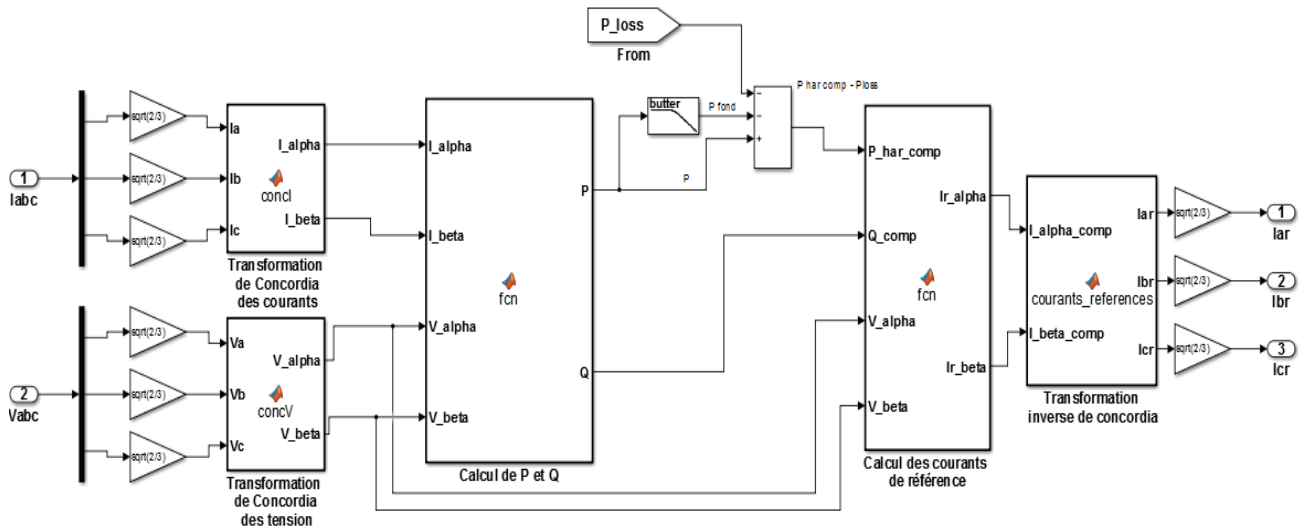


Figure 1. 17 : Emplacement du filtre passe bas dans le bloc d'identification. *Figure*

### 1.5.6 Régulation du courant

Les variations aléatoires de la fréquence de commutation des interrupteurs dans le cas de la commande par hystérésis fait naissance à des harmoniques de hautes fréquences qui se superposent sur le signal de courant filtré. L'élimination de ces dernières peut se faire à l'aide d'un régulateur PI placé sur chaque phase, avant le bloc de commande. Ceci permet d'améliorer le THD du signal de courant.

La boucle de régulation de courant est présentée sur la figure suivante :

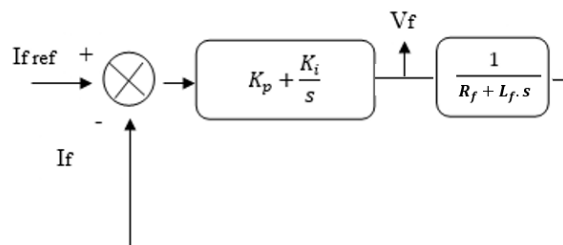
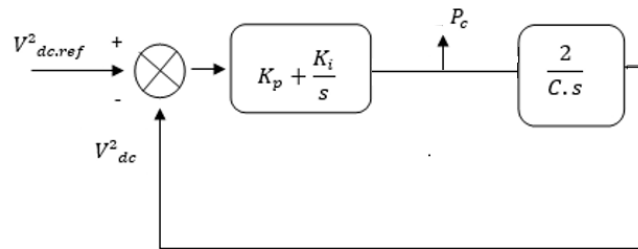


Figure 1. 18 : Boucle de régulation de courant.

### 1.5.7 Régulation de la tension continue $V_{dc}$

L'alimentation en tension continue de l'onduleur par la capacité de stockage doit être constante et stable au tour d'une valeur de référence bien déterminée afin d'assurer une bonne génération des courants harmoniques. Toutefois, les pertes dans les interrupteurs et dans le filtre de sortie ainsi que les changements de conditions de charge, fait que la tension aux bornes du circuit de stockage est fluctuante. Il faut alors la maintenir autour d'une valeur de référence constante par la présence d'une boucle de régulation (figure 1.19).

Les régulateurs utilisés pour cette régulation peuvent être des régulateurs proportionnels, des régulateur PI ou des régulateur PID, qui ont prouvé d'ailleurs de bons résultats.



**Figure 1. 19 :** Boucle de régulation de la tension continue.

À partir de la différence entre la tension continue de référence et la tension continue instantanée, le régulateur PI calcule une puissance active  $P_c$  qui va être incluse dans le calcul des courants de référence ( $\tilde{p} + P_c$ ), assurant ainsi une alimentation stable en tout instant en tension continue pour l'onduleur.

Avec le développement de la technologie dans le domaine d'automatique et l'apparition de l'intelligence artificielle, de nouveaux programmes informatiques et de nouvelles méthodes ont remplacé les méthodes classiques tel que la logique de Boole utilisée dans l'industrie pour la régulation et la commande des machines et des systèmes industriels, donnant naissance à des régulateurs beaucoup plus précis et robustes, appelés régulateurs flous.

Dans ce mémoire, c'est ce type de régulateur qui va être utilisé pour la régulation de la tension continue du filtre actif parallèle.

## 1.6 Dimensions du filtre actif parallèle

Le bon fonctionnement du filtre et l'élimination des harmoniques en tout instant ne peut être possible qu'avec un dimensionnement judicieux des composants de ce filtre. En effet, un mauvais calcul des valeurs d'un seul composant peut par exemple favoriser le passage de quelques harmoniques, dégrader la dynamique du filtre en le rendant moins rapide, ou incapable de s'adapter à différentes charges. Il existe pour cela des techniques et des modèles mathématiques qui dépendent des caractéristiques du réseau et de la source pour le bon choix des paramètres du filtre.

Le tableau suivant (tableau 1.1) regroupe les paramètres de notre filtre actif parallèle après dimensionnement.

**Tableau 1. 1 :** Les valeurs des éléments du filtre actif parallèle.

<b>Réseau électrique</b>				
$V_s = 220V$	$f = 50 \text{ Hz}$	$R_s = 0,1\Omega$	$L_s = 0,15mH$	
<b>Filtre actif parallèle</b>				
<b>Tension continue</b>	<b>Capacité de stockage</b>	<b>Filtre de sortie</b>	<b>Bande d'hystérésis</b>	<b>Régulateur de courant</b>
$V_{dc} = 800V$	$C_{dc} = 500\mu F$	$L_f = 7mH$	$\Delta h = 0,002 \text{ A}$	$K_p = 131,9$ $K_i = 1,67 \times 10^{-4}$

## 1.7 Conclusion

De nos jours, le réseau électrique est de plus en plus perturbé, causant la dégradation de la qualité de l'énergie électrique. Tel a été discuté dans le début de ce chapitre, ces perturbations sont dues à des manœuvres effectuées sur le réseau ou par des phénomènes naturels conduisant à des creux ou des coupures de tension, des surtensions...etc. Ils sont dus aussi aux charges non linéaires branchées sur le même réseau qui déforment l'allure du signal électrique à cause des harmoniques qu'ils génèrent.

Nous avons présenté ensuite quelques solutions modernes palliatives à ce type de perturbations permettant de préserver une qualité du signal électrique qui respecte les normes internationales.

Parmi ces solutions, on trouve le filtre actif parallèle, solution efficace permettant la compensation des harmoniques de courant et la compensation de l'énergie réactive. Cependant, ce filtre nécessite une alimentation en tension continue qui doit être stable. Cela peut se faire grâce à un régulateur installé dans une boucle de régulation.

Dans le chapitre suivant nous allons présenter et détailler la logique utilisée dans le régulateur de la tension continue du filtre actif étudié dans ce mémoire, appelée logique floue.

---

# **Deuxième Chapitre :**

## **La logique floue**

---

## 2.1 Introduction

Un filtre actif parallèle, dont la tension continue d'alimentation est régulée par un PI classique, donne de bons résultats de filtrage et une robustesse acceptable. Ces performances peuvent être encore meilleures en introduisant un type de régulation plus précis qui se base sur une logique qui donne des décisions graduelles. Dans le présent chapitre nous commençons par un petit historique suivi par une introduction à la logique floue et une présentation de ses principes, on aborde par la suite les étapes d'un processus flou en passant par ses notions de base, et on clôture le chapitre par ses applications dans la régulation.

## 2.2 Bref historique sur la logique floue

La notion de logique floue a vu le jour en 1965. À cette date, Le professeur d'automatique à l'université de Berkley, en Californie, Lotfi Zadeha publié l'article "fuzzy sets" dans lequel il a développé la théorie des ensembles flous et introduit le terme fuzzy dans la littérature technique [15]. Zadeh avait observé que la logique informatique conventionnelle ne pouvait pas manipuler des données qui représentaient des idées subjectives ou vagues, donc il a créé une logique pour permettre aux ordinateurs de déterminer les distinctions entre les données avec des nuances de gris, semblables au processus du raisonnement humain [16].

La première application de la logique floue a été réalisée par Mamdani en 1975 (la commande d'une chaudière à vapeur réalisée par l'équipe de E.H Mamdani, au Queen Collège de Londres) [17]. Et à partir de la fin des années 1980 et début des années 1990, de nombreux produits utilisant cette technique ont vu le jour dans les pays industrialisés notamment au Japon. On retient par exemple la réalisation en 1988 d'un métro à Sendai piloté par la logique floue, c'était une première mondiale [17] [18].

## 2.3 Introduction à la logique floue

La logique classique (logique de Boole), a été utilisée pendant plusieurs années dans divers domaines et a prouvé son efficacité dans la résolution de nombreux problèmes des systèmes industriels. Cette méthode nécessite la connaissance parfaite du système à régler, une modélisation en une fonction de transfert ou d'équations d'état est donc indispensable. Cependant, la non-linéarité des systèmes et la variation de leurs paramètres, ne permettent pas une bonne modélisation de la machine en un modèle mathématique précis, et parfois il est même impossible d'obtenir la fonction de transfert du système lorsque ce dernier à un certain degré de complexité, ce qui rend la régulation des systèmes industriels dans la majorité des cas très difficile.

Ensuite, parmi les inconvénients des méthodes conventionnelles est qu'ils n'admettent que deux valeurs : 0 ou 1 pour exprimer des faits faux ou des faits vrais, limitant par conséquent leur champ d'action dans beaucoup d'applications [16]. En effet, les machines industrielles et les systèmes embarqués qu'on trouve par exemple dans les moyens de transport, ou les équipements informatiques utilisés dans le domaine de l'Intelligence Artificielle ou dans le

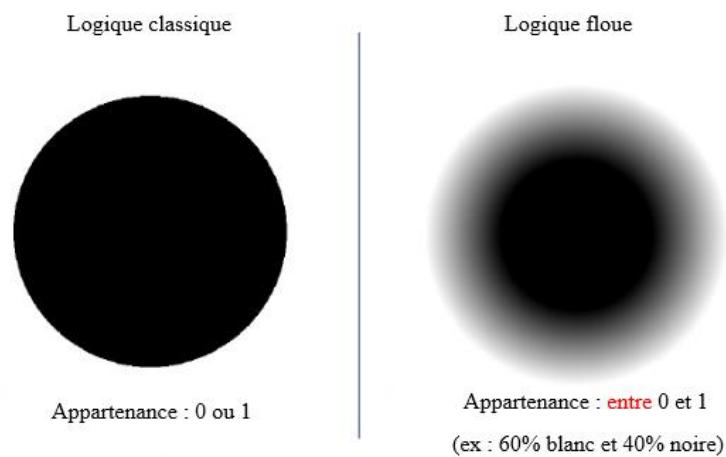
domaine de la technologie de pointe, nécessitent un raisonnement proche du raisonnement humain, c'est-à-dire basé sur des données incertaines et imprécises.

Ces difficultés ont poussé les ingénieurs à trouver d'autres méthodes, plus souples et plus proche du raisonnement humain.

Face aux difficultés et aux complexités de la gestion des systèmes ou la prise de décision, les approches numériques, pourtant bien développées se sont avérées d'une efficacité limitée [19]. La logique floue (Fuzzy Logic en anglais) a permis de pallier ces problèmes en rapprochant le raisonnement de la machine au raisonnement humain.

La particularité de cette méthode est qu'elle ne se limite pas qu'aux deux extrémités de l'intervalle  $[0, 1]$  mais plutôt elle l'utilise complètement (elle prend n'importe quelle valeur réelle située entre 0 et 1). La prise de décision sera donc plus précise puisqu'elle sera basée sur une classification graduée (progressive). Ainsi, la logique floue confère une flexibilité très appréciable aux raisonnements qui l'utilisent, ce qui rend possible la prise en compte des imprécisions et des incertitudes [20]. La figure 2.1 montre la différence la méthode classique et la logique floue dans la détermination de la couleur noire et de la couleur blanche.

La logique floue suscite actuellement un fervent intérêt de la part des chercheurs, des ingénieurs et des industriels et surtout de la part de ceux qui veulent automatiser la prise de décision dans leur domaine et de construire des systèmes artificiels capables d'effectuer les tâches habituellement prises en charge par les humains [19].

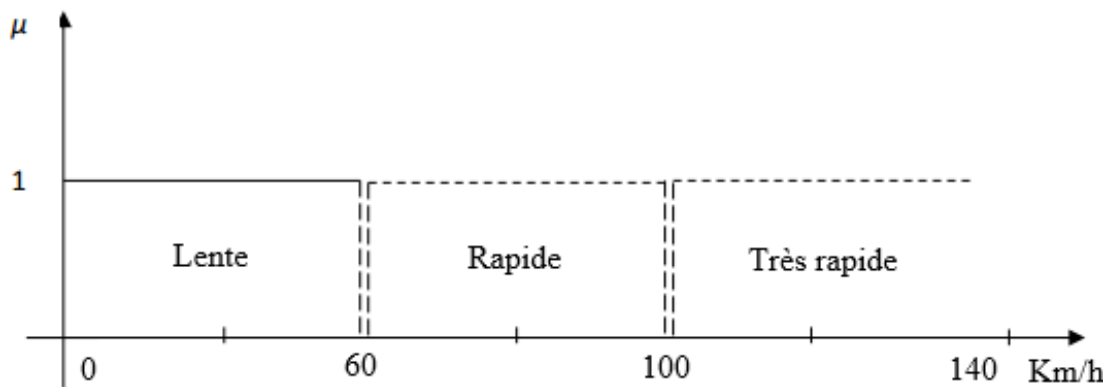


**Figure 2. 1 :** Comparaison des deux méthodes dans la détermination de la couleur.

Dans notre raisonnement, le jugement que nous portons sur une grandeur donnée est imprécis et vague. Voici un exemple expliquant ce concept et montrant l'avantage de la méthode floue par rapport à la méthode classique :

Pour une voiture autonome (voiture sans conducteur), le choix de l'intensité de freinage dépend de la distance exacte séparant le véhicule de l'obstacle et de sa vitesse exacte.

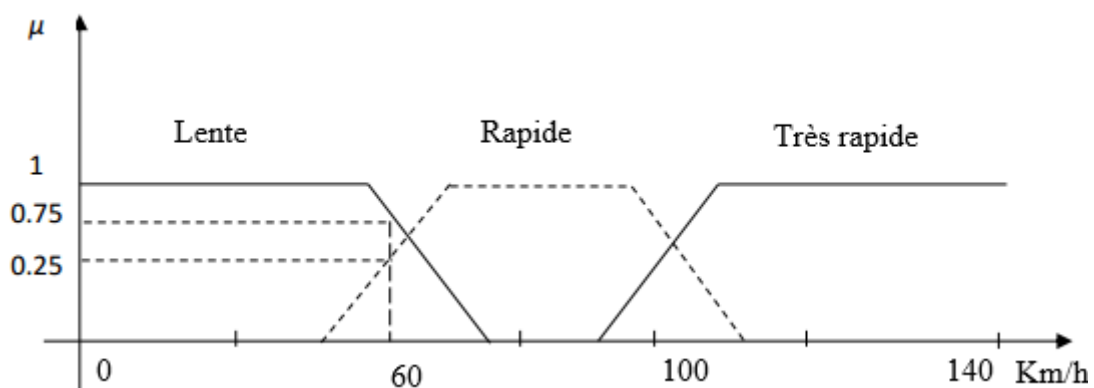
Une logique basée sur des valeurs booléennes (0 et 1) n'est pas recommandable pour cette tâche. En effet, dans ce cas la vitesse est classifiée d'une manière stricte et rigide comme montré dans la figure 2.2. Le choix du degré de freinage dépendra de la vitesse si elle est classée comme lente, rapide ou très rapide. Cependant, suivant ce raisonnement, l'intensité de freinage pour une vitesse de 60Km/h est la même que pour une vitesse de 99Km/h, puisque 60Km/h et 99Km/h appartiennent à la même classe : "rapide". Ce raisonnement s'avère trop risqué pour une telle application vu les dégâts qui peuvent être causés.



**Figure 2. 2 :** Classification de la vitesse d'une voiture suivant la méthode classique.

Par contre, le raisonnement par logique floue est plus adapté à cette tâche, puisqu'il permet d'attribuer un degré de freinage spécifique à chaque valeur de la vitesse, car dans sa classification, le passage entre les formes de vitesse (lente, rapide et très rapide) se fait d'une manière progressive et graduelle et non pas d'une manière brusque, ce qui autorise un élément à appartenir plus ou moins fortement à une classe, rendant la prise de décision plus souple et conduisant par conséquent à des résultats plus précises (figure 2.3).

Contrairement à la méthode classique, 60Km/h et 99Km/h n'appartient pas à la même classe, mais plutôt ; 60Km/h appartient aux deux classes des vitesses "lentes" et "rapides", et 99Km/h appartient aux classes "rapide" et "très rapide". Ainsi la logique floue se rapproche de notre forme de raisonnement.



**Figure 2. 3 :** Classification de la vitesse d'une voiture suivant la logique floue.

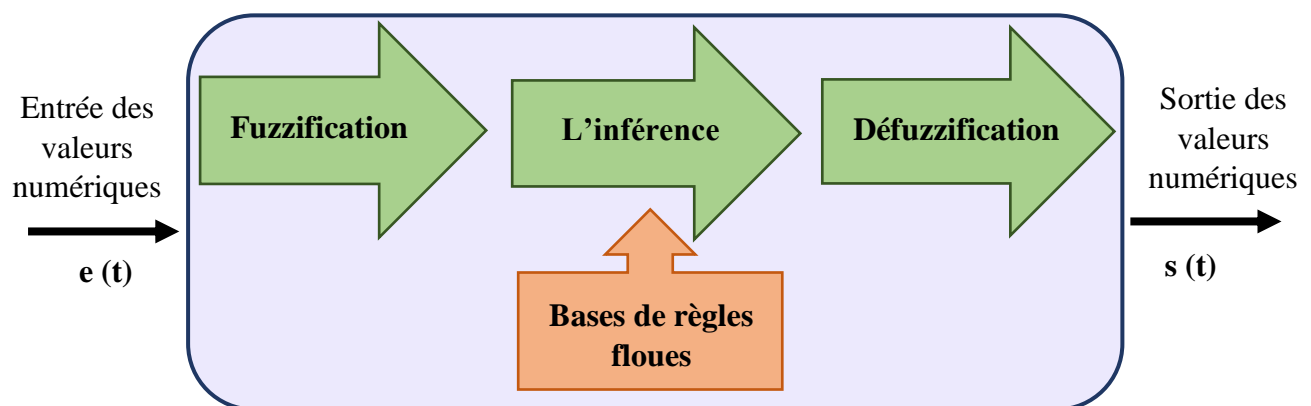
Un des intérêts de la logique floue pour formaliser le raisonnement humain est que les règles sont énoncées en langage naturel : très petit, petit, moyen, grand, très grand... [16]

## 2.4 Principe de la logique floue

Comme nous l'avons déjà expliqué, la complexité de pas mal de systèmes que nous utilisons dans la vie (les moyens de transport, les machines industrielles, les appareils médical... etc.) ne leurs permettent pas une modélisation mathématique, en une fonction de transfert ou en équations d'état. Heureusement, l'une des applications de la logique floue est justement le contrôle des systèmes pour lesquels il n'existe pas de modèle précis.

À partir d'une observation du système, le contrôleur flou reçoit en entrée des grandeurs calculées par rapport à la consigne, tel que la vitesse, la distance, la température ...etc. Afin de faire une description imprécise d'une certaine grandeur, le contrôleur flou doit utiliser des expressions relatives ou floues à savoir : rapide, chaud, petit, très proche, acceptable...etc. Le traitement de l'erreur entre la valeur mesurée et sa valeur de référence ne pouvant se faire en utilisant de telles expressions, une conversion numérique en entrée est donc nécessaire, c'est la première étape du processus d'un contrôleur flou : "la fuzzification". Ensuite, dans la deuxième partie : "l'inférence", les variables floues de l'entrée seront comparées à une table de règles de décisions afin d'attribuer la véracité de chaque variable. Puis, le contrôleur calcul la valeur floue de la commande. Enfin, la valeur linguistique (floue) obtenue est reconvertie en une valeur numérique [17] [21] [22].

Le schéma suivant regroupe les trois étapes du processus utilisé dans un contrôleur flou (figure 2.4).



**Figure 2. 4 :** Processus d'un régulateur flou.

Chaque étape du processus flou sera détaillée par la suite. Mais avant ça, il est nécessaire de définir les paramètres et les expressions utilisées dans le processus flou.



## 2.5 Les bases de la logique floue

### 2.5.1 Univers de discours

L'univers de discours est la plage de valeurs que peut prendre la variable (figure 2.5), Par exemples :

- La taille en cm comprise entre 140 cm et 180 cm.
- Température en degré Celsius entre 10° et 60°.

C'est l'un des premiers pas dans la conception d'une commande par logique floue.

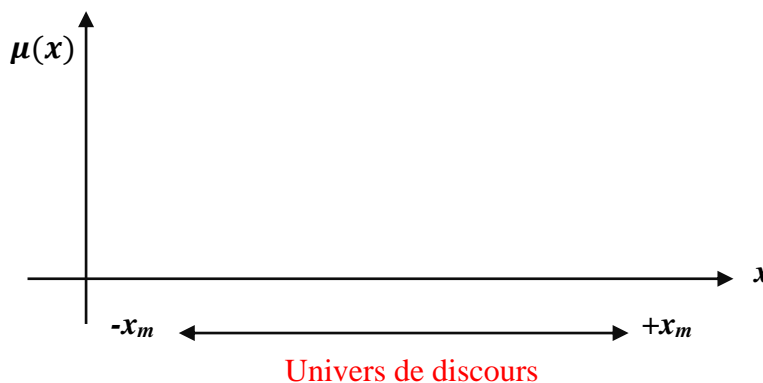


Figure 2. 5 : Représentation de l'univers de discours.

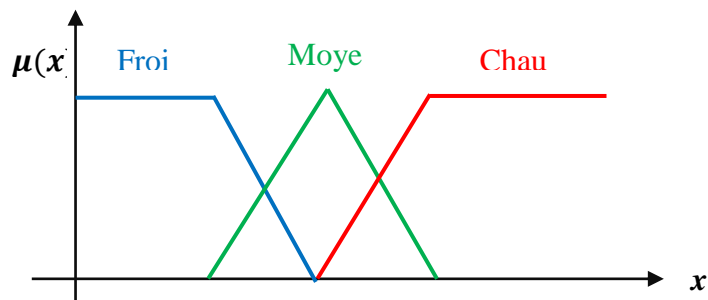
### 2.5.2 Variables et valeurs linguistiques

Une variable linguistique représente un état dans le système à régler ou une variable de réglage dans un contrôleur flou, c'est la variable d'entrée (ex : Température, vitesse, distance, pression...etc.) [18]. La valeur mesurée de cette variable est classée suivant des termes appelés valeurs linguistiques.

Les valeurs linguistiques sont les expressions floues utilisées pour la description d'un phénomène et pour le classement de chaque variable mesurée à une classe déterminée. Elles sont définies par des mots ou des phrases du langage naturel utilisées dans les activités quotidiennes ordinaires (tel que : froid, moyen, chaud, plutôt froid, plutôt chaud).

Un raisonnement flou utilise ces expressions lorsqu'il n'est pas possible ou plus significatif de quantifier numériquement un phénomène ou un état. La qualité de service ou le confort dans un restaurant ne sont pas mesurables par des moyens classiques.

Les valeurs linguistiques sont considérées comme les étiquettes des sous-ensembles flous spécifiés de l'univers du discours. La figure 2.6 montre un exemple de valeurs linguistiques représentées sur un univers de discours.



**Figure 2. 6 :** Représentation des valeurs linguistiques.

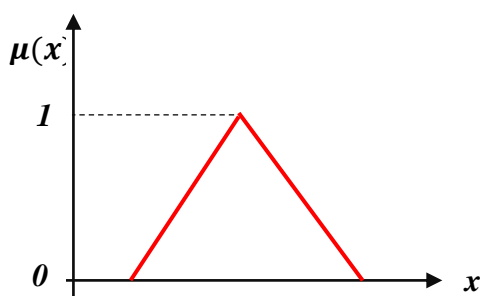
### 2.5.3 Fonction d'appartenance

Les fonctions d'appartenance sont des fonctions mathématiques dont la valeur varie entre 0 et 1. Elles sont utilisées afin de traiter les variables linguistiques numériquement en assignant une valeur (entre 0 et 1) à chaque ensemble flou pour représenter le degré d'appartenance (de véracité) d'une variable à ce dernier, dans le but de traiter des déductions floues par le calculateur.

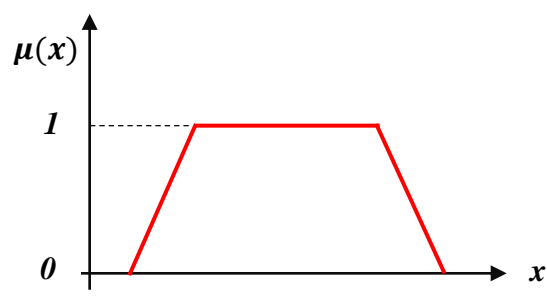
$$\mu(x) \in [0 \ 1]$$

Les fonctions d'appartenance peuvent avoir plusieurs formes différentes, triangulaire, trapézoïdale, gaussienne, sigmoïdale, la forme en cloche, ...etc. [16]. Chaque sous-ensemble flou peut être représenté par sa fonction d'appartenance. Il est à noter que la forme de fonctions d'appartenance dépend de l'application, par exemple les applications qui sont caractérisées par des variations brusques sur une courte durée, une forme triangulaire ou trapézoïdale est la plus convenable [23], d'ailleurs ces derniers sont les formes les plus utilisées car ils sont faciles à programmer.

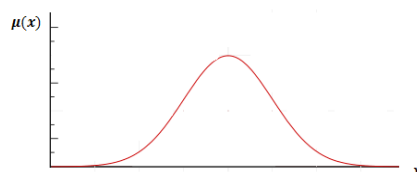
On trouve dans les figures 2.7, 2.8 et 2.9 quelques formes d'onde des fonctions d'appartenance que peut utiliser un régulateur flou.



**Figure 2. 7 :** Forme triangulaire.



**Figure 2. 8 :** Forme trapézoïdale



**Figure 2. 9 :** Forme gaussienne.

### 2.5.4 Les opérateurs de la logique floue

Une machine ou un contrôleur flou reçoit généralement plusieurs entrées à la fois qui ne sont pas traitées individuellement car elles sont dépendantes. Ces variables doivent être alors combinées en utilisant des opérateurs logiques ou mathématiques afin d'en tirer une conclusion.

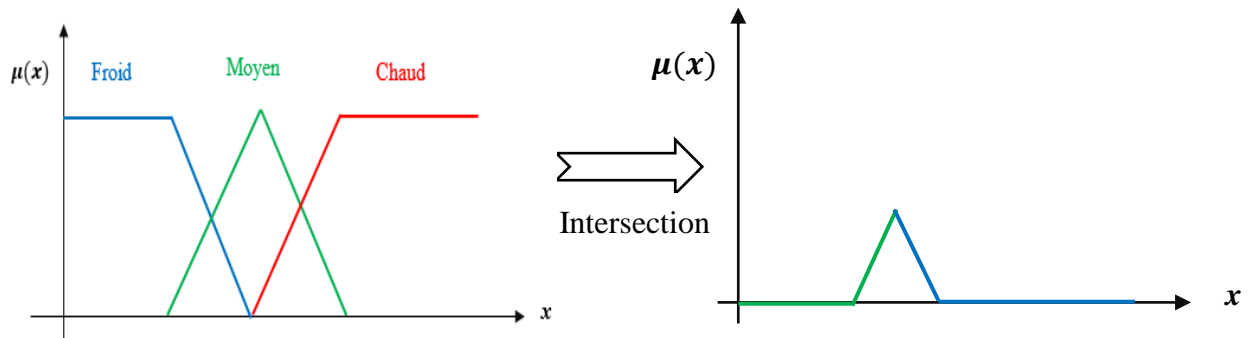
Les opérateurs de la logique floue sont des extensions des opérateurs connus dans la logique classique. Ils sont utilisés pour la combinaison des ensembles et des sous-ensembles flous. Le tableau 2.1 regroupe les expressions les plus couramment utilisées.

Soit A et B deux ensembles flous (ou deux sous-ensembles flous) dans un même univers de discours  $U$ , ayant respectivement comme fonctions d'appartenance :  $\mu_A(x)$  et  $\mu_B(x)$ , avec  $x$  un élément quelconque de l'univers  $U$  :

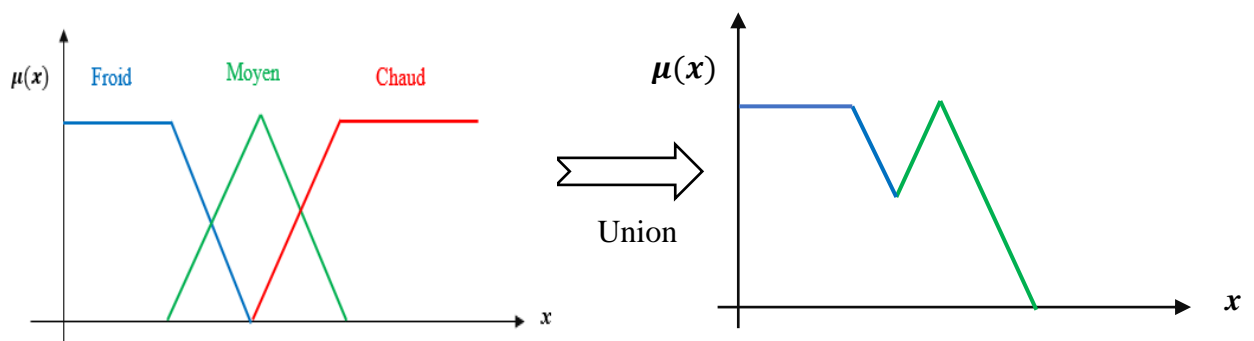
**Tableau 2. 1 :** Les opérateurs flous les plus utilisés.

<p><b>L'égalité :</b> A et B sont dits égaux, si et seulement si :</p>	$\forall x \in U; \mu_A(x) = \mu_B(x)$
<p><b>L'intersection :</b> L'intersection des deux sous-ensembles A et B est le sous-ensemble C, tel que tout éléments <math>x</math> qui appartient à C appartient à la fois à A et à B L'intersection correspond aussi à l'opération ET.</p>	$C = A \cap B \text{ tel que :}$ $\forall x \in U; \mu_C(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$
<p><b>L'union :</b> L'union des deux sous-ensembles A et B est le sous-ensemble C ayant comme fonction d'appartenance égale au max des deux fonctions d'appartenance de A et de B. L'intersection correspond aussi à l'opération OU.</p>	$C = A \cup B \text{ tel que :}$ $\forall x \in U; \mu_C(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x))$
<p><b>La négation (le complément) :</b> Le complément d'un sous-ensemble A est le sous-ensemble <math>\bar{A}</math> contenant tout les éléments <math>x</math> n'appartenant pas à A.</p>	$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$
<p><b>L'inclusion :</b> On dit que A est inclus dans B (<math>A \subset B</math>), si et seulement si :</p>	$\forall x \in U; \mu_A(x) \leq \mu_B(x)$

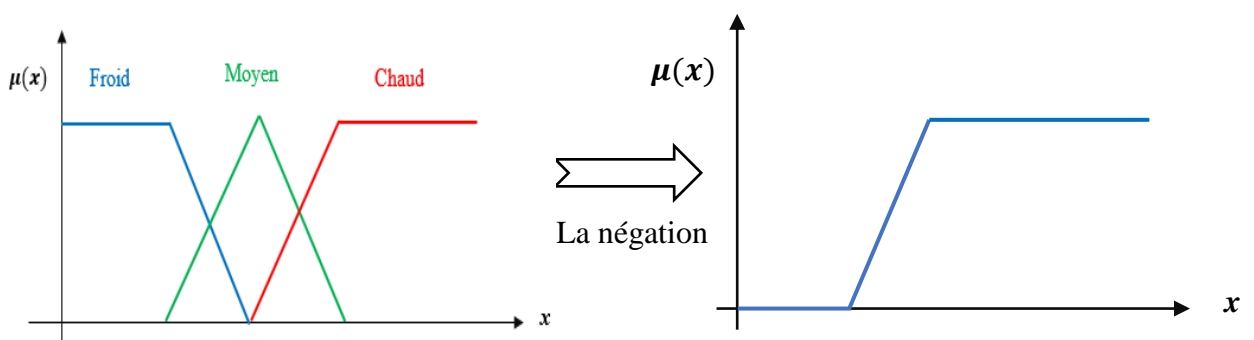
Les figures suivantes (figure 2.10, 2.11 et 2.12) montrent la fonction d'appartenance résultante après l'application de quelques opérateurs flous du tableau précédent.



**Figure 2. 10 :** Utilisation de l'opérateur intersection entre les deux premiers sous-ensembles (froid et moyen).



**Figure 2. 11 :** Utilisation de l'opérateur union entre les deux premiers sous-ensembles (froid et moyen).



**Figure 2. 12 :** La négation du premier sous-ensemble (froid).

### 2.5.5 Propriétés des ensembles flous

Les mêmes propriétés des ensembles classique conviennent également pour les propriétés des ensembles flous. On rappelle quelques propriétés (tableau 2.2) :

**Tableau 2. 2 :** Propriétés des ensembles flous.

<b>Commutativité</b>	$A \cap B = B \cap A$ $A \cup B = B \cup A$
<b>Associativité</b>	$A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap C$ $A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup C$
<b>Distributivité</b>	$A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$ $A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$ $A \cup (A \cap B) = A$
<b>Idempotence</b>	$A \cap A = A$ $A \cup A = A$

### L'implication

L'implication est aussi un opérateur de la logique floue. Il n'a pas été classé dans le tableau précédent (tableau 2.1) car, contrairement à l'implication classique, l'implication floue a connue plusieurs définitions et méthodes pour son utilisation, conduisant tous à des résultats plus ou moins égaux. C'est aussi l'opérateur le plus utilisé dans les tables des règles pour la détermination des conclusions. Le tableau suivant (tableau 2.3) regroupe quelques méthodes de l'implication floue.

**Tableau 2. 3 :** Quelques définitions de l'implication floue.

<b>Appellation</b>	<b>Définition</b>
Zadeh	$\max\{\min[\mu_A(x), \mu_B(y)], 1 - \mu_A(x)\}$
Mamdani	$\min[\mu_A(x), \mu_B(y)]$
Larsen	$\mu_A(x) \cdot \mu_B(y)$
Reichenbach	$1 - \mu_A(x) + \mu_A(x) \cdot \mu_B(y)$
Brower-Gödel	$\begin{cases} 1 & \text{si } \mu_A(x) \leq \mu_B(y) \\ \mu_B(y) & \text{sinon} \end{cases}$

Les méthodes les plus utilisées dans la commande floue sont la méthode de Larsen et la méthode de Mamdani.

## 2.6 Les étapes d'un processus flou

La régulation par un système flou (Fuzzy Logic Controller FLC) se fait suivant trois étapes principales : Fuzzification, Inférence floue, Défuzzification.

### 2.6.1 La Fuzzification

La valeur d'une grandeur mesurée par un capteur, ou l'erreur entre une grandeur et sa consigne, est une valeur numérique. On définit dans un premier temps la plage de variation de cette grandeur, puis le régulateur flou converti cette grandeur en une variable linguistique, en effet, plusieurs valeurs linguistiques peuvent être attribuées à cette variable afin d'augmenter la précision du résultat (En générale, il ne faut pas dépasser sept valeurs linguistiques, car ceci complique la formulation des règles d'inférence sans apporter une amélioration significative) [18].

Le degré d'appartenance aux différentes valeurs linguistiques est représenté par les fonctions d'appartenance ayant les formes vues précédemment.

Cette étape s'appelle la fuzzification, elle est généralement introduite par un expert ou par apprentissage supervisé ou non. La figure 2.13 présente un exemple de fuzzification de la valeur de la pression d'une chaudière mesurée par un capteur.

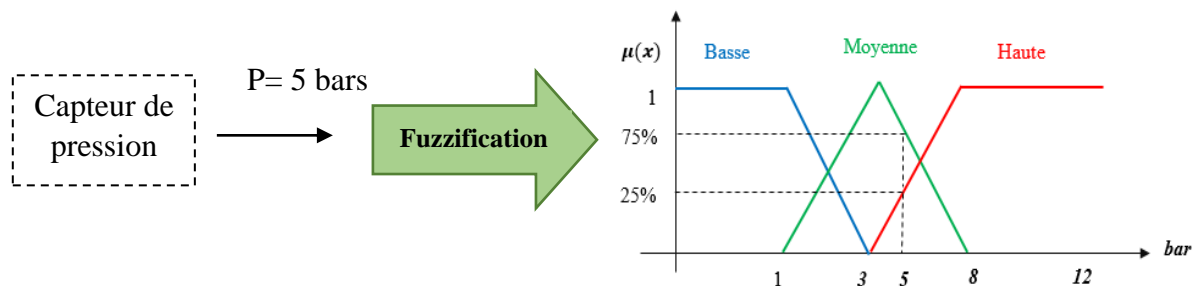


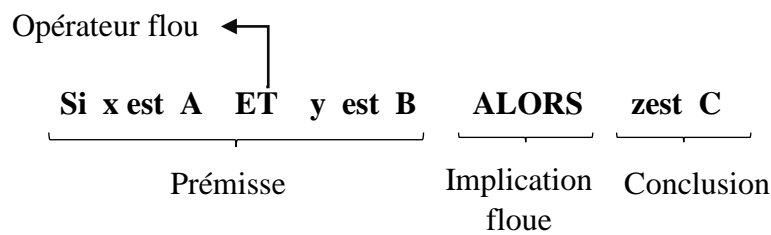
Figure 2. 13 : Exemple de fuzzification.

La valeur  $P = 5\text{bar}$  correspond à une pression qui est considérée comme plutôt moyenne (75%) et un peu haute (25%). La valeur numérique a été donc transformée en une variable linguistique.

### 2.6.2 L'inférence floue

Après l'étape de fuzzification vient l'étape où les variables linguistiques vont être soumises à des règles de décision. Cette étape est considérée comme le noyau d'un contrôleur flou (appelée également moteur d'inférence). Ce moteur est capable de simuler le raisonnement de l'être humain en se basant sur les règles d'inférence. Ces dernières peuvent être déduites par l'expertise de la personne, du savoir-faire de l'ingénieur en régulation et contrôle, ou par des résultats préalablement acquis avec les régulateurs classiques tel que le PI et le PID. Ils peuvent être également déduits par l'apprentissage [24] [25].

Une règle est composée d'une prémisse (qui contient un ou plusieurs opérateurs flous), une implication floue et une conclusion (figure 2.14).



**Figure 2. 14 :** Composition d'une règle de d'inférence.

Les règles sont ensuite groupées dans un tableau, donnant naissance à une table de décision (matrice de décision), où chaque règle se voit attribuer une réponse. Tel a été évoqué précédemment, plus on ajoute de règles plus le résultat sera précis et proche du raisonnement humain.

Exemple d'une table de décision :

- Reg 1 : Si  $x$  est A alors  $y$  est B
- Reg 2 : Si  $x$  est A et  $z$  est C alors  $y$  est T
- Reg 2 : Si  $x$  est A ou  $z$  est C alors  $y$  est B

Il est intéressant de rappeler que la méthode utilisée pour la réalisation de l'implication donne lieu à des contrôleurs flous différents.

Plusieurs règles peuvent être activées simultanément donnant des conclusions de degrés de vérité différents éventuellement contradictoires (Une règle est activée dès qu'elle a une prémisse ayant une valeur de vérité non nulle) [26].

Pour cela, les règles activées sont toutes regroupées en utilisant l'opérateur logique OU, qui se traduit par le Max en logique floue (équation 2.1), afin d'en déduire une action de commande floue. Cette dernière étape de l'inférence floue s'appelle l'agrégation des règles. Chaque conclusion donne un avis sur la valeur à attribuer au signal de commande, ainsi, le poids de chaque avis dépend du degré de véracité de la conclusion.

$$\mu_A(y) = \max(\mu_{A1}(y), \mu_{A2}(y), \dots, \mu_n(y)) \quad 2.1$$

### 2.6.3 La Défuzzification

La dernière étape du processus flou est l'étape de défuzzification. Elle consiste à transformer les résultats linguistiques obtenus par l'agrégation des règles obtenus par inférence, en une grandeur de commande réelle.

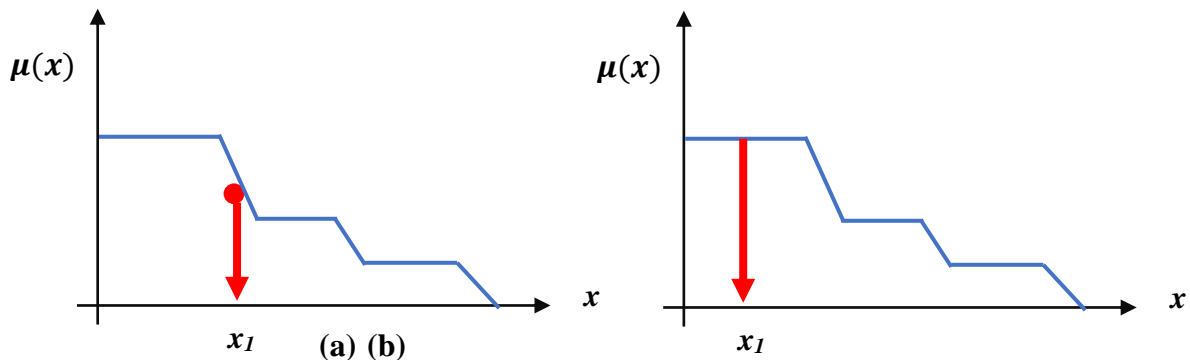
Cette transformation peut être effectuée par différentes stratégies, on cite :

- La moyenne de maximum (MOM),

- La méthode du centre de gravité (COG),
- La moyenne pondérée (WAM),
- Le centre des aires.

La méthode du centre de gravité et la méthode de la moyenne de maximum sont les méthodes les plus utilisées.

La figure 2.14 montre l'utilisation de ces deux méthodes dans l'étape de défuzzification.



**Figure 2. 15 :** (a) : Méthode du centre de gravité, (b) : méthode de la moyenne de maximum.

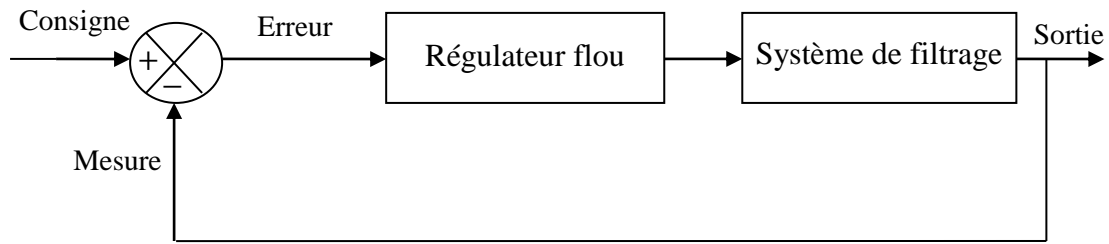
## 2.7 Applications de la logique floue

La théorie des sous-ensembles flous a de nombreuses applications en industrie ou autres, là où les outils mathématiques stricts ne subviennent pas aux besoins de robustesse et de prise de décision, elles sont scindées en trois catégories [27] :

- **Le raisonnement incertain** : utilisé dans la configuration des systèmes qui doivent s'adapter à la demande des clients, ou dans des systèmes de diagnostic médical ... etc.
- **La robotique** : utilisée pour aider à la prise de décision et l'interaction dans un environnement insuffisamment déterminé et interprétation des instructions linguistiques données par un utilisateur.
- **La commande floue** : dans cette application les progrès sont les plus spectaculaires en industrie (lave-linge, caméscope, chauffage ...etc). On vise l'atteinte des meilleures performances de robustesse en introduisant les bases de connaissances d'un expert à travers des variables linguistiques soumises à certaines règles, une approche souvent appelée commande intelligente qui s'adapte mieux avec le système à réguler ou à contrôler.

Dans notre travail, nous allons exploiter la logique floue pour l'amélioration de la qualité de filtrage du réseau électrique en remplaçant le régulateur PI classique de la tension continue qui alimente l'onduleur, par un régulateur flou, (Figure 2.16), qui sera détaillé dans le chapitre suivant.





**Figure 2. 16 :** Boucle de régulation floue.

## 2.8 Conclusion

La majorité des techniques de commande classiques reposent sur la connaissance du modèle mathématique du système à contrôler ou à réguler qui est parfois trop complexe ou non linéaire. Toujours à la recherche de moyens plus optimistes pour l'industrie, la logique floue introduite en littérature technique par Zadeh en 1965, a occupé une place privilégiée dans la commande et contrôle des systèmes sans trop avoir besoin de les connaître en détail. Ce chapitre a mis l'accent essentiellement sur le principe, les outils et les différentes étapes de cette approche, servant à synthétiser un régulateur flou dans l'ambition d'atteindre de meilleures performances de filtrage des harmoniques.

---

**Troisième Chapitre :**  
**Commande d'un filtre actif**  
**parallèle par logique floue**

---

### 3.1 Introduction

Les domaines d'application de la logique floue sont nombreux allant des jeux vidéo aux pilotes automatiques. En industrie on l'utilise surtout pour la commande et la régulation des différentes machines. Nous allons l'utiliser dans cette étude pour maintenir constante la tension continue aux bornes du condensateur qui alimente l'onduleur du filtre actif parallèle. La régulation classique et la régulation floue ont le même but qui est la gestion d'un processus selon une consigne désirée par action sur des grandeurs physiques, la différence réside dans le fait que la régulation classique adopte un modèle mathématique du système, mais la régulation floue modélise l'imperfection des données en se rapprochant dans une certaine mesure au raisonnement humain [21] [28].

Dans ce chapitre nous allons utiliser la logique floue pour concevoir un régulateur de tension continue, nous abordons d'abord le principe d'un régulateur PI ensuite les différentes étapes à suivre pour traduire ce principe en règles qui déterminent la matrice de décision du régulateur, enfin, nous verrons les résultats de filtrage avec une telle régulation et nous comparerons avec celle d'un régulateur classique.

### 3.2 Utilisation de la logique floue dans un Filtre actif parallèle

Dans un filtre actif parallèle la logique floue a deux applications, la première consiste à remplacer la commande hystérésis/MLI classique par une commande hystérésis/MLI floue, et la seconde application c'est le remplacement du régulateur classique PI de la tension continue par un régulateur à logique floue afin d'améliorer les performances du filtre. C'est cette dernière qui est le sujet de ce chapitre [13].

### 3.3 Principe d'un régulateur PI

On va prendre l'exemple d'un réflexe humain pour une régulation PI manuelle de la vitesse d'une voiture à 120 Km/h sur une autoroute, l'acte de régulation est intuitif, on accélère si on est en dessous de la vitesse voulue, on lâche l'accélérateur si on en est en dessus (action proportionnelle à l'erreur), et on essaye de rester autour de 120Km/h avec le plus de précision possible (action proportionnelle à la somme des erreurs).

L'action proportionnelle est un gain proportionnel à l'erreur commise, c'est-à-dire proportionnel à la différence entre la valeur voulue et la valeur réelle, le régulateur proportionnel seulement, a une commande qui s'écrit [29] :

$$\text{Commande} = K_p \times \text{erreur} \quad 3.1$$

Avec  $K_p$  le coefficient de proportionnalité de l'erreur, on le règle généralement expérimentalement (après plusieurs essais).

L'action intégrale est un gain proportionnel à la somme des erreurs ou encore à l'intégrale des erreurs commise au cours du temps.

On définit la commande d'un PI alors comme la combinaison linéaire de l'erreur et de la somme des erreurs du système, et elle s'écrit [29] :

$$\text{Commande} = K_p \times \text{erreur} + K_i \times \int \text{erreurs} \quad 3.2$$

Avec  $K_i$  le coefficient de proportionnalité de la somme des erreurs, et dans le cas d'un régulateur classique il est réglable manuellement.

On obtient alors un asservissement avec une erreur statique finale nulle. On peut écrire aussi cette formulation du régulateur PI en fonction de la variation de la commande [29] :

$$\text{Variation\_commande} = K_p \times \text{variation\_erreur} + K_i \times \text{erreur} \quad 3.3$$

Afin de faciliter l'écriture de la loi de commande de ce régulateur et sa variation, dont nous aurons besoin dans les parties suivantes, nous allons adopter les notations suivantes :

- $u(t)$  : la commande à l'instant  $t$
- $\Delta u$  : la variation de la commande [ $u(t) - u(t - 1)$ ]
- $c$  : est le signal de référence à suivre, il est aussi dit "consigne"
- $y$  : est la réponse du système à la référence donnée.
- $e(t)$  : l'erreur à l'instant  $t$ , [ $e = c - y$ ]
- $\Delta e$  : la variation de l'erreur, [ $e(t) - e(t - 1)$ ]

On réécrit 3.3 avec ces notations :

$$\Delta u = u(t) - u(t - 1) = K_p \times \Delta e + K_i \times e$$

On peut alors écrire la formule de la commande du régulateur PI en fonction de la variation de commande qui est écrite de son tour en fonction de l'erreur et de la variation d'erreur (3.3) :

$$u(t) = u(t - 1) + \Delta u \quad 3.4$$

### 3.4 Régulateur flou de la tension continue $V_{dc}$

Un contrôleur flou s'avère très intéressant pour un système complexe ou non linéaire comme dans notre cas. Dans cette partie, nous remplaçons le régulateur classique dans la boucle de contrôle de la tension  $V_{dc}$  par un régulateur flou (figure 3.1). L'objectif de l'utilisation du régulateur flou est d'atteindre de meilleurs résultats en comparaison avec les régulateurs classiques et améliorer la réponse du système en temps de réponse, en dépassement, et diminuer encore plus les ondulations de la tension  $V_{dc}$  [6][24][30].

La présentation la plus adoptée d'un régulateur flou se scinde en trois parties déjà détaillées dans le chapitre précédent : la fuzzification qui permet de passer des variables réelles aux variables floues, l'inférence qui est le cœur du régulateur et représenté par les règles reliant les entrées et les sorties, et enfin la défuzzification qui permet de déterminer la valeur réelle de sortie à partir des ensembles flous d'entrée [15].

La figure 3.1 suivante résume le processus d'un régulateur flou [26] :

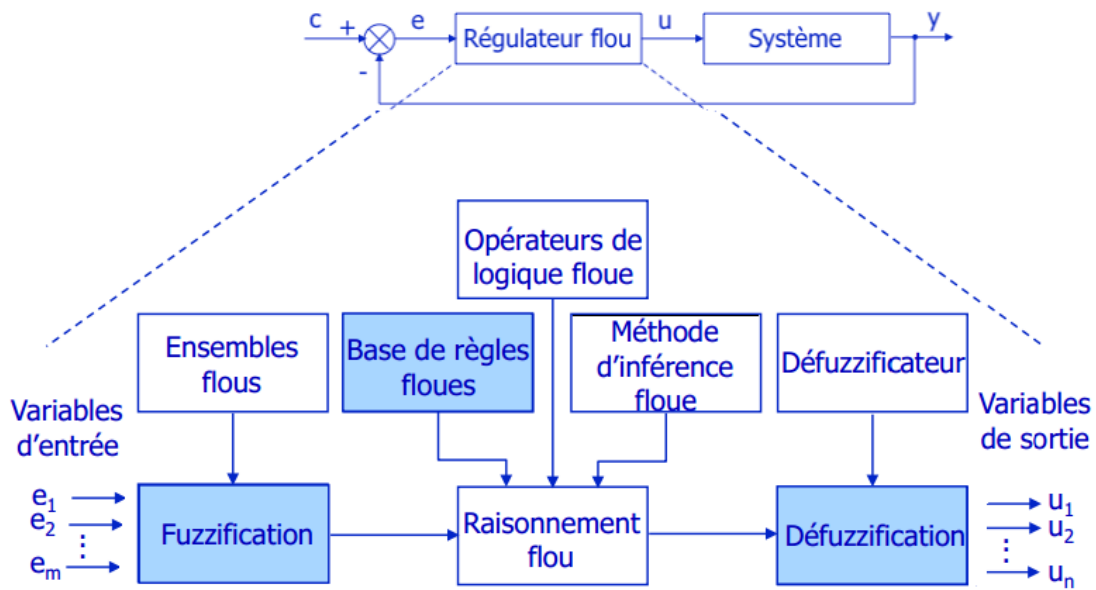


Figure 3. 1 : Processus d'un régulateur flou [IA].

### 3.4.1 Synthèse du régulateur floue

D'après l'équation 3.4, on voit bien que tout ce que l'on a à faire c'est trouver la commande à appliquer à chaque instant en fonction de l'erreur et de sa variation. On ne va pas donc se soucier des valeurs de  $K_p$  et  $K_i$  car ils seront déterminés automatiquement avec le réglage de certaines grandeurs dites gains d'entrées et gain de sortie.

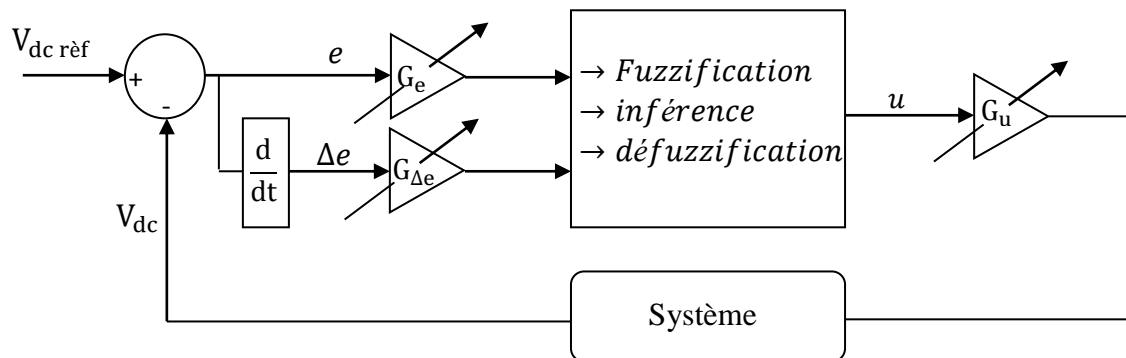


Figure 3. 2 : Schéma du principe de régulation floue.

#### 3.4.1.1 Fuzzification

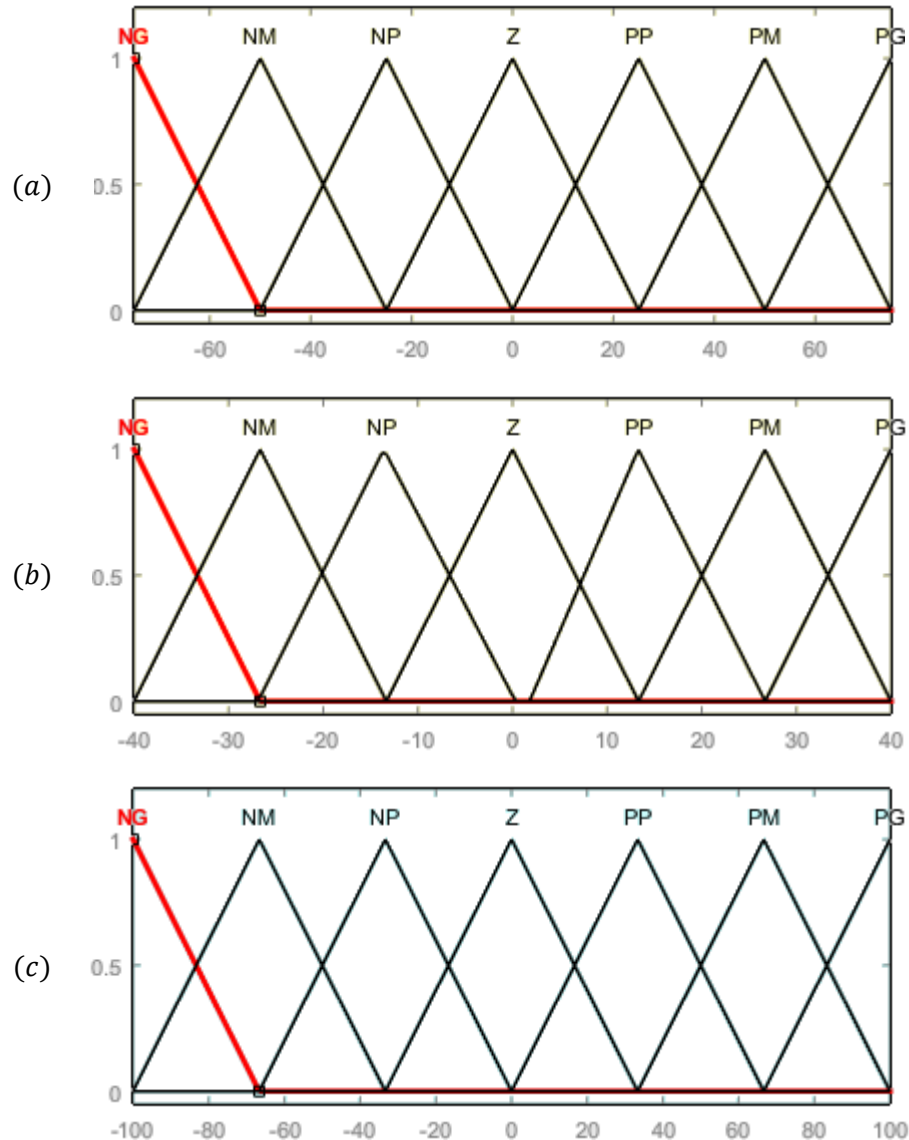
Dans cette étape nous allons représenter les variables d'entrée et de sortie qui sont, l'erreur ( $e$ ), la variation d'erreur ( $\Delta e$ ), et la commande ( $u$ ), par des variables linguistiques ou encore des variables floues, tout en définissant leurs fonctions d'appartenance. Chacune de ces variables est définie dans un intervalle souvent borné appelé univers de discours [24], et sera représentée par sept variables linguistiques qu'on va caractériser par les symboles suivants :

NG : Négatif Grand  
 NM : Négatif Moyen  
 NP : Négatif Petit

ZE : Zéro Environ

PP : Positif Petit  
 PM : Positif Moyenne  
 PG : Positif Grand

Ainsi la figure suivante représente la fonction d'appartenance de chacune des variables :



**Figure 3.3 :** les fonctions d'appartenance : (a) de la variable d'entrée  $e$ , (b) de la variable d'entrée  $\Delta e$ , (c) de la variable de sortie  $u$ .

L'univers de discours de chaque variable d'entrée ou de sortie, ainsi que les gains placés avant et après le régulateur flou, sont choisis à partir de plusieurs essais. Ils doivent être déterminés d'une manière à garantir à la fois la rapidité en régime transitoire, et la meilleure précision en régime permanent.

En effet, un surdimensionnement du gain de sortie provoque des harmoniques supplémentaires dans le signal filtré, car l'onduleur de tension se trouve alimenté par une tension fortement fluctuante. Et un sous-dimensionnement des gains d'entrée ou de l'univers

de discours provoque un retard de compensation puisque les règles d'inférence se trouvent non activées si les valeurs des entrées sont en dehors de l'univers de discours défini.

En agissant sur le premier gain du système on change de stabilité, et en agissant sur le deuxième gain du système on change de précision.

### 3.4.1.2 Règles d'inférence

Dans cette étape, nos variables linguistiques vont être soumises à certaines règles qui simulent un raisonnement humain et permettent d'avoir une table de décisions, un type de règle peut être par exemple :

**Si** "e" est NG      **Et** "Δe" est ZE      **Alors** "u" est NM

Dans notre cas nous avons utilisé l'implication floue « Alors » définie par Mamdani comme suit :

$$\min[\mu_e(x), \mu_{\Delta e}(y)]$$

Comme on a deux variables à l'entrée et chacune a sept variables linguistiques, il y aura donc au maximum  $7^2 = 49$  règles d'inférence, représentés tous dans la table suivante :

**Tableau 3. 1** : La matrice des règles d'inférences.

$\begin{matrix} e \\ \Delta e \end{matrix}$	NG	NM	NP	ZE	PP	PM	PG
NG	NG	NG	NG	NG	NM	NP	ZE
NM	NG	NM	NM	NM	NP	ZE	PP
NP	NG	NM	NP	NP	ZE	PP	PP
ZE	NG	NM	NP	ZE	PP	PM	PG
PP	NP	NP	ZE	PP	PP	PM	PG
PM	NP	ZE	PP	PM	PM	PM	PG
PG	ZE	PP	PM	PG	PG	PG	PG

#### - L'agrégation

Puisque plusieurs règles d'inférences peuvent être activées simultanément donnant des conclusions de degrés de vérité différents (différents pourcentages de  $u$ ), il va falloir regrouper ces conclusions avant l'étape de transformation en valeur numérique, pour que chacune participe avec son poids dans le résultat final de la sortie.

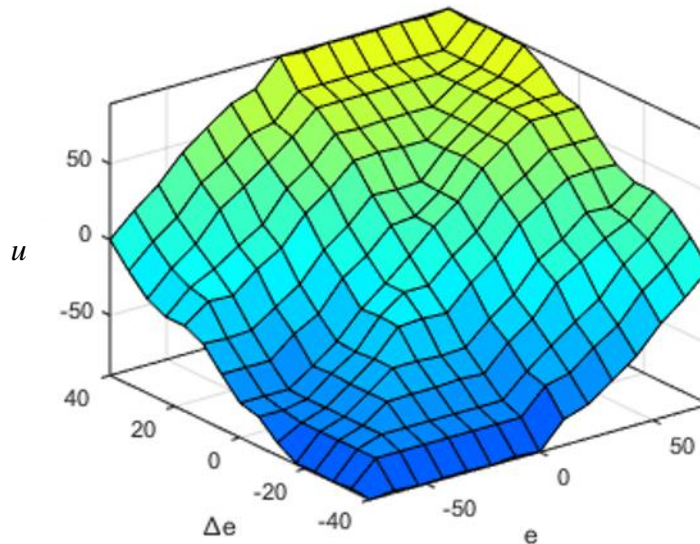
L'agrégation dans ce cas se fait par l'opérateur logique « OU » qui est traduit à un « MAX » en logique floue, le résultat est donc le max des fonctions d'appartenances de  $u$  obtenu par toute des règles actives en même temps.

### 3.4.1.3 La défuzzification

Après l'étape d'agrégation, chaque règle est représentée par une courbe d'activation finale, la valeur numérique finale de la variable de sortie peut être déterminée ainsi par plusieurs

méthodes citées dans le chapitre précédent, la plus utilisée et la plus convenable pour notre application est celle du centre de gravité (COG) de la forme obtenue par la courbe d'activation finale.

En appliquant la méthode de centre de gravité, nous avons obtenu le graphe suivant (Figure 3.4), cette surface exprime la commande en fonction des variables d'entrée (erreur et variation d'erreur).



**Figure 3.4** : Tracé de la surface de la variable de sortie en fonction des variables d'entrée.

### 3.5 Résultats de Simulations

Les performances d'un filtre actif parallèle dépendent certainement des paramètres du système, mais aussi du type de commande et de régulation mises en œuvre, nous avons effectué différents essais pour voir l'influence d'un PI flou sur les résultats de filtrage et de régulation, avec différentes charges ou différentes valeurs de références.

Le schéma des composants du filtre actif parallèle simulé sur Simulink est représenté dans la figure 3.5. Le bloc de du régulateur flou est représenté dans la figure 3.6.



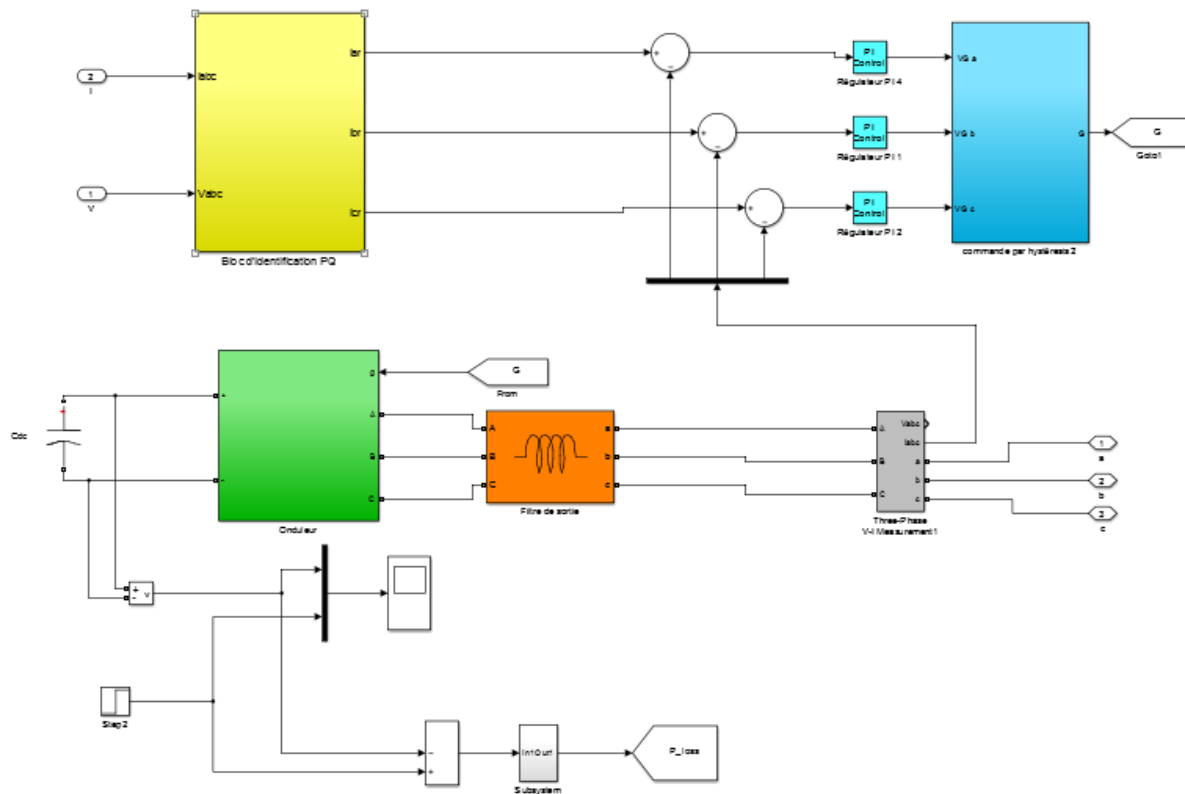


Figure 3. 5 : Implantation du filtre actif parallèle avec sa commande sous Simulink/Matlab.

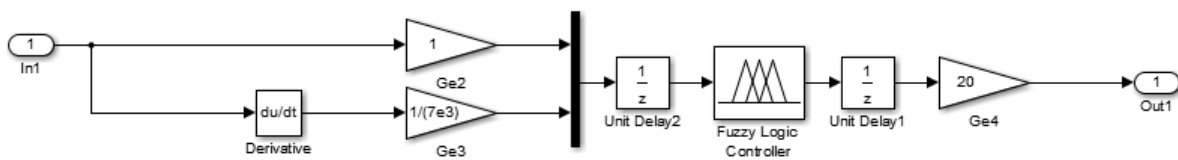
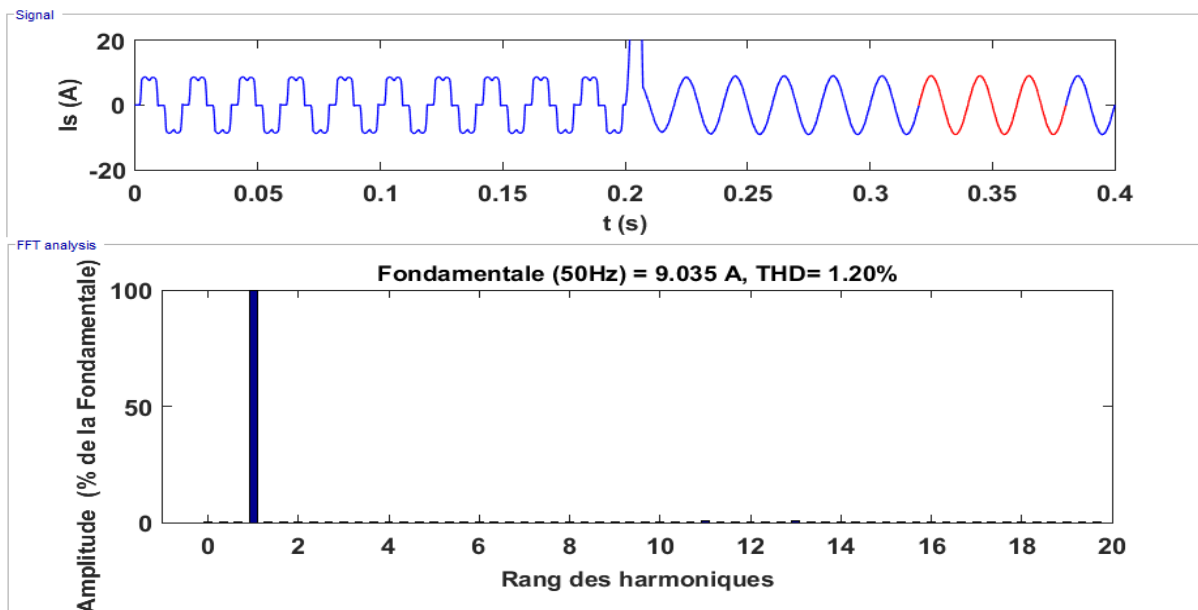


Figure 3. 6 : Schéma du régulateur flou sous Simulink.

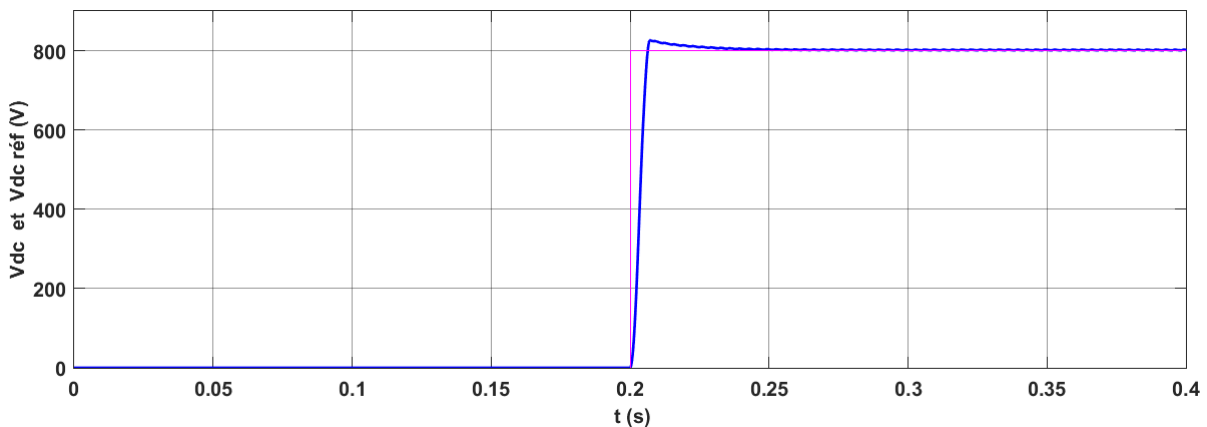
### 3.5.1 Redresseur à diode

Dans l'essai avec le redresseur à diodes nous allons tester deux cas, une fois avec une charge RL à la sortie du pont, et une fois avec une charge RC.

- Charges RL (avec  $R=60$  et  $L=20\text{mH}$ )



**Figure 3. 7 :** Représentations temporelle et spectrale du signal de courant appelé par une charge RL avant et après filtrage.



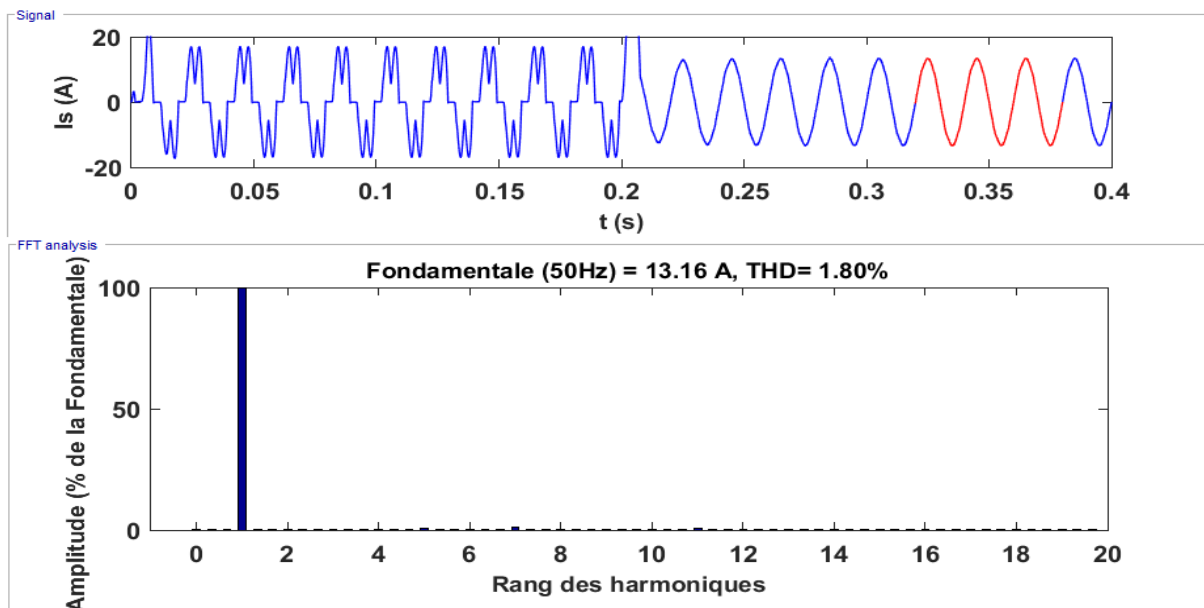
**Figure 3. 8 :** Régulation de la tension continue à une référence de 800V.

La figure 3.7 représente le résultat de simulation du filtre actif parallèle dont la  $V_{dc}$  est régulé par logique floue. De 0s à 0.2s la charge absorbe un courant distordu de THD 26.22%, à l'instant 0.2s on injecte le courant du filtre, après une petite phase transitoire le courant devient sinusoïdal avec un THD de 1.20%. On remarque que le THD obtenue avec régulation floue est meilleur que celui obtenu par régulation PI classique qui était de 2.75%.

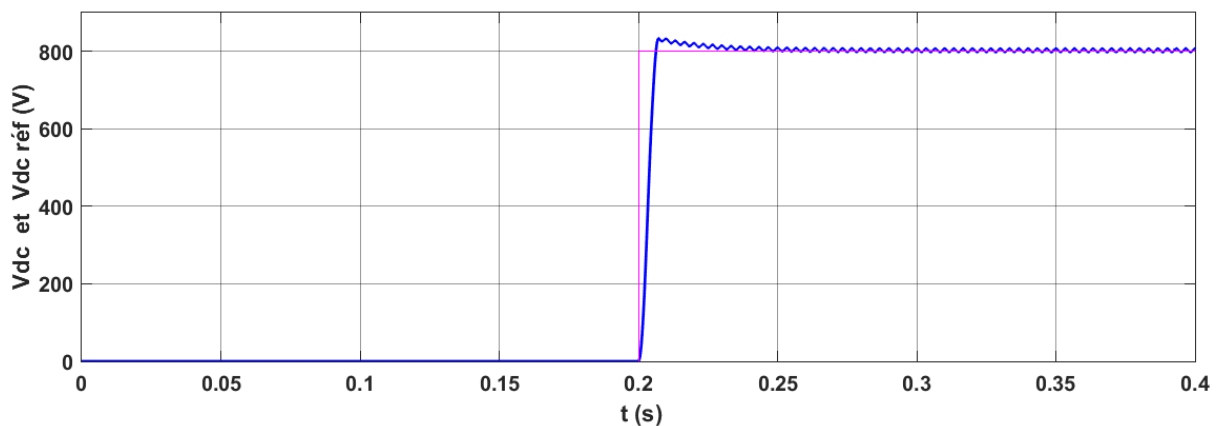
La figure 3.8 représente le développement de la tension  $V_{dc}$  dès la mise en marche du filtre à l'instant 0s. On remarque que le temps de réponse a beaucoup diminué par rapport à celui de la régulation PI classique, avec un dépassement très faible.

- Charges RC (avec  $R=20\Omega$  et  $C=100\mu\text{Fa}$ )

Nous avons remplacé la charge RL par une RC, le résultat de filtrage est le suivant :



**Figure 3. 9 :** Représentations temporelle et spectrale du signal de courant appelé par une charge RC avant et après filtrage.



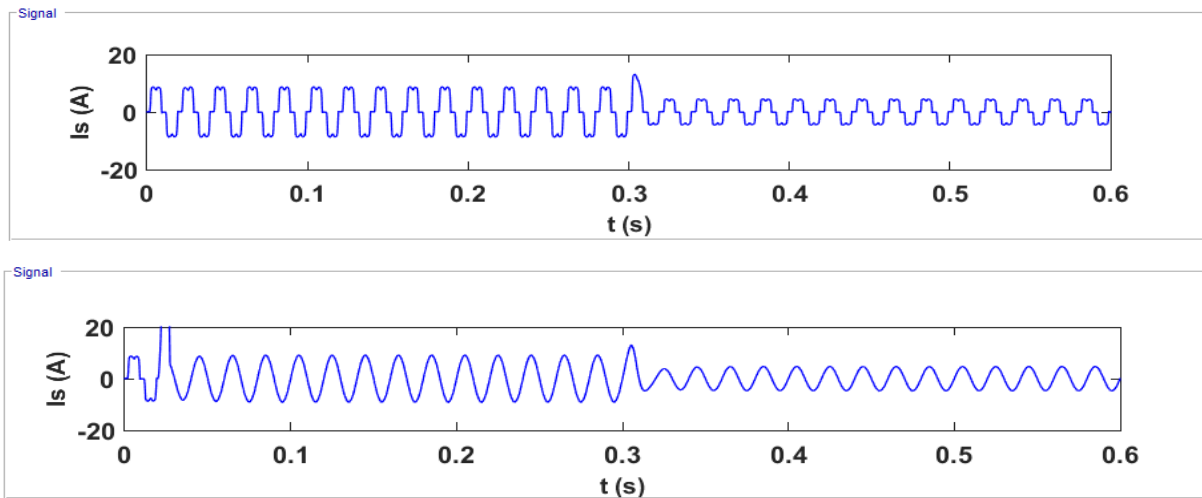
**Figure 3. 10 :** Régulation de la tension continue à une référence de 800V.

Dans la figure 3.9 la charge RC absorbe un courant distordu qui contient des harmoniques un peu différents de ceux de la RL, une fois on met le filtre en marche à l'instant 0.2s, le courant est filtré après une petite phase transitoire, le THD a diminué de 42.43% jusqu'à 1.80%, un résultat meilleur que celui donné dans le cas d'un régulateur classique qui était de 2.63%.

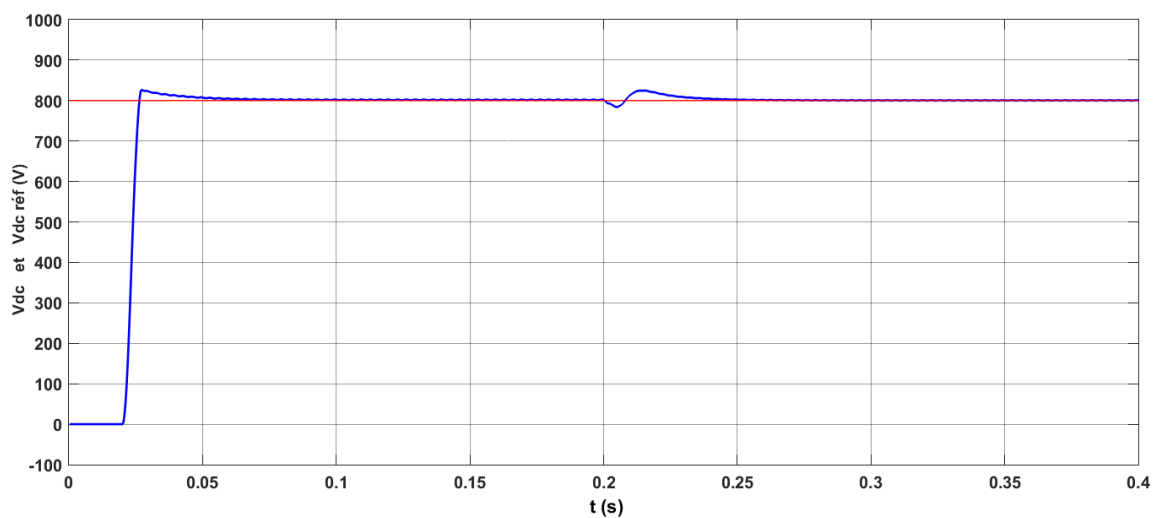
La figure 3.10 représente le développement de la tension continue. Le temps de réponse et le dépassement sont aussi meilleurs que ceux donnés par un régulateur classique.

### 3.5.2 Variation brusque de la charge

Dans cet essai nous avons varié la charge brusquement à l'instant 0.03s de  $R_1 = 60\Omega$  et  $L_1 = 20\text{mH}$  à  $R_2 = 120\Omega$  et  $L_2 = 10\text{mH}$  :



**Figure 3. 11 :** Courant absorbé avant et après filtrage lors de la variation d'une charge.

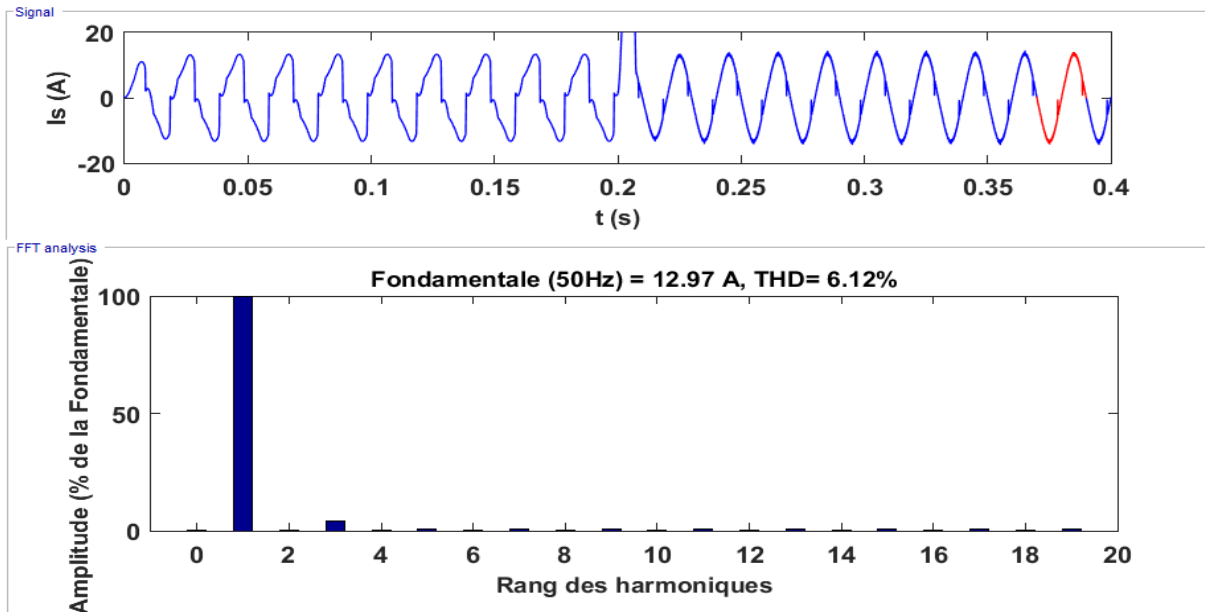


**Figure 3. 12 :** Régulation de la tension stockage à 800 V lors d'une variation de la charge.

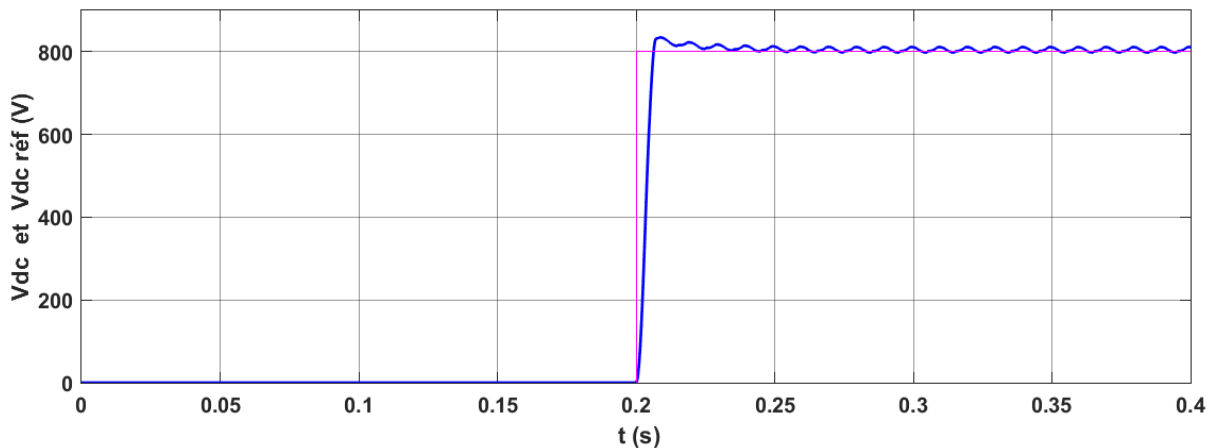
Dans la figure 3.11 on remarque que le filtre s'adapte avec les nouvelles valeurs et redonne l'allure sinusoïdale au courant absorbé.

Dans la figure 3.12 on remarque que la tension  $V_{dc}$  rejoint rapidement sa référence après la mise en marche du filtre d'environ 0.03s, la charge a varié à l'instant 0.2s, le régulateur flou a réussi de s'en adapter après une petite phase transitoire rapide d'environ 0.03s.

### 3.5.3 Charge déséquilibrée



**Figure 3. 13 :** Représentations temporelle et spectrale du signal de courant appelé par une charge déséquilibrée avant et après filtrage.



**Figure 3. 14 :** Régulation de la tension continue à une référence de 800V.

Dans le cas d'une charge déséquilibrée on remarque que le filtre a encore réussi de s'adapter tout en diminuant le THD de 30.03% à 6.12%. Le nouveau THD est toujours dans les normes, mais il est relativement grand, car une charge déséquilibrée fait appel à des harmoniques d'ordre 3 (harmoniques homopolaires) qui sont sensés circuler dans un quatrième fil neutre qui n'est pas pris en compte dans la méthode d'identification utilisée. On remarque d'ailleurs un petit pourcentage de leur existence dans l'analyse spectrale du signal filtré de la figure 3.13 et leur absence totale dans l'analyse spectrale des charges équilibrées vus précédemment. La présence d'un régulateur flou a marqué une nette amélioration dans la réponse de régulation de  $V_{dc}$  dans la figure 3.14, la  $V_{dc}$  rejoint sa référence presque

instantanément, ce qui garantit la continuité de l'alimentation de l'onduleur, mais la différence en THD par rapport à celle du PI classique (de 6.22% à 6.12%) est faible.

### 3.5.4 Charge à thyristor

Dans les deux essais qui suivent nous allons tester l'adaptation du FAP commandé par logique floue à l'augmentation de l'angle d'amorçage des thyristors ( $10^\circ$  et  $30^\circ$ ).

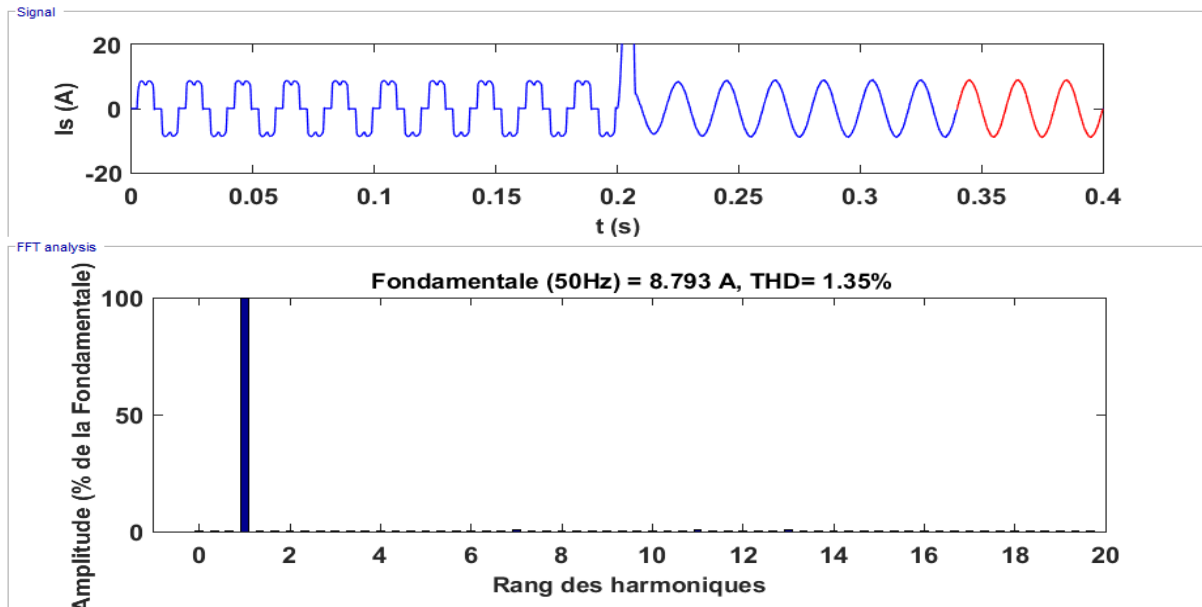


Figure 3.15 : Résultat d'essai à angle d'amorçage de  $10^\circ$  (avec  $R=60 \Omega$  et  $L= 20\text{mH}$ ).

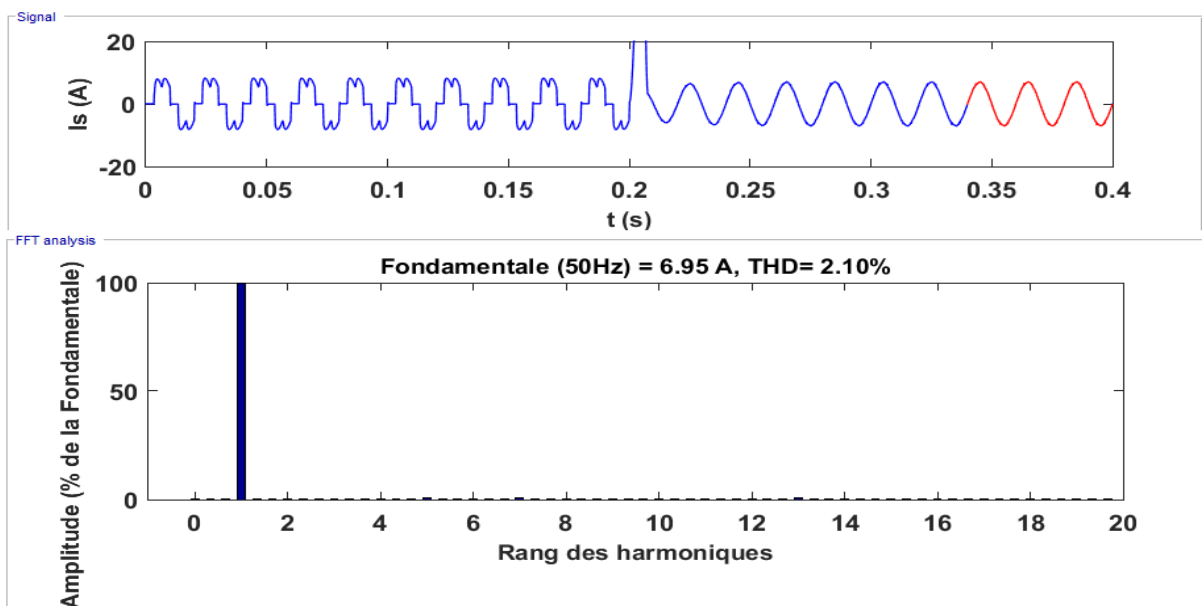


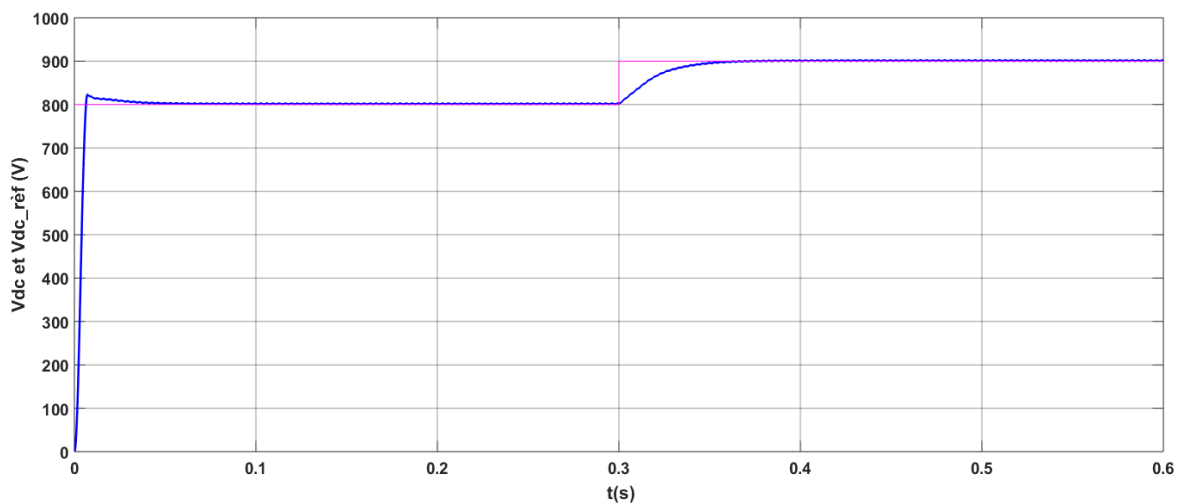
Figure 3.16 : Résultat d'essai à angle d'amorçage de  $30^\circ$  (avec  $R=60 \Omega$  et  $L= 20\text{mH}$ ).

A un angle d'amorçage nul, le comportement du filtre avec un pont redresseur à thyristor est le même qu'avec le pont redresseur à diode. Plus on augmente l'angle d'amorçage le signal est plus distordu et son THD augmente.

Dans la figure 3.15, l'angle d'amorçage est de  $10^\circ$ , le FAP commandé par logique floue a pu diminuer le THD de 28.6% à 1.35%. Le résultat est meilleur que celui obtenue par un FAP commandé par un PI classique qui était de 3.42%.

La figure 3.16 représente le résultat d'essai avec un angle d'amorçage de  $30^\circ$ , Le FAP a filtré les harmoniques et a diminué le THD de 32.15% à 2.10%, un résultat meilleur que celui obtenue par un FAP commandé classiquement (4.28%).

### 3.5.5 Variation de $V_{dc-ref}$ :



**Figure 3. 17 :** Variation de la tension de référence de 800V à 900V.

La figure 3.17 représente le résultat de test de robustesse du régulateur floue, quel que soit la valeur de référence donnée,  $V_{dc}$  la rejoint rapidement et précisément. Le dépassement à beaucoup diminué et le temps de réponse s'est rétréci par rapport à ceux de régulation avec PI classique testés.

## 3.6 Comparaison des résultats

Le tableau 3.2 regroupe les valeurs de THD trouvées par un régulateur PI et par un régulateur flou pour toutes les charges essayées. On voit clairement l'amélioration du THD en utilisant le régulateur flou. Pour la charge déséquilibrée, on remarque que le THD n'a pas été vraiment amélioré, car comme déjà expliqué, c'est à cause des harmoniques de rang trois et multiple de trois qui sont séné circuler dans le fil neutre qui n'a pas été pris en considération dans notre étude.

**Tableau 3.2 :** Valeurs de THD obtenues par régulateur PI et par régulateur flou.

	Charge RL	Charge RC	Charge déséquilibrée	Charge à thyristor 10°	Charge à thyristor 30°
<b>THD avec Régulateur PI</b>	2,75 %	2,63 %	6,22 %	3,42 %	4,28 %
<b>THD avec régulateur flou</b>	1,20 %	1,80 %	6,12 %	1,35 %	2,10 %

Le tableau 3.3 compare entre les pics du dépassement de la tension continue obtenus par régulateur PI et par un régulateur flou. On remarque une grande diminution de ce pic en utilisant ce dernier régulateur, ce qui prouve une amélioration de la régulation de la tension continue.

**Tableau 3. 3 :** Dépassement de la tension continue obtenu par un régulateur PI et par un régulateur flou.

	Charge RL	Charge RC	Charge déséquilibrée
<b>Dépassement avec Régulateur PI</b>	120 v	120 v	120 v
<b>Dépassement avec régulateur flou</b>	20 v	40 v	20 v

Les temps de réponse de la tension continue pour les deux régulateurs sont regroupés dans le tableau 3.4. On remarque qu'en utilisant le régulateur flou, le temps de réponse a été nettement améliorée, il est environ cinq fois plus rapide.

**Tableau 3. 4 :** Temps de réponse de la tension continue obtenu par régulateur PI et par régulateur flou.

	Charge RL	Charge RC	Charge déséquilibrée	Variation de $V_{dc}$ réf
<b>Temps de réponse avec Régulateur PI</b>	0,1 s	0,1 s	0,12 s	0,11 s
<b>Temps de réponse avec régulateur flou</b>	0,02 s	0,02 s	0,01 s	0,05 s



### **3.7 Conclusion**

Toujours dans l'objectif d'amélioration des performances de filtrage, ce chapitre présente la synthèse d'un régulateur floue basé sur les règles du principe de fonctionnement d'un PI classique dans le but de garantir au FAP une bonne qualité de tension d'alimentation continue. Les tests effectués ont marqué une remarquable amélioration en THD, en termes de robustesse de précision et de rapidité de réponse. L'efficacité de la régulation floue est ainsi prouvée.

---

# **Conclusion générale**

---

## Conclusion générale

Le perfectionnement et le développement de la qualité de filtrage est devenue la préoccupation majeure pour les ingénieurs et les producteurs de l'énergie électrique, surtout avec le développement technologique qui a perfectionné les charges en les rendant plus précises et plus rapides grâce à l'implémentation des composants d'électronique de puissance tel que les MOFETs, les GTOs et IGBTs dans leur fabrication. Cependant, ces semi-conducteurs ont la particularité de déformer l'allure du signal de courant en injectant des courants harmoniques qui, à leur tour, en passant par les impédances du réseau et les impédances des appareils électriques, génèrent des tensions harmoniques. Comme a été discuté dans le premier chapitre de ce mémoire, ces harmoniques sont très dangereux pour les autres équipements électriques branchés sur le même réseau.

Des solutions palliatives à ces problèmes de perturbation trouvées par les ingénieurs ont été cités dans le premier chapitre, où on trouve les solutions modernes qui sont à base des filtres actifs. Ces derniers sont beaucoup plus souples par rapport aux filtres passifs puisqu'ils permettent de compenser instantanément tous les harmoniques quel que soit leur rang, grâce au bloc d'identification avec la méthode des puissances instantanées.

Le travail présenté dans ce mémoire est l'amélioration de la qualité de dépollution du réseau électrique par un filtre actif parallèle utilisant la logique floue pour la compensation de la tension continue responsable à l'alimentation de l'onduleur du FAP. Les étapes et le processus de cette logique ont été expliqués en détail dans le deuxième chapitre.

Dans le troisième chapitre, on a présenté d'abord le dimensionnement et le choix des paramètres du régulateur flou utilisé dans notre filtre, ensuite, le filtre actif a été soumis à différents tests afin de tester son adaptabilité aux différentes charges dans le but de prouver son efficacité et sa robustesse. Les résultats du filtrage utilisant ce régulateur ont été présentés tout en les comparant avec des résultats obtenus par un filtre actif à base d'un régulateur PI.

Tel a été vu dans ce dernier chapitre, la logique floue a permis de rendre la régulation de la tension continue beaucoup plus précise, rapide et aussi stable, améliorant ainsi la qualité du signal de courant filtré.

Comme perspectives, on souhaite d'abord faire la réalisation pratique de ce projet. Aussi, on souhaite améliorer encore plus la qualité de filtrage soit :

- En changeant le type de la commande de l'onduleur,
- En utilisant un régulateur flou dans la boucle de régulation du courant,
- En améliorant le bloc d'identification pour qu'il prenne en considération des harmoniques de rang trois et multiple de trois,
- En ajoutant des filtres passifs pour renforcer le processus de filtrage.

---

# **Références bibliographiques**

---

**Références bibliographiques**

- [1] Soumia Larabi et JumaShabani Amani, « Étude Et Simulation D'une Commande D'un Filtre Actif De Puissance Basé Sur Les Ondelettes », Mémoire de master, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, 14-jui-2017.
- [2] <http://blog.formatis.pro/map607> « Formation, MAP607 », consulté le 23-02-2019.
- [3] Khalid Ramzi, « Suivi De La Fréquence Du Réseau Électrique À L'aide D'une Carte Arduino », Thèse de Master, Université des frères Mentouri Constantine faculté des sciences de l'ingénieur département d'électrotechnique, 2015.
- [4] VanyaIgnatova, « Méthodes D'analyse De La Qualité De L'énergie Électrique. Application Aux Creux De Tension Et À La Pollution Harmonique », thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, France, 20 Octobre 2006.
- [5] C. Collombet J.M. Lupin J. Schonek, « Perturbations Harmoniques Dans Les Réseaux Pollués, Et Leur Traitement », Schneider Electric, cahier technique N° 152, Septembre 1999.
- [6] Eric Bettega, Jean Noël Fiorina, « Harmoniques : Convertisseurs Propres Et Compensateurs Actifs », Schneider Electric, cahier technique N°. 183, Janvier 2000.
- [7] CHELLI Zoubir, « Amélioration De La Qualité De L'énergie Électrique Par Un Filtre Actif D'harmonique », Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar-Annaba, Année : 2015.
- [8] CEI 61000-2-4 : IEC 61000-2-4 Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 2-4 : Environnement – Niveaux de compatibilité dans les installations industrielles pour les perturbations conduites à basse fréquence. Deuxième édition 2002-06.
- [9] <https://slideplayer.com/slide/6379568/>, consulté le 03-03-2019.
- [10] Zellouma Laid, « Filtrage Actif Parallèle Des Harmoniques Du Courant Générés Par Un Pont Redresseur Triphasé Non Commandé », Mémoire de Magister, Université de Badji Mokhtar, Annaba, 2006.
- [11] Yousfi Abdelkader, « Amélioration De La Qualité D'énergie Électrique En Utilisant Un Onduleur De Tension À Cinq Niveaux », Mémoire de Magister, Université Hassiba Benbouali Chlef, 2008.
- [12] Abdelfettah Boussaid, « Filtrage Actif Des Harmoniques Dans Les Réseaux Électriques. Contribution À L'amélioration De L'énergie Électrique », Thèse de Doctorat, Université Des Frères Mentouri - Constantine, 05-01-2017.

- [13] Allahoum Rabie, « Contribution À L'étude Du Filtre Actif Parallèle De Puissance À Trois Niveaux », Magister en Électrotechnique, Université d'El-Oued Faculté des Sciences et Technologie Filière de génie électrique, 2012.
- [14] Benyettou Lotfi Et Amroune Mourad, « Commande Et Diagnostic D'un Filtre Actif Parallèle », mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf de M'sila, 2015/2016.
- [15] Ghadbane Ismail, « Commande d'un Filtre Actif Triphasé Parallèle Par Différents Régulateurs », Mémoire de Magistère, Université Mohamed Kheider - Biskra, 24 /02/2011.
- [16] Houcine BELOUAAR, « Modélisation D'une Approche Basée Agent Et Logique Floue Pour La Qualité Des Services Web », Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider BISKRA, 2018 – 2019.
- [17] Allahoum Rabie, « Contribution À L'étude Du Filtre Actif Parallèle De Puissance À Trois Niveaux », Magister en Électrotechnique, Université d'El-Oued Faculté des Sciences et Technologie Filière de génie électrique, 2012.
- [18] Farid Hamoudi, « Commande Robuste d'un Filtre Actif Shunt `a Quatre Fils », Mémoire de Magistère, Université EL Hadj Lakhder Batna, le 01 Juillet 2008.
- [19] Amieur Toufik, « Commande des Systèmes Non Linéaires par Mode Glissant Flou », Mémoire de Magister, Université Mohamed Kheider De Biskra, le 20/06/2009.
- [20] DERNONCOURT, Franck, and ELISABETH MÉTAIS. "La Logique Floue : le raisonnement humain au cœur du système décisionnel." *Memory NFE211 engineering decision systems Paris* (February 2011).
- [21] Telli Abdelwahab Et Choudira Ibrahim, « Commande Par LogiqueFloue D'unFiltre Actif Parallèle Avec CorrectionDu Facteur De Puissance », Mémoire De Master, Université Mohamed Boudiaf - M'sila,2016/2017.
- [22] <https://actudactulaires.typepad.com/laboratoire/2016/08/logique-floue.html>, consulté le 20/04/2019.
- [23] Bai, Ying, and Dali Wang. "Fundamentals of fuzzy logic control—fuzzy sets, fuzzy rules and defuzzifications." *Advanced Fuzzy Logic Technologies in Industrial Applications*. Springer, London, 2006. 17-36.
- [24] Abdelhamid Hamadi, « Amélioration Des Performances Du Filtre Actif : Application Du Régulateur Proportionnel Intégral Et Du Régulateur Flou », Pour L'obtention De Maitrise En Génie Électrique, École De Technologie Supérieure Université Du Québec, Le 30 Novembre 2004.

- [25] Meradi Samir, « Estimation Des Paramètres Et Des États De La Machine Asynchrone En Vue De Diagnostic Des Défauts Rotoriques », mémoire de Magister, Université de Biskra, 2007.
- [26] [http://projets.developpez.com/attachments/download/660/Tr-logique-flouex4\\_1\\_.pdf](http://projets.developpez.com/attachments/download/660/Tr-logique-flouex4_1_.pdf), consulté le 14/05/2019.
- [27] Aguilar-Martin Joseph. « La Logique Floue Et Ses Applications Industrielles ». In: Quaderni, n°25, Printemps 1995. Intelligence artificielle et entreprise : l'entreprise intelligente, pp. 75-78.
- [28] <https://openclassrooms.com/fr/courses/1288291-introduction-a-la-logique-floue>, Consulté le 10/05/2019.
- [29] <http://www.ferdinandpiette.com/blog/2011/08/implementer-un-pid-sans-faire-de-calculs/>, Consulté le 28/05/2019.
- [30] Otmane EL ALAOUI JAMAL, Application de la logique de floue. Mémoire d'ingénieur en Automatismes et Informatique Industrielle, EMSI (École Marocaine des Sciences de l'Ingénieur) - 2010.
- [31] Schneider Electric-Guide de l'installation électrique, Chapitre M « Détection et atténuation des harmoniques », 2010.

## ملخص

يطمح أي منتج، موزع أو مستخدم للطاقة الكهربائية إلى الاستفادة من طاقة دون انقطاع، ذات سعة وتردد مستقرين وغير ملوثة. هذه المذكرة تقدم أولاً الاضطرابات المدهورة لجودة الطاقة الكهربائية من خلال التركيز على توافقيات التيار الكهربائي الناتجة عن الحمولات الملوثة أو غير الخطية. للتخلص من هذه التوافقيات اقترحت العديد من الحلول منها الترشيح الفعال المتوازي، بواسطة جهاز قائم على العاكس يعمل على تعويض التيارات التوافقية في الشبكة الكهربائية في الوقت الفعلي. يشغل المرشح بواسطة مكثفة التوتر بين طرفيها يجب أن يبقى ثابتاً باستخدام متحكم متناسب و متكامل كلاسيكي ذو أداء محدود نحسنه باستبداله بمتحكم يعمل بالمنطق المضبب. في المقام الثاني قمنا بشرح مبادئ المنطق المضبب و المراحل المتينة لإنشاء متحكم، و أخيراً قمنا بتفصيل تركيب المتحكم المضبب و تنفيذ العديد من اختبارات الترشيح باستخدام برنامج ماتلاب، و كانت نتائج الترشيح و الاستقرار و الدقة مرضية للغاية.

## Résumé

L'ambition de tout producteur, distributeur ou utilisateur d'énergie électrique est le bénéfice d'une alimentation sans coupure, stable en amplitude et en fréquence et non polluée. Ce travail présente en premier lieu les perturbations les plus dégradateurs de la qualité de l'énergie électrique en mettant l'accent sur les harmoniques de courants générés par les charges dites polluantes ou non linéaires. Pour dépolluer le réseau de ces parasites, plusieurs solutions sont mises en œuvre, parmi lesquelles des solutions de filtrage actif parallèle, assuré par un dispositif à base d'onduleur qui injecte des courants compensateurs d'harmoniques dans le réseau en temps réel. Le FAP est alimenté par un condensateur d'une tension fluctuante qui doit être maintenue stable et constante grâce à un régulateur PI classique à performances limitées qui peuvent être améliorées en le remplaçant par un régulateur flou. En deuxième lieu, nous avons présenté les principes de la logique floue, et en dernier lieu nous avons détaillé la synthèse d'un régulateur flou et effectué plusieurs tests de filtrage sous Simulink de Matlab qui ont donné des résultats très satisfaisants de THD, de robustesses et de précision.

## Abstract

The ambition of any producer, distributor or user of electrical energy is the benefit of an uninterrupted power supply, stable in amplitude and frequency and unpolluted. This work presents first of all the most degrading disturbances of the quality of the electrical energy by focusing on the harmonics of currents generated by the so-called polluting or non-linear loads. To clean up the network of these parasites several solutions are implemented among which parallel active filtering solutions, provided by an inverter-based device that injects harmonic compensating currents in the network in real time. The FAP is powered by a fluctuating voltage capacitor that must be maintained stable and constant thanks to a standard PI controller with limited performance that can be improved by replacing it with a fuzzy controller. In the second place, we presented the principles of fuzzy logic, and finally we have detailed the synthesis of a fuzzy controller and carried out several filtering tests under Simulink of Matlab which gave very satisfactory results of THD, robustness and precision.