

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

*Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj*

*Faculté des Sciences et de la technologie*

*Département d'Electromécanique*

# *Mémoire*

Présenté pour obtenir

**LE DIPLOME DE MASTER**

FILIERE : Electrotechnique

**Spécialité : Commande Electrique**

Par

**Tairi Khaoula  
Hamoudi Haizia**

**Intitulé**

*Amélioration du facteur de puissance à l'entrée d'un convertisseur  
monophasé non contrôlé de type AC/DC*

**Soutenu le :     /     /2022**

**Devant le Jury composé de :**

| <b>Nom &amp; Prénom</b>     | <b>Grade</b> | <b>Qualité</b>   | <b>Etablissement</b> |
|-----------------------------|--------------|------------------|----------------------|
| <i>M. IRATNI ABDELHAMID</i> | <i>MCA</i>   | <i>Président</i> | <i>Univ-BBA</i>      |
| <i>M. KESSAL ABDELHALIM</i> | <i>Pr</i>    | <i>Encadreur</i> | <i>Univ-BBA</i>      |
| <i>M. AISSA OUALID</i>      | <i>MCA</i>   | <i>Examineur</i> | <i>Univ-BBA</i>      |
| <i>M. TALHAOUI HICHAM</i>   | <i>MCA</i>   | <i>Examineur</i> | <i>Univ-BBA</i>      |

*Année Universitaire 2021/2022*

---

## Remerciements

*Avant toute chose, nous tenons à remercier « Allah » qui nous a donné la force et la volonté pour terminer ce modeste travail.*

*Nos vifs remerciements vont particulièrement au Pr. KESSAL ABDELHALIM » qui a proposé ce sujet et dirigé notre travail et ses précieux conseils et encouragements.*

*En toute fidélité, un précieux remerciement au Dr. AISSA OUALID pour son aide et ses conseils.*

*Nous exprimons nos respectueuses reconnaissances à tous les enseignants de l'université de Bordj Bou Arreridj.*

*Nous tenons aussi à remercier nos camarades.*

*C'est avec un réel plaisir que nous adressons nos sincères reconnaissances et notre profonde gratitude à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin pour réaliser ce travail.*

*Khaoula et Haizia*

## Dédicaces

*Avant tout louanges à Dieu, élément et miséricordieux pour nous  
avoir donné la force de mener à terme ce travail.*

*Je dédie cet humble travail à mes chers parents, mais aucune dédicace  
ne serait témoin de mon profond amour, mon immense gratitude et  
mon plus respect.*

*A mon très cher père « Ali » qui m'a soutenu et a été mon bouclier  
dans lequel je me suis réfugiée et dans lequel j'ai toujours suivi que  
dieu prolonge sa vie.*

*A la plus chère, ma mère « Aldjia » est la lumière de ma vie pour son  
amour qui m'a toujours encouragé tout au long de mes années  
scolaires et m'a toujours béni par ses prières.*

*A mes très chers frères « Yacine et Laid » pour leur disponibilité, leur  
soutien moral et leur encouragement pour moi.*

*A mes sœurs qui ont partagé avec moi la vie aigre-douce sous le même  
toit, que Dieu les protège.*

*Et leurs enfants qui ont partagé une vie avec moi.*

*A mes chères amies : Khaoula, Khadidja Khaoula, Donia, Ibtessam.*

*A mes chers enseignants sans exception.*

*Haizia*

## Dédicaces

*C'est avec un grand plaisir que je tiens à dédier ce modeste travail :*

*À celui qui a fait de moi une femme instruite, cultivée, autonome et ambitieuse, mon père « Aïssa », le pilier de la maison.*

*À l'être le plus cher de ma vie, la source de mes efforts et la lumière de notre maison, ma mère « Manouba ».*

*À ma belle-sœur « Darsaf », qui est le plus beau cadeau de Dieu pour moi.*

*À mon frère aîné « Bahaa Al-Din » et au cadet « Azhar », que Dieu vous bénisse pour moi et vous accorde la réussite dans vos études.*

*À mes amies : Haïzia, Khadija, Donia, Khaoula merci pour tous les bons moments et votre amour pour moi toujours.*

*Khaoula*

# Liste des Figures

---

## Liste des figures

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure. 1. 1.</b> Creux de tension et coupures.....   | 4  |
| <b>Figure. 1. 2.</b> Fluctuations de tension.....  | 4  |
| <b>Figure. 1. 3.</b> Déséquilibre de tension du système triphasé.....                                | 5  |
| <b>Figure. 1. 4.</b> Filtre actif série .....  | 12 |
| <b>Figure. 1. 5.</b> Filtre actif parallèle.....   | 13 |
| <b>Figure. 1. 6.</b> Structure et principe de commande d'un convertisseur AC/DC avec PFC.....        | 15 |
| <b>Figure. 2. 1.</b> Redresseur avec pont de Graëtz .....  | 16 |
| <b>Figure. 2. 2.</b> Fonctionnement d'un redresseur avec pont de Graëtz.....                         | 18 |
| <b>Figure. 2. 3.</b> Représentation fonctionnelle de la boucle fermée de la tension du bus continu.  | 20 |
| <b>Figure. 2. 4.</b> Principe de contrôle du courant par hystérésis.....                             | 21 |
| <b>Figure. 2. 5.</b> Principe de génération des ordres de commande.....                              | 22 |
| <b>Figure. 2. 6.</b> Simulations de la commande classique du PFC.....                                | 23 |
| <b>Figure. 2. 7.</b> Tension de sortie ( $V_{dc}$ ) et tension de référence ( $V_{dc}^*$ ).....      | 24 |
| <b>Figure. 2. 8.</b> Courant d'entrée ( $i_s$ ) et tension de source ( $V_s$ ).....                  | 24 |
| <b>Figure. 2. 9.</b> Courant redressé ( $I_L$ ) .....  | 25 |
| <b>Figure. 2. 10.</b> THD du courant de source.....  | 25 |
| <b>Figure. 3. 1.</b> Le principe de la commande par hystérésis à bande adaptative.....               | 27 |
| <b>Figure. 3. 2.</b> Contrôleur de courant à hystérésis adaptative.....                              | 28 |
| <b>Figure. 3. 3.</b> Schéma illustrant le calcul de la bande d'hystérésis adaptative.....            | 29 |
| <b>Figure. 3. 4.</b> Schéma bloc expliquant l'hystérésis adaptative.....                             | 30 |
| <b>Figure. 3. 5.</b> Simulation Simulink /MATLAB de la commande d'hystérésis adaptative.....         | 31 |
| <b>Figure. 3. 6.</b> Tension de sortie ( $V_{dc}$ ) avec sa tension de référence ( $V_{dc}^*$ )..... | 31 |
| <b>Figure. 3. 7.</b> Courant d'entrée ( $i_s$ ) et tension de source ( $V_s$ ).....                  | 32 |
| <b>Figure. 3. 8.</b> Courant redressé ( $I_L$ ).....   | 32 |

## Liste des Figures

---

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure. 3. 9.</b> THD du courant de source..... | 33 |
|--|----|

# Liste des Tables

---

## Liste des tableaux

|   |    |
|---|----|
| <b>Tableau 1.1</b> : Classification des normes concernant la qualité d'énergie électrique.....                                      | 9  |
| <b>Tableau 1.2</b> : Niveau de compatibilité pour les tensions harmoniques sur les réseaux basse tension (Norme CEI 61000-2-2)..... | 10 |
| <b>Tableau 2.1</b> : Paramètres de la simulation.....   | 22 |
| <b>Tableau 3.2</b> : Comparaison du taux de distorsion harmonique du courant.....   | 34 |

# Liste des Symboles et Acronymes

---

## Liste des Symboles et Acronymes

### Symboles :

$V_S$  : Tension de source.

Vdc : Tension du bus continu

Vdc\* : Tension de référence

$i_s$  : Courant d'entrée

IL : Courant redressé.

I-réf : Courant de référence

R : Résistance de la charge.

C : Condensateur de filtrage

L : Inductance de couplage

S : Puissance apparente

P : Puissance active

Q : Puissance réactive

D : Puissance déformante

$f_{cv}$  : Fréquence de coupure de la boucle fermée de la tension du bus continu.

$f_c$  : Fréquence de commutation

# Liste des Symboles et Acronymes

---

## Acronymes :

FP : Facteur de Puissance.

PFC: Power Factor Correction.

THD: Total Harmonic Distortion.

PLL: Phase Locked Loop.

PI : Proportionnel intégral.

FAP : Filtre Actif Parallèle.

FAS : Filtre Actif Série.

AC/DC : Conversion alternative continue.

FACTS: Flexible Alternating Current Transmission System.

IGBT: Insolated Gate Bipolar Transistor.

HB : Bande hystérésis.

---

# *Résumé*

---

## Résumé

---

### ملخص:

نظراً للاستخدام الكبير للمحولات الثابتة التي لها تأثير سلبي على جودة الطاقة في الأنظمة الكهربائية، فقد درسنا في هذا الموجز التحكم في التيار التكاملي لنظام PFC . تمت محاكاة استراتيجية التحكم هذه تحت MATLAB /Simulink ومقارنتها بالتحكم التقليدي لتصحيح عامل الطاقة الذي تكون نتائج التحكم التكاملي أفضل من حيث THD للتيار المصدر الذي يوفر محول DC-AC غير المنضبط

**الكلمات المفتاحية:** AC/DC (التحويل البديل المستمر)، معالج معامل القدرة، التحكم التكاملي، MATLAB/Simulink.

### Résumé :

En raison de la grande utilisation des convertisseurs statiques qui ont un impact négatif sur la qualité de l'énergie dans les systèmes électriques, nous avons étudié dans ce mémoire un contrôle adaptatif en courant pour un système PFC. Cette stratégie de contrôle a été simulée sous MATLAB/Simulink et comparée avec le contrôle classique du PFC dont les résultats obtenus de la commande adaptative sont meilleurs en termes du THD du courant de la source alimentant le convertisseur AC/DC non contrôlé.

**Mots clés :** Convertisseur AC/DC, PFC, Commande adaptative, MATLAB/Simulink.

### Abstract:

Due to the great use of static converters which have a negative impact on the quality of energy in electrical systems, we have studied in this study an adaptive current control for a PFC system. This control strategy was simulated under MATLAB/Simulink and compared with the conventional control of the PFC whose results obtained from adaptive control are better in terms of the THD of the source current supplying the AC/DC uncontrolled converter.

Keywords: AC/DC converter, PFC, Adaptive control, MATLAB/Simulink.

# Sommaire

---

## Sommaire

|   |    |
|---|----|
| <b>Introduction général</b> .....   | 1  |
| <b>Chapitre 01 : Perturbation et solutions envisagées pour la dépollution dans les installations électriques.</b> |    |
| <b>1. 1</b> Introduction .....  | 2  |
| <b>1. 2</b> Qualité de l'énergie électrique.....  | 2  |
| <b>1. 3</b> Perturbations électriques et leurs origines .....   | 3  |
| <b>1. 3. 1.</b> Creux de tension et coupures.....   | 3  |
| <b>1. 3. 2.</b> Fluctuations de tension.....  | 4  |
| <b>1. 3. 3.</b> Déséquilibre du système triphasé de tension.....  | 5  |
| <b>1. 3. 4.</b> Variation de fréquence.....   | 5  |
| <b>1. 3. 5.</b> Harmoniques et inter-harmoniques.....   | 5  |
| <b>1. 4.</b> Perturbations harmoniques .....  | 6  |
| <b>1. 4. 1.</b> Origines des harmoniques.....   | 6  |
| <b>1. 4. 2.</b> Conséquences des harmoniques.....   | 7  |
| <b>1. 4. 3.</b> Caractéristique de la perturbation harmonique.....  | 8  |
| <b>1. 5.</b> Normes et réglementations .....  | 9  |
| <b>1. 6</b> Solutions traditionnelles et modernes de dépollution.....   | 10 |
| <b>1. 6. 1</b> Solutions traditionnelle.....  | 10 |
| <b>1. 6. 2</b> Solutions modernes.....  | 11 |
| <b>1. 7</b> Prélèvement Sinusoïdal.....   | 14 |
| <b>1. 7. 1</b> Correction du facteur de puissance .....   | 15 |
| <b>1. 8.</b> Conclusion.....  | 15 |
| <b>Chapitre 02 : Présentation et simulation sous MATLAB/Simulink de la commande classique du PFC</b>              |    |
| <b>2. 1</b> Introduction.....   | 16 |
| <b>2. 2</b> Présentation du convertisseur monophasé non contrôle de type AC/DC.....                               | 16 |

# Sommaire

---

|          |   |    |
|----------|---|----|
| 2. 3     | Correcteur du facteur de puissance (PFC).....                 | 18 |
| 2. 4     | Commande classique du système (PFC).....                      | 19 |
| 2. 4. 1. | Régulation par PI de la tension du bus continu .....          | 19 |
| 2. 4. 2. | Contrôle par régulateur à hystérésis du courant d'entrée..... | 21 |
| 2. 5.    | Simulation par la commande étudiée .....                      | 22 |
| 2. 5. 1  | Résultats de simulation.....                                  | 23 |
| 2. 6.    | Conclusion .....  | 26 |

## **Chapitre 03 : Présentation et simulation sous MATLAB/Simulink de la commande améliorée du PFC**

|      |  |           |
|------|--|-----------|
| 3. 1 | Introduction.....  | 27        |
| 3. 2 | Présentation du principe de la commande à hystérésis adaptative..... | 27        |
| 3. 3 | Calculateur de la bande d'hystérésis adaptative .....                | 28        |
| 3. 4 | Simulation par la commande étudiée .....                             | 30        |
| 3. 5 | Résultats de simulation .....  | 31        |
| 3. 6 | Etude comparative des deux techniques de commande traitées.....      | 33        |
| 3.7  | Conclusion .....   | 34        |
|      | <b>Conclusion générale</b> .....                                     | <b>35</b> |

---

# *Introduction générale*

---

## Introduction générale

Depuis de nombreuses années, le fournisseur d'énergie électrique s'efforce d'assurer la qualité de l'énergie électrique et fournir les efforts pour atteindre cet objectif grâce à l'évolution de l'électronique de puissance qui a offert une position de premier plan dans les systèmes de contrôle [1]. Avec la grande utilisation d'appareils électroniques, il y a eu de nombreux problèmes associés aux distorsions des harmoniques dans le réseau électrique. Ces problèmes touchent les secteurs tertiaires et industriels [2]. La plupart des perturbations harmoniques sont causées par les convertisseurs statiques qui sont la cause de la détérioration du facteur de puissance et de la génération de courants avec des harmoniques [3]. Pour réduire les perturbations, il est nécessaire de développer des dispositifs curatifs tels que les filtres actifs et les convertisseurs non-polluants. Ces dernières années, les convertisseurs DC/DC ont commencé à apparaître sur le marché et des modifications ont été apportées à leur système. Ils sont utilisés avec le redresseur de diodes pour assurer la correction du facteur de puissance (PFC) [4]. Afin d'atteindre les objectifs de notre mémoire, nous avons divisé celui-ci en trois chapitres :

Le premier chapitre débute avec la qualité d'énergie, les perturbations électriques et leurs origines. Aussi, nous avons présenté les normes et la réglementation exigée pour les utilisateurs. Nous avons terminé ce chapitre par la présentation des différentes solutions de dépollutions : traditionnelles, modernes et le prélèvement sinusoïdal.

Dans le deuxième chapitre, nous avons commencé par la présentation du convertisseur DC/DC qui est placé entre le pont à diodes et la charge. Ensuite, on a proposé un petit rappel sur le correcteur du facteur de puissance et après, on a étudié et simulé par MATLAB la commande classique du PFC. Nous avons terminé ce chapitre par les résultats de simulation.

Pour le troisième chapitre, nous avons présenté le contrôle du courant par un contrôleur à hystérésis adaptatif qui fonctionne sous une fréquence de commutation constante tout en conservant le régulateur PI classique pour la régulation du bus continu du PFC. De plus, les mêmes conditions de simulation utilisées dans le deuxième chapitre ont également été retenues dans ce troisième chapitre pour faire une étude comparative entre les deux commandes en termes de taux de distorsion harmonique (THD) du courant de la source.

Enfin, nous avons terminé ce mémoire par une conclusion générale et quelques perspectives.

---

# *Chapitre 01*

*Perturbations et solutions envisagées pour  
la dépollution dans les installations  
électriques.*

---

# Chapitre 01 : Perturbations et solutions envisagées pour la Dépollution dans les installations électriques

---

## 1.1 Introduction

Depuis de nombreuses années, le distributeur d'énergie électrique s'efforce de garantir la qualité de la fourniture d'électricité. Les premiers efforts se sont portés sur la continuité des services afin de rendre toujours disponible l'accès à l'énergie chez l'utilisateur. Aujourd'hui, les critères de qualité ont évolué avec le développement des équipements où l'électronique prend une place prépondérante dans les systèmes de commande et de contrôle [5].

Dans ce chapitre, nous étudions la caractéristique générale des perturbations et les solutions envisagées pour les dépollutions dans installations électriques ainsi, nous détaillerons les perturbations et leurs origines, les perturbations harmoniques, les normes et les réglementations. Enfin, on présente les solutions traditionnelles et modernes dédiées à l'amélioration de la qualité d'énergie.

## 1.2 Qualité de l'énergie électrique

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

### a. Qualité de la tension

Les tensions d'un réseau électrique constituent un système alternatif triphasé, dont la fréquence de base est de 50 Hz ou de 60 Hz.

Les paramètres caractéristiques d'un tel système sont les suivants :

- ❖ La fréquence.
- ❖ L'amplitude des trois tensions.
- ❖ La forme d'onde qui être la plus proche possible d'une sinusoïde.

# Chapitre 01 : Perturbations et solutions envisagées pour la Dépollution dans les installations électriques

---

La symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leur déphasage relatif.

La qualité de la tension peut être affectée, soit du fait de certains incidents inhérents à la nature physique et aux sujétions liées à l'exploitation du réseau, soit encore du fait de certains récepteurs. Ces défauts se manifestent sous forme de différentes perturbations affectant un ou plusieurs des quatre paramètres précédemment cités.

## **b. Qualité du courant**

La qualité du courant est relative à une dérive des courants de leur forme idéale, et se caractérise de la même manière que pour la tension par quatre paramètres [6].

### **1.3 Perturbations électriques et leurs origines**

#### **1.3.1. Creux de tension et coupures**

Un creux de tension est défini comme une baisse de 10% après 90% de la tension contractuelle pendant un temps compris entre la demi-période fondamentale du réseau (10ms50Hz) et une minute (figure 01).

Les paramètres qui caractérisent un creux de tension sont :

- Sa profondeur :  $\Delta U$  ou son amplitude  $U$
- Sa durée :  $\Delta T$  définie comme le laps de temps pendant lequel la tension est inférieure à 90% de la valeur nominale.

Les coupures sont le cas où la profondeur de la tension est supérieure à 99%. Elles sont caractérisées par un seul paramètre c'est la durée. Les coupures brèves sont de durée inférieure à une minute (coupure de 1 s à 1 min) et entre 10 ms et 1 s des « coupures très brèves » (voir la figure 01).

# Chapitre 01 : Perturbations et solutions envisagées pour la Dépollution dans les installations électriques

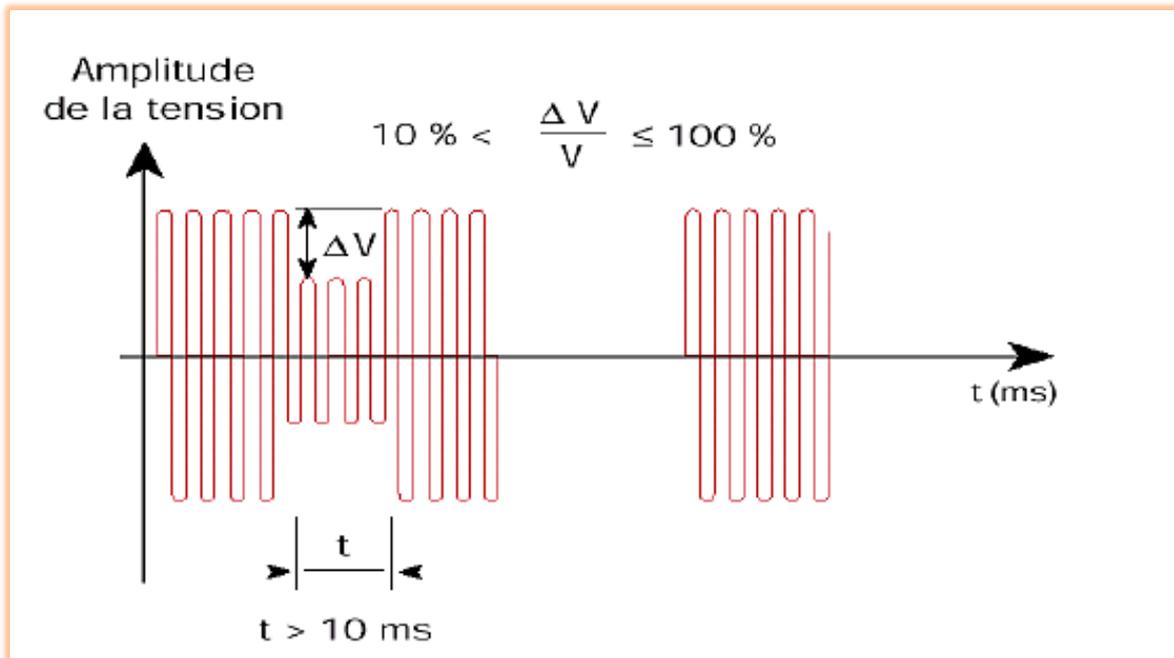


Figure.1. 1. Creux de tension et coupures [7].

## 1.3.2. Fluctuations de tension

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

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

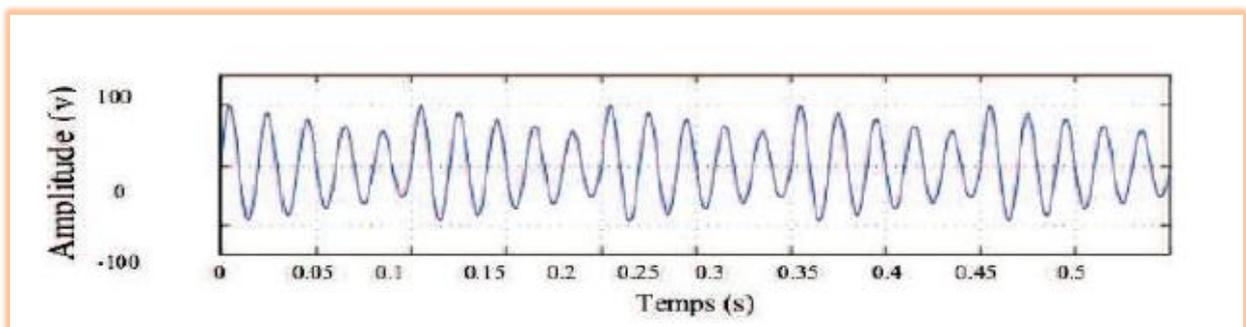


Figure. 1. 2. Fluctuations de tension [7].

# Chapitre 01 : Perturbations et solutions envisagées pour la Dépollution dans les installations électriques

## 1.3.3. Déséquilibre du système triphasé de tension

Trois grandeurs de même nature et de même pulsation forment un système triphasé équilibré lorsqu'elles ont la même amplitude et lorsqu'elles sont déphasées de  $\pm 120^\circ$ . Lorsque les grandeurs ne vérifient pas ces conditions de phase et d'amplitude, on parle alors d'un système triphasé déséquilibré figure I.3.

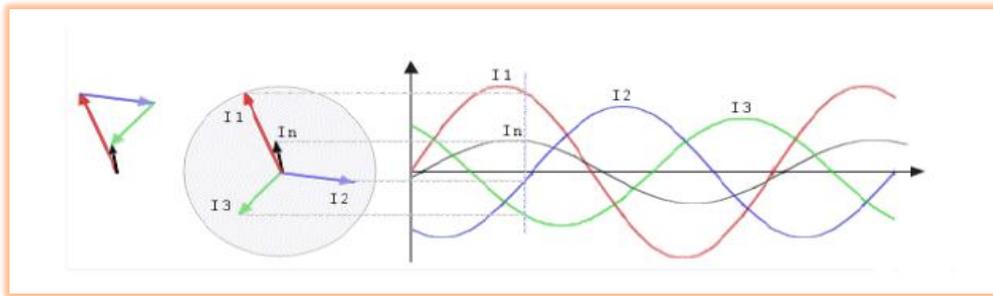


Figure. 1. 3. Déséquilibre de tension du système triphasé [7].

On parle d'un déséquilibre d'amplitude lorsque les trois tensions n'ont pas la même valeur efficace et d'un déséquilibre de phase lorsque le déphasage entre les trois phases successives n'est pas de  $120^\circ$  [7].

## 1.3.4. Variation de fréquence

Une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome. Au niveau des réseaux de distribution ou de transport, cette variation de la fréquence est très rare et n'est présente que lors de circonstance exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau. Dans des conditions d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle  $50\text{Hz} \pm 1\%$ .

## 1.3.5. Harmoniques et inter-harmoniques

Les harmoniques sont des signaux dont la fréquence est un multiple entier de celle du fondamental. Elles sont principalement générées par des charges non linéaires (ce non linéarité peut être intrinsèque comme dans le cas d'un arc ou d'un noyau magnétique saturé, ou résulté des commutations répétées des composants de l'électronique de puissance). Soumise à une tension sinusoïdale, une charge non linéaire absorbe un courant déformé dont les composantes harmoniques ne dépendent en première approximation que de ses caractéristiques propres et non de celles du réseau. Cette charge se comporte comme une

# Chapitre 01 : Perturbations et solutions envisagées pour la Dépollution dans les installations électriques

---

source de courants harmoniques. Entre les harmoniques de courant et de tension, on peut observer d'autres fréquences qui sont des multiples non entiers de celle du fondamental. Les principales sources d'harmoniques sont les alimentations ou régulateurs d'électronique de puissance (redresseurs, variateurs de vitesse, ordinateurs, téléviseurs,... etc.) ; alors que pour les inter-harmoniques, les sources principales sont les cyclo-convertisseurs, les moteurs asynchrones et les machines à souder (pour les réseaux basse tension), les fours à arc (pour les réseaux moyenne et haute tension) [8].

## 1.4. Perturbations harmoniques

### 1.4.1. Origines des harmoniques

#### a. Les convertisseurs statiques

Les ponts redresseurs et en général les convertisseurs statiques (diodes et thyristors) sont générateurs de courants harmoniques. Dans le cas de ponts monophasés, sujet de notre travail, rappelons que les charges symétriques ne génèrent pas d'harmoniques de rang pair. Le spectre étant en général décroissant, l'harmonique de rang 3 est donc l'harmonique prépondérant pour les charges monophasées. Ainsi, pour les charges très répandues de type redresseur monophasé à diodes avec filtrage capacitif, l'harmonique de rang 3 peut atteindre 80 % du fondamental.

#### b. L'éclairage

L'éclairage, par lampes à décharge et tubes fluorescents est générateur de courants harmoniques. Le taux individuel d'harmonique 3 peut même dépasser 100 % pour certaines lampes fluo-compactes modernes d'où une attention particulière à porter à la détermination de la section et de la protection du conducteur neutre qui, véhiculant la somme des courants d'harmoniques 3 des trois phases, risque un échauffement important.

#### c. Les fours à arc

Dans le cas du four à arc à courant alternatif : l'arc est non linéaire, dissymétrique et instable. Il va induire des spectres possédant des raies impaires, paires et un spectre continu (bruit de fond à toutes les fréquences). Le niveau spectral est en fonction du type de four, de sa puissance, de la période de fonctionnement considérée : fusion, affinage... etc. Aussi, seules des mesures peuvent déterminer le spectre de façon précise. Dans le cas du four à arc à courant continu : l'arc est alors alimenté par l'intermédiaire d'un redresseur. L'arc est plus stable qu'en courant alternatif. Le courant absorbé se décompose en un spectre semblable à

# Chapitre 01 : Perturbations et solutions envisagées pour la Dépollution dans les installations électriques

---

celui d'un redresseur et un spectre continu de niveau inférieur à celui d'un four à courant alternatif.

## d. Les inductances saturées

De telles inductances ont leur impédance fonction de l'amplitude du courant qui les traverse et de fait elles provoquent des déformations notables de ce courant. C'est le cas, dans une certaine mesure, des transformateurs à vide soumis à une surtension permanente.

## e. Les machines tournantes

Les machines tournantes donnent des harmoniques de denture de rangs élevés et d'amplitudes souvent négligeables.

### 1.4.2. Conséquences des harmoniques

De nombreux effets des harmoniques sur les installations et les équipements électriques peuvent être cités. Les effets les plus importants sont l'échauffement, les défauts de fonctionnement de certains équipements électriques et le risque d'excitation de résonance :

a. **L'échauffement** : Les pertes totales par effet Joule sont la somme de celles du fondamental et des harmoniques d'amplitudes souvent négligeables.

$$I^2 \cdot R = \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 \cdot R \quad (1.1)$$

Avec :

I : le courant total : le courant harmonique de rang h qui représente le fondamental pour h=1.

R : la résistance traversée par le courant I.

Les harmoniques augmentent aussi les pertes fer (pertes par courants de Foucault). Ils prennent de l'importance dans les matériels utilisant les circuits magnétiques (moteurs, transformateurs...).

Le vieillissement des isolants est souvent dû à une contrainte en tension consécutive à la présence de la tension harmonique, et donc à une augmentation locale du courant de fuite, ou encore à l'échauffement exagéré dans les conducteurs.

b. **Les défauts de fonctionnements de certains équipements électriques** : En présence des harmoniques, la tension (ou le courant) peut changer plusieurs fois de signe dans une demi-période ; par conséquent, tout appareil dont le fonctionnement est basé sur le passage par zéro des grandeurs électriques (appareils utilisant la tension comme référence) peut être perturbé.

# Chapitre 01 : Perturbations et solutions envisagées pour la Dépollution dans les installations électriques

---

c. **Le risque d'excitation de résonance** : Les fréquences de résonance des circuits formés par des inductances du transformateur et des câbles sont normalement élevées. Ce n'est pas le cas lorsque des batteries de capacité sont raccordées au réseau pour relever le facteur de puissance ; les fréquences de résonance peuvent devenir assez faibles, et coïncider ainsi avec celles des harmoniques engendrées par les convertisseurs statiques. Dans ce cas, il y aura des phénomènes d'amplification d'harmoniques [9].

### 1.4.3. Caractéristique de la perturbation harmonique

Différents grandeurs sont définies pour caractériser la distorsion en régime déformé. Le taux global de distorsion harmonique (THD) et le facteur de puissance sont les plus employés pour quantifier respectivement les perturbations harmoniques et la consommation de puissance réactive.

- **Taux de distorsion harmonique**

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

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \times 100 \quad (1.2)$$

$I_1$  : La valeur efficace du courant fondamental.

$I_n$  : La valeur efficace du courant harmonique.

**N.B** : Lorsque le THD est égal à zéro, on peut conclure qu'il n'y a pas d'harmoniques sur le réseau.

- **Le facteur de puissance**

Dans un milieu non harmonique, le facteur de puissance est donné par :

# Chapitre 01 : Perturbations et solutions envisagées pour la Dépollution dans les installations électriques

$$F_P = \frac{P}{S} = \cos(\alpha) \quad (1.3)$$

Dans un milieu harmonique, en présence de charges non linéaires, le COS  $\phi$  n'est plus applicable, on parlera du facteur de puissance  $F_P$ , ce dernier est donné par la formule :

$$F_P = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2+Q^2+D^2}} \quad (1.4)$$

La puissance active  $P$ , réactive  $Q$  et déformante  $D$ .

## 1.5. Normes et réglementations

Afin de limiter l'influence d'une charge polluante sur les autres charges connectées au réseau et en même temps éviter la modification des caractéristiques de ce dernier, les distributeurs d'énergie électrique ont été amenés à émettre des recommandations. Ces recommandations concernent les exigences au point de raccordement de l'utilisateur sur le réseau électrique. Un exemple de ces recommandations (les plus anciennes) stipule que chaque utilisateur pris séparément doit à son point de raccordement, respecter les limites de perturbations en tension suivantes :

- Harmoniques paires :  $V_h/V_I < 0.6\%$
- Harmoniques impaires :  $V_h/V_I < 1\%$
- Taux de distorsion harmonique en tension :  $THD < 1.6\%$

Au-delà de ces valeurs, il est nécessaire d'installer des dispositifs de filtrage ou bien dans certains cas extrêmes augmenter la puissance de court-circuit du réseau. Ces limites sont destinées à minimiser le risque de voir le réseau d'alimentation général atteindre un taux de distorsion harmonique en tension supérieur à 5%. Afin de concilier distributeurs et consommateurs, des normes ont été dictées. Le tableau I.1 résume les principales normes concernant la qualité d'énergie et la tension dans les systèmes électriques.

**Tableau 1.1.** Classification des normes concernant la qualité d'énergie électrique [9].

| Thèmes                                 | Normes   |
|--|--|
| Classification de la qualité d'énergie | CEI 61000-2-5 : 1995<br>CEI 61000-2-5 : 1990<br>IEEE 1159 : 1995 |
| Creux/ surtension/interruption         | CEI 61009-2-1 : 1990<br>IEEE 1159 : 1995                         |

# Chapitre 01 : Perturbations et solutions envisagées pour la Dépollution dans les installations électriques

---

|                    |  |
|--------------------|--|
| Harmoniques        | CEI 61000-2-1 : 1990<br>CEI 61000-2-2<br>CEI 61000-3-2<br>CEI 61000-4-7 : 1991<br>IEEE 519 :1992 |
| Flicker de tension | CEI 61000-4-15 : 1997  |
| Transitoires       | CEI 61000-2-1 : 1990<br>CEI816 :1984<br>IEEE 1159 : 1995<br>IEEE C62.41 :1991                    |

**Tableau 1.2.** Niveau de compatibilité pour les tensions harmoniques sur les réseaux basse tension (Norme CEI 61000-2-2) [9].

| Rangs impairs non multiples de 3 |                  | Rangs impairs multiples de 3 |                  | Rangs pairs |                 |
|----------------------------------|------------------|------------------------------|------------------|-------------|-----------------|
| Rang                             | Tension harm (%) | Rang                         | Tension harm (%) | Rang        | Tension harm(%) |
| 5                                | 6                | 3                            | 5                | 2           | 2               |
| 7                                | 5                | 9                            | 1.5              | 4           | 1               |
| 11                               | 3.5              | 15                           | 0.3              | 6           | 0.5             |
| 13                               | 3                | 21                           | 0.2              | 8           | 0.5             |
| 17                               | 2                | > 21                         | 0.2              | 10          | 0.5             |
| 19                               | 1.5              |                              |                  | 12          | 0.2             |
| 23                               | 1.5              |                              |                  | > 12        | 0.2             |
| 25                               | 1.5              |                              |                  |             |                 |
| > 25                             | 0.2+1.3*25/h     |                              |                  |             |                 |

## 1.6 Solutions traditionnelles et modernes de dépollution

### 1.6.1 Solutions traditionnelles

Les moyens de dépollution traditionnels sont nombreux et se résument dans les points suivants :

- Inductance anti-harmonique de protection des condensateurs.
- Inductance de lissage des courants.
- Confinement des harmoniques.

# Chapitre 01 : Perturbations et solutions envisagées pour la Dépollution dans les installations électriques

---

- L'utilisation des transformateurs à couplage approprié permettant de limiter la circulation des courants harmoniques.
- Augmentation de l'indice de modulation.
- Filtres passifs utilisant des éléments réactifs en l'occurrence des inductances et des Condensateurs.

## ❖ Filtre passif

Le plus ancien pour le traitement des harmoniques de courant. Il consiste à piéger les courants harmoniques pour empêcher qu'ils ne se propagent dans le reste du réseau.

## ❖ Filtre passif série

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

## ❖ Filtre passif parallèle

Le filtre passif parallèle est constitué d'une inductance en parallèle avec un condensateur. Il présente une impédance faible pour toutes les harmoniques et une impédance suffisamment importante par rapport au fondamental, ce qui empêche les courants harmoniques de se propager vers le réseau [10].

### 1.6.2 Solutions modernes

#### • Solutions modernes à base d'électronique de puissance

Les progrès remarquables réalisés d'une part dans le domaine des composants semi-conducteurs, comme les IGBT, IGCT, GTO et MOSFET, ainsi que la maîtrise de leur mise en oeuvre et d'autre part l'existence de nouvelles méthodes de traitement analogique et numérique du signal, ont permis l'émergence de moyens modernes et efficaces pour faire face aux différentes perturbations (harmoniques, puissance réactive, fluctuations, creux de tension) affectant les systèmes électriques.

Parmi ces moyens modernes, nous pouvons citer : les filtres actifs : parallèles, séries, hybrides et combinaisons des structures.

#### • Filtres actifs

Les principes de base des filtres actifs (compensation active) pour les harmoniques perturbateurs ont été proposés autour de la décennie de 1970. Depuis, beaucoup de recherches ont été développées sur ces systèmes et leurs applications pratiques.

# Chapitre 01 : Perturbations et solutions envisagées pour la Dépollution dans les installations électriques

Traditionnellement, un filtre passif est utilisé pour éliminer les harmoniques, cependant cet équipement de compensation comporte certains inconvénients. Pour cela, les filtres actifs ont été proposés pour bien améliorer la qualité de l'énergie électrique. Une des applications principales de filtres actifs est l'élimination ou la réduction des harmoniques de courant et de tension. Le principe du filtrage actif est de compenser les harmoniques présentes sur les réseaux électriques en injectant des harmoniques de même amplitude mais en opposition de phase. Le circuit d'alimentation dans le diagramme généralisé peut être connecté en configuration parallèle, série ou hybride.

- **Filtre actif série (FAS)**

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

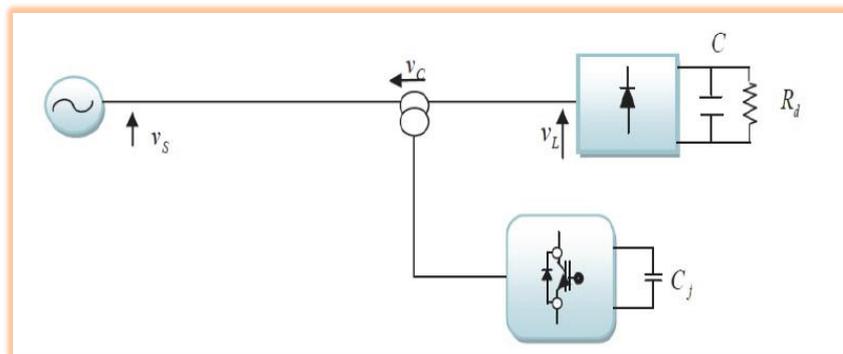


Figure. 1. 4. Filtre actif série [10].

- **Filtre actif parallèle (FAP)**

Le FAP, permet, avec une commande appropriée, de neutraliser les courants harmoniques des charges polluantes et de compenser les déséquilibres et les courants réactifs. Le FAP se connecte en parallèle avec le réseau harmonique des courants absorbés par les charges non linéaires connectées au réseau. Ainsi, le courant fourni par la source.

# Chapitre 01 : Perturbations et solutions envisagées pour la Dépollution dans les installations électriques

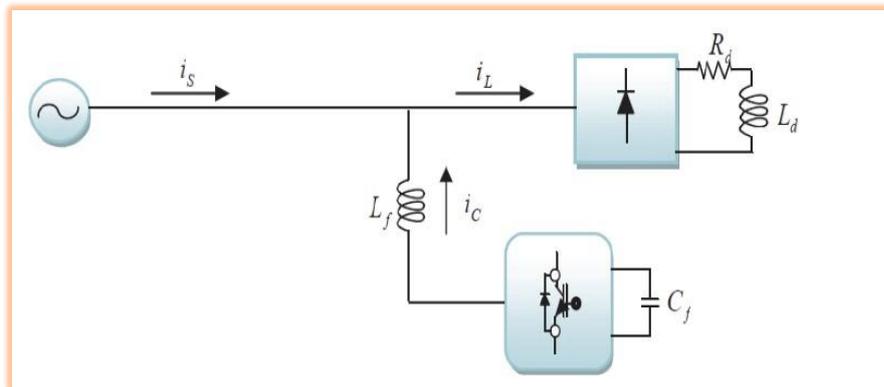


Figure. 1. 5. Filtre actif parallèle [10].

- **Filtre actif hybride**

Connecté avec ou sans transformateurs au réseau, le filtre actif hybride est constitué d'un filtre passif connecté directement en série avec le filtre actif, ce qui entraîne une diminution de la tension du bus continu comparativement à celle d'un filtre actif pur et une réduction du dimensionnement du filtre hybride. En plus, le filtre passif n'évite pas les oscillations dues à la commutation car il présente une haute impédance à cette fréquence. Cependant, la mise en place d'une inductance à l'entrée de la charge non linéaire est indispensable pour le bon fonctionnement du filtre hybride.

- **Les systèmes Facts**

Les systèmes de transmission en courant alternatif flexibles, terme traduit de l'anglais "Flexible Alternating Current Transmission systems (FACTS)", peuvent contribuer à faire face aux problèmes rencontrés dans l'exploitation des réseaux électriques. Le concept FACTS, introduit en 1986 par l'Electric power research Institute (EPRI), regroupe l'ensemble des dispositifs basés sur l'électronique de puissance qui permettent d'améliorer l'exploitation d'un réseau électrique. Son développement est étroitement lié aux progrès réalisés dans le domaine des composants semi-conducteurs de puissance et plus particulièrement des éléments commandables tels que le thyristor et le thyristor GTO. Des études et des réalisations pratiques ont mis en évidence l'énorme potentiel des dispositifs FACTS [6]. Plusieurs types de FACTS, avec des architectures et des technologies différentes, ont été développés. Parmi eux, les plus connus sont le SVC (Static Var Compensator), le STATCOM (Static Synchronous Compensator), le TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) et l'UPFC (Unified Power Flow Controller). Décrit les schémas de principe de ces structures. Chacune d'elle

# Chapitre 01 : Perturbations et solutions envisagées pour la Dépollution dans les installations électriques

---

possède ses propres caractéristiques et peut être utilisée pour répondre à des besoins bien précis.

Dans un réseau électrique, les FACTS permettent de remplir des fonctions tant en régimes stationnaires qu'en régimes transitoires. Ils agissent généralement en absorbant ou en fournissant de la puissance réactive, en contrôlant l'impédance des lignes ou en modifiant les angles des tensions. Les dispositifs FACTS sont utilisés principalement dans les contextes suivants :

- ✓ Limitation des variations de la tension à une valeur assignée en un point du réseau et ce, quelles que soient les variations de la charge.
- ✓ Augmentation de la réserve de stabilité transitoire.
- ✓ Atténuation des oscillations de puissance.
- ✓ Contrôle des transits de puissance sur les lignes et liaisons afin de réduire les surcharges.

Le mode de connexion au réseau est une caractéristique essentielle qui détermine en grande partie le mode d'action d'un dispositif FACTS. On distingue ainsi les classes suivantes :

- les dispositifs FACTS shunt (parallèle).
- les dispositifs FACTS série.
- les dispositifs FACTS combinés série-parallèle [11].

## 1.7 Prélèvement Sinusoïdal

Le prélèvement d'un courant sinusoïdal engendre une nouvelle structure de conversion AC/DC, différente de la version classique, où le courant peut être contrôlé. Les techniques de prélèvement sinusoïdal s'appliquent aux structures monophasées et triphasées. Dans ce contexte, une seule structure a été développée et présentée dans la littérature, ayant pour objectif d'assurer un facteur de puissance unitaire [12].

### 1.7.1 Correction du facteur de puissance

La structure de base du convertisseur AC/DC avec correction du facteur de puissance ainsi que son principe de commande sont illustrés sur la figure I.6. Il s'agit d'un redresseur en pont à diodes connecté au réseau au doté d'un étage de correction placé entre la sortie du pont et la charge. Cet étage de correction du facteur de puissance basé sur une structure d'hacheur élévateur comprend une inductance un interrupteur de puissance à double commande (IGBT, MOSFET) et une diode de puissance. Cet ensemble est mis en parallèle avec le condensateur

# Chapitre 01 : Perturbations et solutions envisagées pour la Dépollution dans les installations électriques

du bus continu. Le convertisseur AC/DC ainsi obtenu, constitue une structure élévatrice et non réversible, mettant en jeu un seul interrupteur commandable [13].

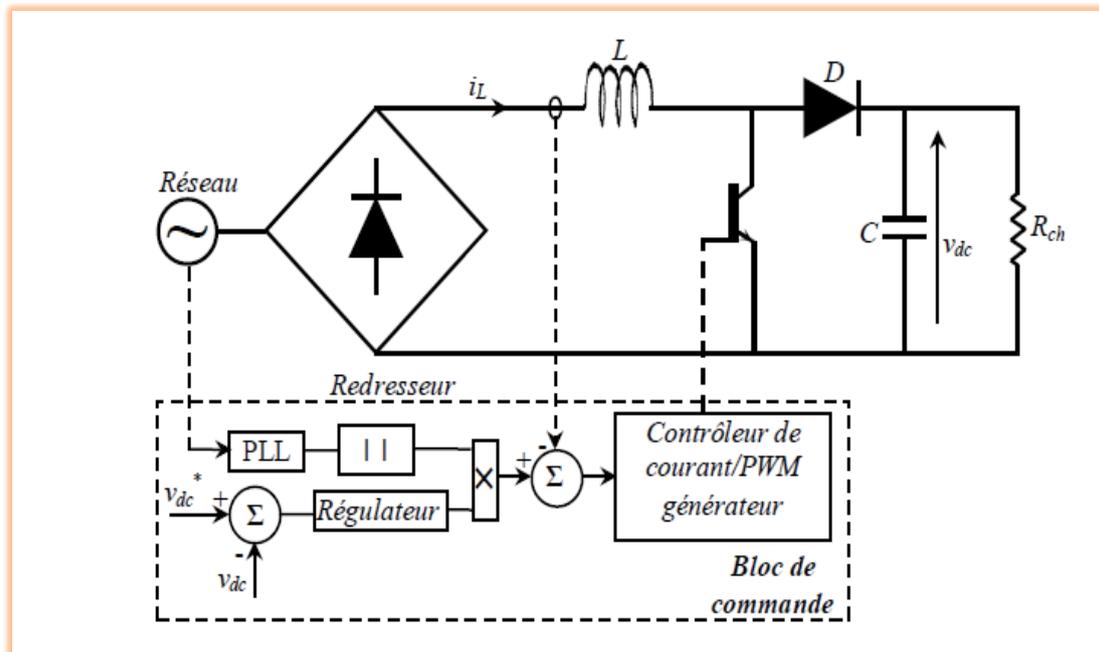


Figure. 1. 6. Structure et principe de commande d'un convertisseur AC/DC avec PFC [13].

## 1.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé la qualité de l'énergie et présenté les différents types de perturbations qui affectent l'onde de tension dans le réseau, et la problématique des harmoniques et déséquilibres qui affectent la qualité de l'énergie en identifiant les causes, les origines et les conséquences des harmoniques sur les différents composants du réseau. Nous avons présenté également les solutions traditionnelles et modernes en mettant en évidence tout ce qui améliore la qualité de l'énergie sur laquelle nous travaillerons au deuxième chapitre particulièrement la correction du facteur de puissance.

---

# *Chapitre 02*

*Présentation et simulation sous  
MATLAB/Simulink de la commande  
classique du PFC*

---

## Chapitre 02 : Présentation et simulation sous MATLAB/Simulink De la commande classique du PFC

### 2.1 Introduction

Les redresseurs monophasés commandés à absorption sinus assurent le redressement d'une tension réseau monophasée à une tension DC réglable tout en formant le courant d'entrée pour être sinusoïdal et en phase avec la tension du réseau. En général, les circuits actifs sont plus efficaces, plus légers et moins chères que les circuits passifs. La Correction du Facteur de Puissance (PFC) devient de plus en plus demandée dans la plus part des applications industrielles. Plusieurs structures et techniques sont proposées et analysées pour améliorer la forme de l'onde du courant de ligne pour des structures monophasées. Nous allons étudier dans ce chapitre le PFC qui doit permettre d'absorber sur le réseau un courant le plus sinusoïdal possible avec un minimum de déphasage entre le fondamental du courant absorbé et la tension du secteur [4], [2].

### 2.2 Présentation du convertisseur monophasé non contrôlé de type AC/DC

Le redresseur à double alternance monophasé est un convertisseur redressant les alternances négatives et conservant les alternances positives d'une entrée monophasée. La fréquence en sortie du redresseur est alors le double de la fréquence d'entrée. Ce type de redresseur est réalisé en utilisant un montage en pont de Graëtz avec des diodes (figure 1). Le pont de Graëtz est constitué de quatre (4) diodes, dans ce chapitre, les diodes sont assimilées à des interrupteurs.

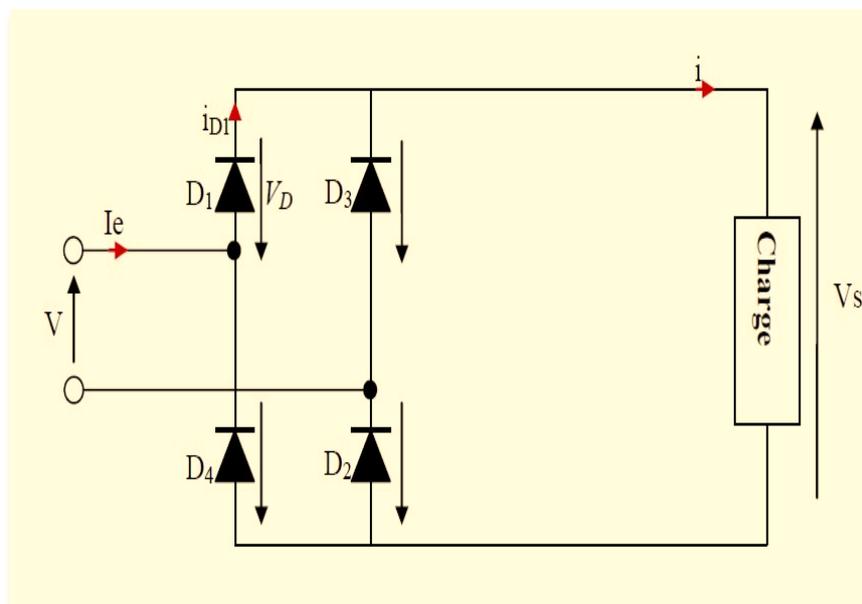


Figure. 2. 1. Redresseur avec pont de Graëtz [14].

## Chapitre 02 : Présentation et simulation sous MATLAB/Simulink De la commande classique du PFC

---

$V$  : est la tension d'entrée du pont.

$V_S$  : est la tension de sortie.

$R$  : est la charge résistive.

### Analyse du fonctionnement

- Alternance positive  $\Rightarrow$  D1 et D2 sont passantes

$$VD1 = 0 \text{ et } VD2 = 0 \quad (\text{Interrupteurs fermés})$$

Loi des mailles :

$$V - VD1 - V_S - VD2 = 0 \quad (2.1)$$

$$V - V_S = 0$$

$$V_S = V > 0$$

Loi des nœuds :

$$i = i_{D1} = I_e = V_S R \quad (2.2)$$

- Alternance négative  $\Rightarrow$  D3 et D4 sont passantes

$$VD3 = 0 \text{ et } VD4 = 0 \quad (\text{Interrupteurs fermés})$$

Loi des mailles :

$$V + VD3 + V_S + VD4 = 0 \quad (2.3)$$

$$V + V_S = 0$$

$$V_S = -V < 0$$

Loi des nœuds :

$$i = -i_e = V_S R \quad (2.4)$$

Loi des mailles D1 :

## Chapitre 02 : Présentation et simulation sous MATLAB/Simulink De la commande classique du PFC

$$v_{D1} + v_{D2} + v = 0 \quad v_{D1} = -V_s = v < 0 \quad (2.5)$$

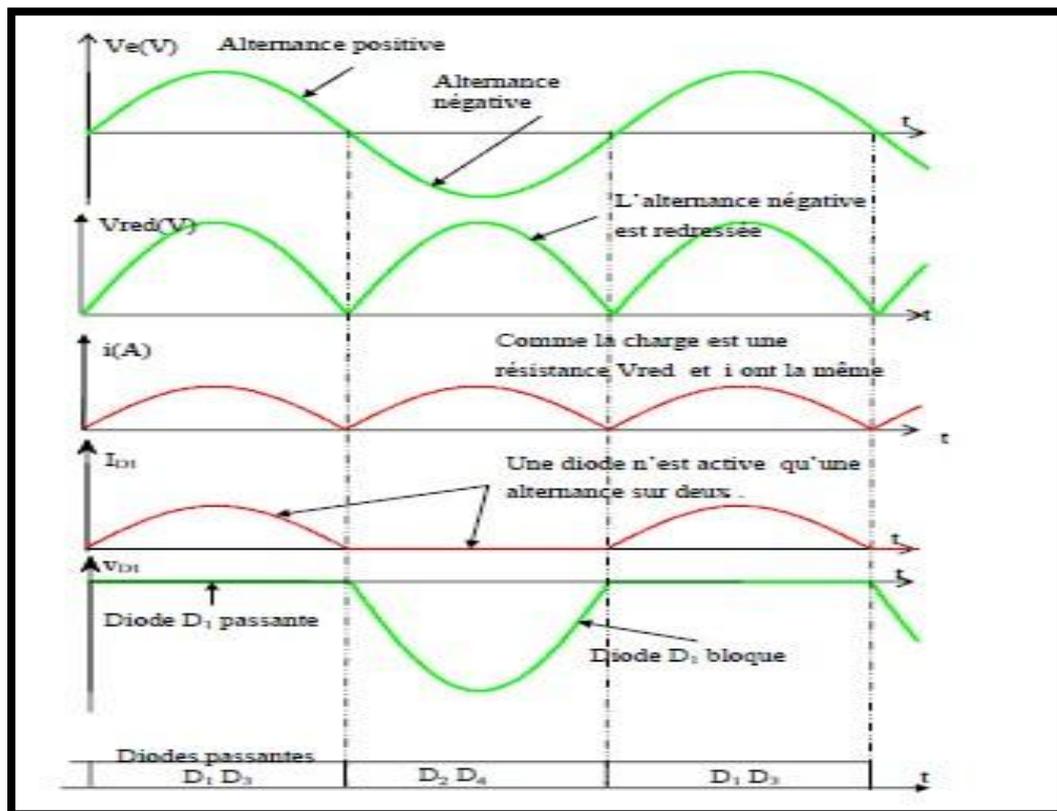


Figure. 2. 2. Fonctionnement d'un redresseur avec pont de Graëtz [14].

### 2.3 Correcteur du facteur de puissance (PFC)

Les appareils avec électronique de puissance connectés au réseau électrique nécessitent de plus en plus de corrections et sont nécessaires pour le facteur de puissance, fonctionnant contrairement à la quantité d'énergie efficace qui provient du réseau de la puissance non réactive supplémentaire qui dissipe la puissance supplémentaire dans l'alimentation électrique et les câbles. Le facteur énergétique maximal est utilisé dans la plupart des applications de l'électronique énergétique. Le problème à résoudre est la forme non verrouillée de l'onde et ses avantages sont les harmoniques. La tension et le courant qui tournent sur un réseau idéal tournent à une fréquence de 50Hz et sont dérivés d'une fréquence de base unique. Il est également appelé un consensus d'un seul ordre égal à 50hz. S'il n'y a pas d'autre fréquence dans le signal, elle est pure, bien que tous les signaux ne soient jamais

## Chapitre 02 : Présentation et simulation sous MATLAB/Simulink De la commande classique du PFC

---

parfaits proche avec d'autres fréquences, à savoir les fréquences harmoniques qui sont des multiples de 50hz [4].

### 2.4 Commande classique du système PFC

#### 2.4.1. Régulation par PI de la tension du bus continu

Le rôle de la boucle de commande est l'effort du bus continu pour maintenir cette tension à une valeur de référence fixe. Les causes sont, entre autres, la perte des interrupteurs verticaux (en conduction et en commutation) en conjonction avec la variété de la charge connectée au bus continu ajustée et régulée en ajustant la capacité de référence du courant pour contrôler la roue de puissance active entre le réseau et le bus continu. Le but est de compenser toutes les perturbations provenant du convertisseur et de la charge, ceci entraîne une variabilité dans l'énergie stockée dans le condensateur. Cette boucle contient le  $V_{dc}^*$  qui est la tension de référence et la tension mesurée en entrée vdc.

Comme ( $\varepsilon v = V_{dc}^* - V_{dc}$ )

Les composants du convertisseur qui constituent le hacheur élévateur sont parfaits et l'énergie qu'ils absorbent est faible.

$$P(1 - \cos 2\omega t) = V_{dc} i = V_{dc} (C dV_{dc}/dt + V_{dc}/R) \quad (2.6)$$

**P** : Puissance de sortie (W)

**V<sub>dc</sub>** : la tension de bus continu (v)

**I** : Courant de la diode D (A).

**C** : Condensateur de filtrage ( $\mu$ F).

**R** : Résistance de charge ( $\Omega$ ).

Supposant  $i_L \approx i_{re}$  ; Pour satisfaire la contrainte de forme de  $i_L$ .

- **Régulateur PI**

Le Régulateur Proportionnel-Intégral PI est beaucoup plus utilisé pour ses nombreux avantages à savoir : simple, exécution rapide, capacité suffisante pour une bonne réponse

## Chapitre 02 : Présentation et simulation sous MATLAB/Simulink De la commande classique du PFC

---

dynamique quand ses paramètres sont bien réglés [12]. Sa fonction de transfert est de la forme :

$$G(P) = k_p = \frac{1+T_i P}{T_i P} \quad (2.7)$$

$T_i$  : Temps d'action intégrale.

$k_p$  : Gain d'action.

Pour déterminer les paramètres du régulateur PI, on suit le développement mathématique suivant :

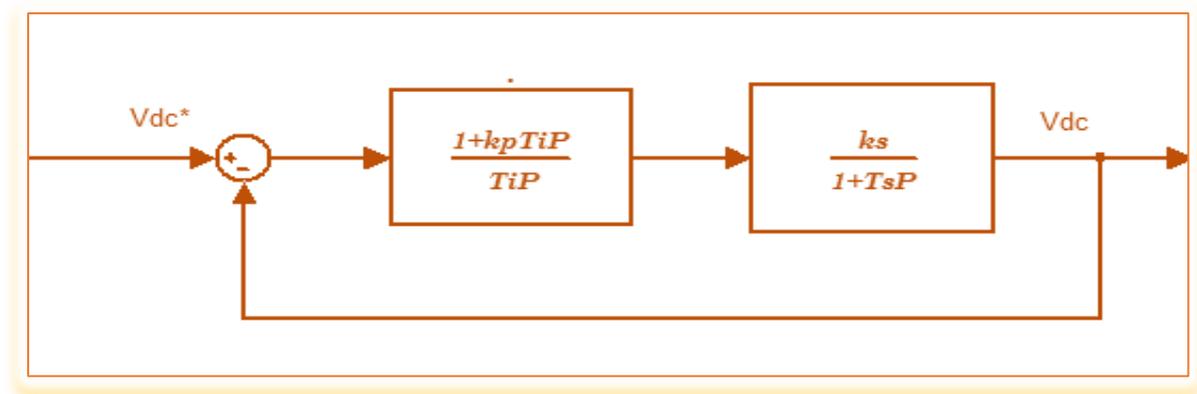
$G(p)$  est la fonction de transfert (tension de sortie/courant) obtenue par le modèle équivalent en petits signaux de basses fréquences.

$$G_v(p) = \frac{V_0}{I_{refm}} = \frac{v_{SM}}{4V_0} \frac{R}{1+\frac{R_S P}{2}} = \frac{K_S}{1+\tau_{SP}} \quad (2.8)$$

Le calcul du correcteur PI est déterminé de façon classique par compensation du pôle dominant et l'imposition d'une dynamique en boucle fermée. Nous pouvons déduire les deux paramètres du correcteur PI de la figure 2.3 comme suit :

$$\begin{cases} T_1 = \frac{R v_{SM}}{8\pi(f_{cv}) V_{ref}} \\ k_p = \frac{R C}{2T_1} \end{cases} \quad (2.9)$$

$f_{cv}$  : Fréquence de coupure de la boucle fermée de la tension du bus continu.



**Figure. 2. 3.** Représentation fonctionnelle de la boucle fermée de la tension du bus continu [4].

Le pôle et le gain sont choisis pour obtenir un gain suffisant de marge de phase ( $\approx 45^\circ$ ) et une bande passante dans la gamme de 5 à 20Hz [4].

## Chapitre 02 : Présentation et simulation sous MATLAB/Simulink De la commande classique du PFC

### 2.4.2 Contrôle par régulateur à hystérésis du courant d'entrée

Le contrôle par hystérésis fait partie des contrôles non linéaires. Il est également connu comme "tout ou rien contrôle", utilisé fortement pour la simplicité, durabilité, bon dynamisme, réponse rapide, précision et stabilité. Étant donné que cette stratégie assure le contrôle du courant sans savoir quel modèle de système à examiner, comme les entraînements électriques et les filtres actifs.

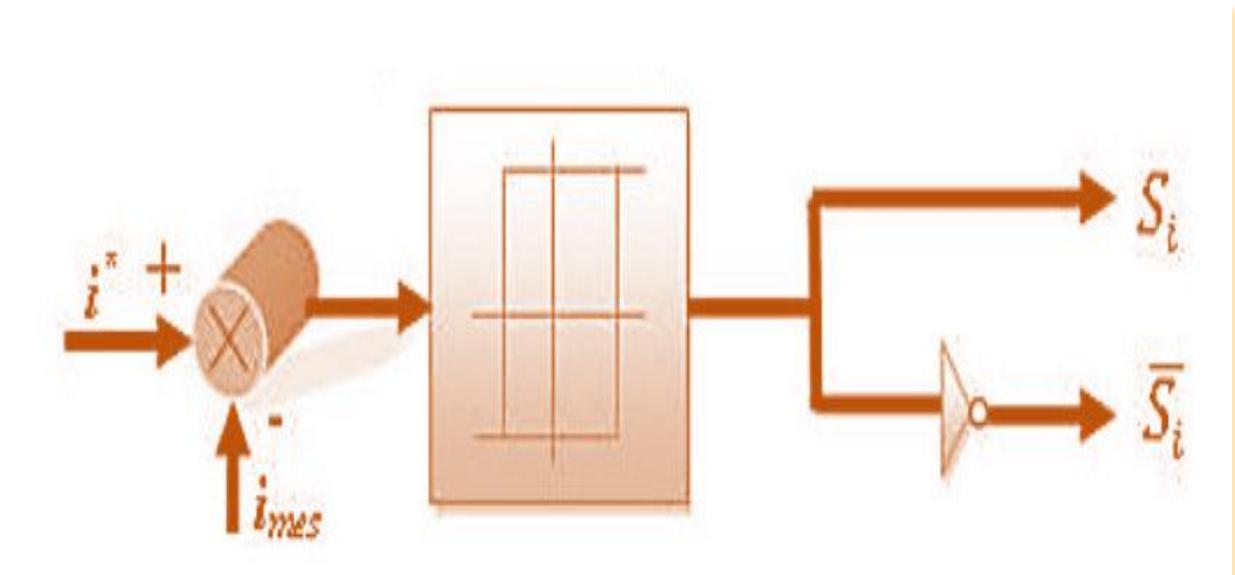


Figure. 2. 4. Principe de contrôle du courant par hystérésis [17].

$$\text{Si } \varepsilon \leq -\Delta i \Rightarrow S = 0$$

$$\text{Si } \varepsilon \geq \Delta i \Rightarrow S = 1$$

$$\text{Si } -\Delta i \leq \varepsilon \leq \Delta i \Rightarrow S \text{ garde la valeur précédente [18], [17].}$$

La **figure (2.4)** montre le principe de deux contrôles du courant qui applique la différence entre le courant de référence et la mesure à l'entrée du comparateur d'hystérésis et le contrôle du courant d'hystérésis qui consiste à maintenir le courant dans la plage de périmètre de sa référence. Chaque violation donne l'ordre de commutation.

Le seul paramètre de régulation en la matière est la bande passante hystérésis qui détermine l'erreur dans les courants et la fréquence de commutation bien qu'elle soit encore variable et inconnue. La technique de régulation à hystérésis est l'un des moyens les plus pratiques de contrôle. Le principe de génération de commande par hystérésis est montré à la **figure (2.5)**.

## Chapitre 02 : Présentation et simulation sous MATLAB/Simulink De la commande classique du PFC

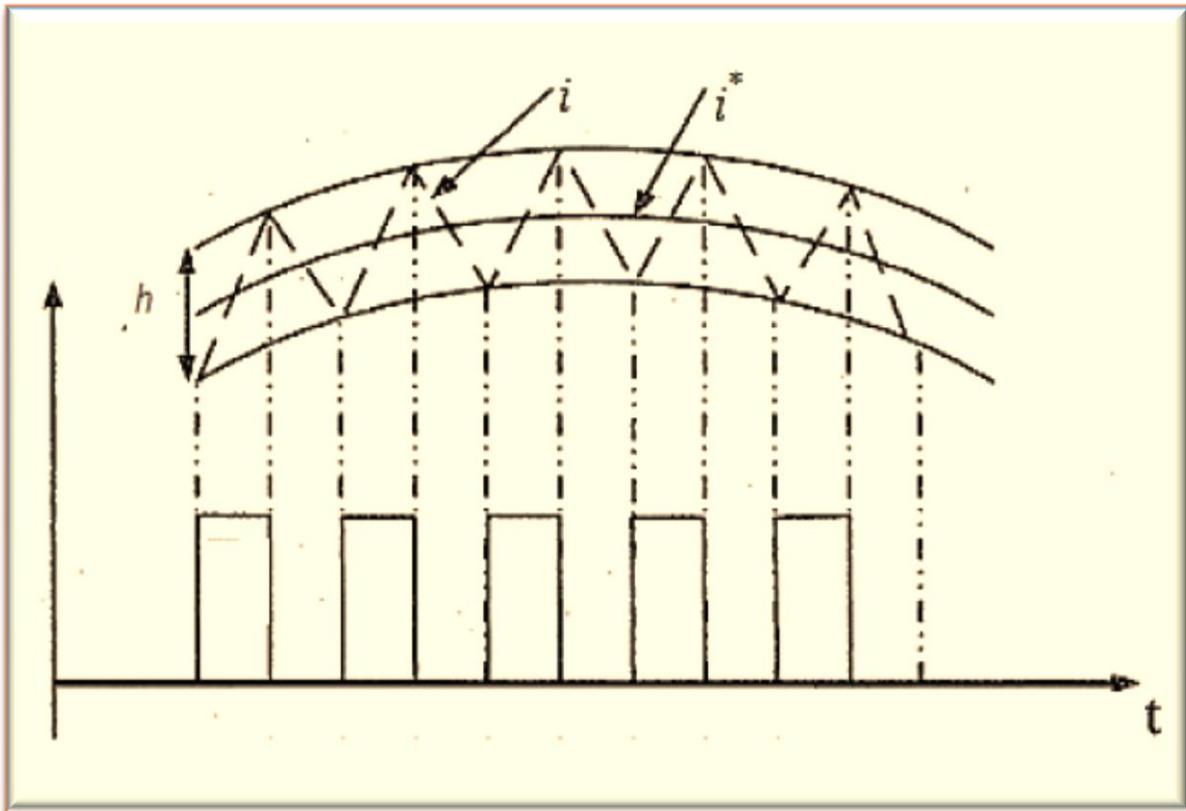


Figure. 2. 5. Principe de délivrance des ordres de commande [17].

### 2.5 Simulation de la commande classique du PFC

La simulation du système PFC de la figure 2.6 a été effectuée sous logiciel MATLAB/Simulink dont les paramètres de simulation sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau.2.1 Paramètres de simulation.

| Paramètres               | Symbole | Valeur         |
|--------------------------|---------|----------------|
| Tension de source        | Vs      | $60\sqrt{2}$ V |
| Tension de référence     | Vdc     | 150V           |
| Condensateur de filtrage | C       | 2200 $\mu$ F   |
| Résistance               | R       | 200 $\Omega$   |
| Inductance               | L       | 10mH           |
| Fréquence                | f       | 50Hz           |

## Chapitre 02 : Présentation et simulation sous MATLAB/Simulink De la commande classique du PFC

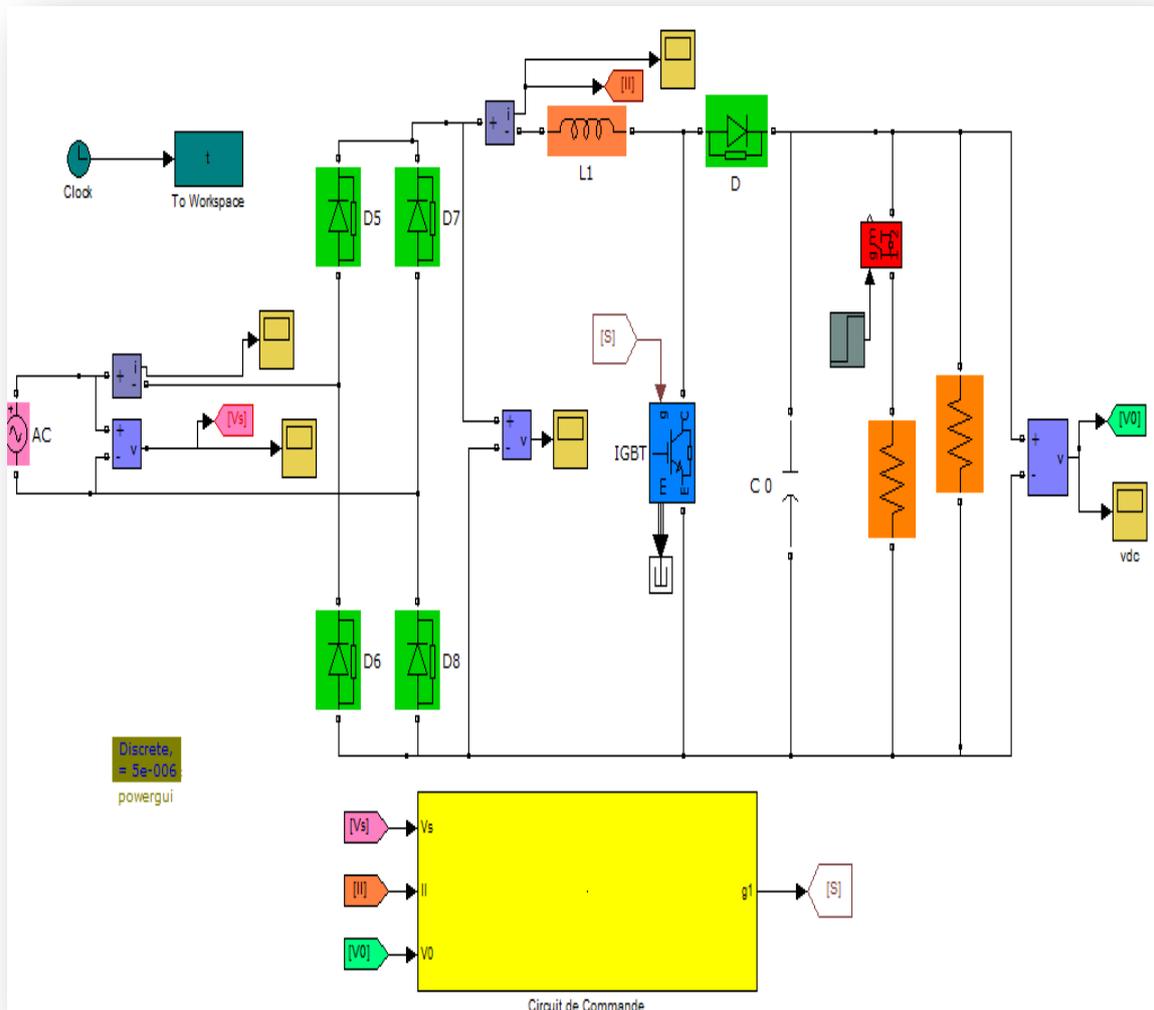


Figure. 2. 6. Schéma bloc de la simulation de la commande classique du PFC.

La commande de l'interrupteur de puissance du PFC est liée à la régulation de la tension de sa sortie d'une part et au système PLL d'autre part. Ces deux dispositifs assurent la délivrance du courant de référence du PFC. L'écart entre ce courant et le courant de la ligne va traverser le régulateur à hystérésis pour garantir la bonne maîtrise de l'interrupteur du PFC [12], [21].

### 2. 5. 1. Résultats de simulation

Les figure suivant représenté les résultats de simulation de la commande PFC classique

La tension de bus conti avec sa référence.

## Chapitre 02 : Présentation et simulation sous MATLAB/Simulink De la commande classique du PFC

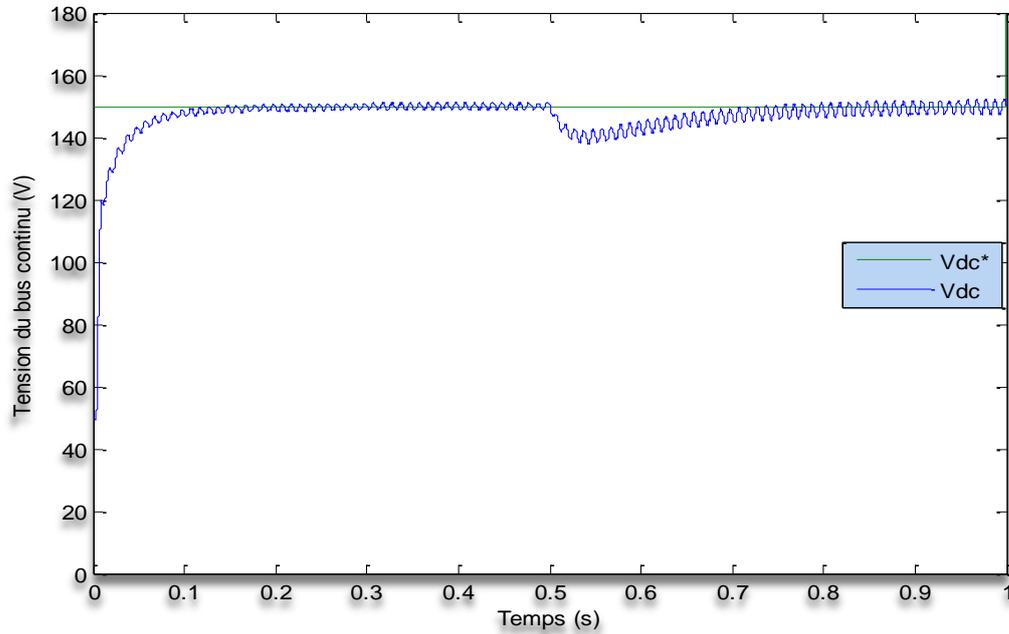


Figure. 2. 7. Tension de sortie (Vdc) avec sa tension de référence (Vdc\*).

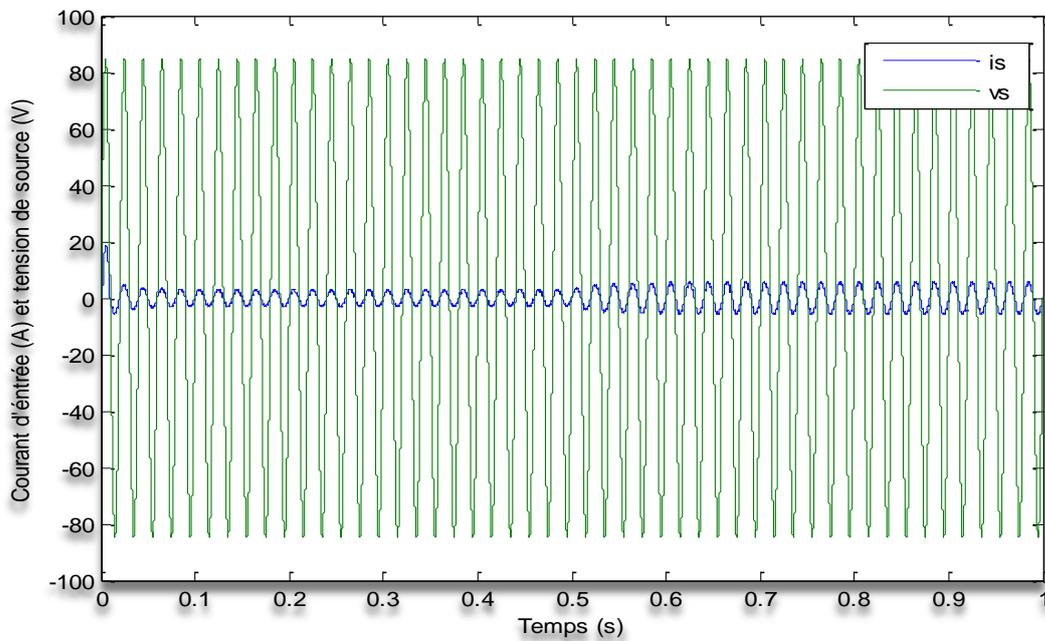


Figure. 2. 8. Courant d'entrée (is) et tension de source (Vs).

## Chapitre 02 : Présentation et simulation sous MATLAB/Simulink De la commande classique du PFC

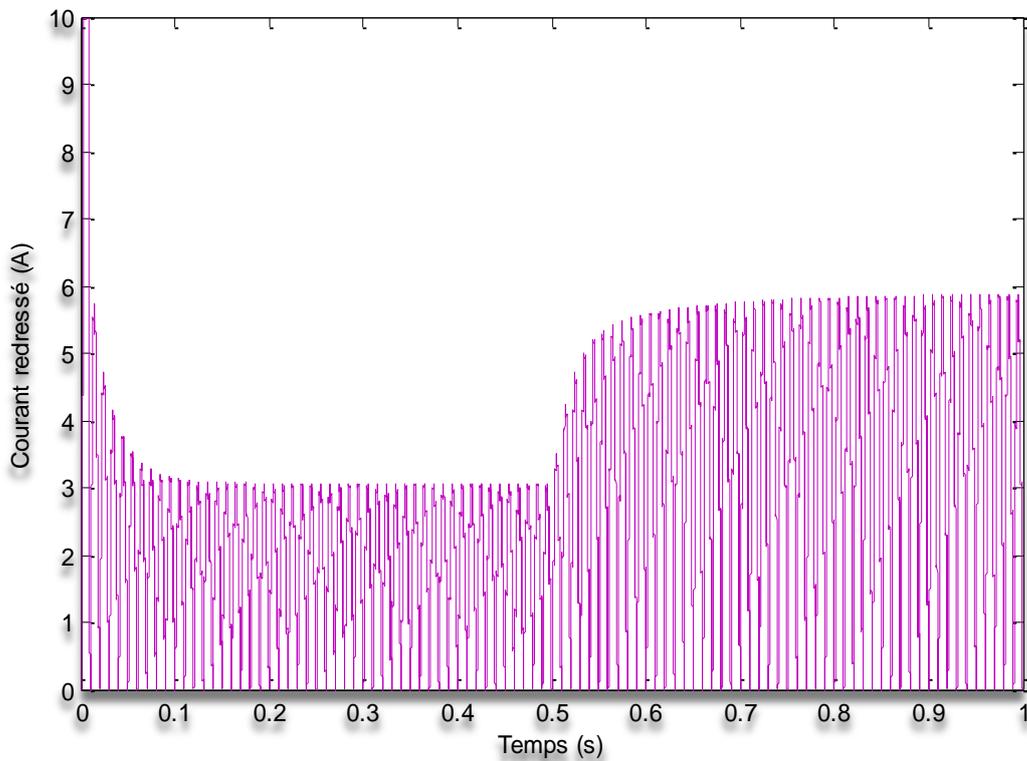


Figure. 2. 9. Courant redressé (IL).

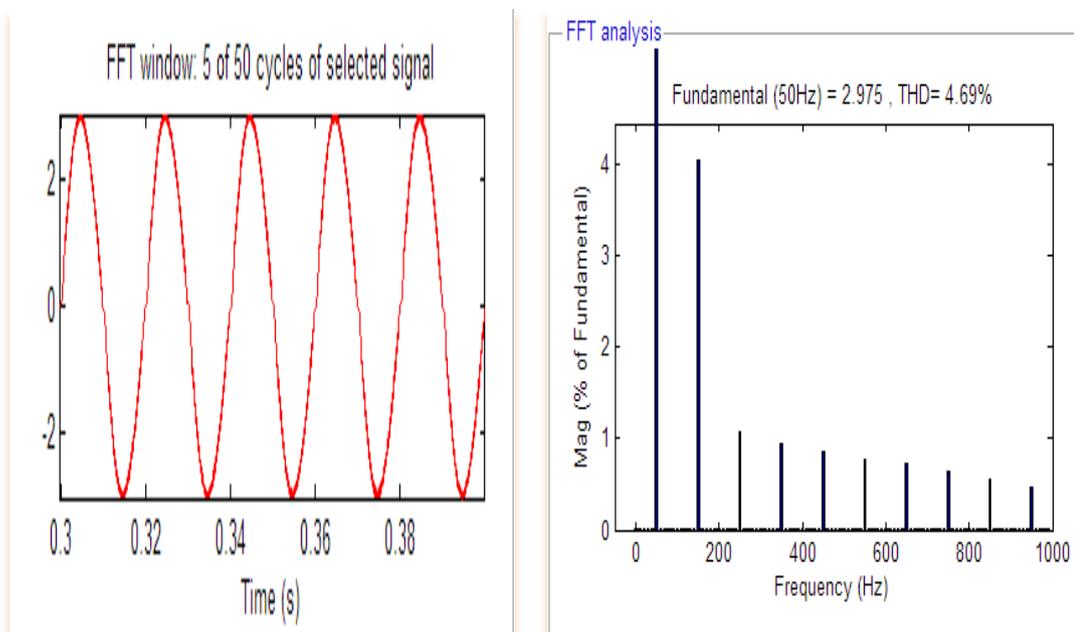


Figure. 2. 10. THD du courant de source.

## **Chapitre 02 : Présentation et simulation sous MATLAB/Simulink De la commande classique du PFC**

---

### **Commentaires**

Les figures précédentes montrent respectivement la tension du bus continu, les formes d'onde du courant de la source et de la tension de source, le courant redressé et l'analyse spectrale du courant d'entrée après simulation. La tension de sortie  $V_{dc}$  suit sa référence  $V_{dc}^*=150V$ . A l'instant 0.5s une variation de charge est appliquée où une chute est observée qui se termine après quelques secondes pour revenir à la tension de référence. De même, le courant redressé réagit positivement à ce test de robustesse. Enfin, le courant de source est en phase avec sa tension. Un THD de 4.69 % est enregistré pour ce courant de source.

De même, le courant redressé réagit positivement à ce test de robustesse. Enfin, le courant de source est en phase avec sa tension. Un THD de 4.69 % est enregistré pour ce courant de source.

### **2.6 Conclusion**

L'objectif de ce chapitre est de présenter la commande classique par régulateur PI et hystérésis en vue de contrôler la tension du bus continu et du courant absorbé pour un redresseur en pont monophasé doté d'un correcteur de facteur de puissance. Nous avons commencé par expliquer le redresseur monophasé non commandé et le correcteur de facteur de puissance. Après, nous avons discuté le régulateur PI. Ensuite, nous avons parlé du contrôle par régulateur à hystérésis du courant d'entrée. La simulation du PFC a été présentée dans ce chapitre et les résultats ont été donnés. Ces derniers montrent une amélioration de la qualité d'énergie du système étudié alors que la fréquence de commutation du système et variable. Pour cela, nous proposerons dans le prochain chapitre une solution basée sur l'utilisation du régulateur à hystérésis adaptatif.

---

# *Chapitre 03*

*Présentation et simulation sous  
MATLAB/Simulink de la commande  
Améliorée du PFC*

---

# Chapitre 03 : Présentation et simulation sous MATLAB/Simulink De la commande Améliorée du PFC

## 3.1 Introduction

Aujourd'hui, un grand nombre d'appareils électroniques de faible puissance est largement utilisé dans les domaines industriels. Ces appareils sont des charges non-linéaires qui peuvent causer de graves interférences dans le réseau. Cela détériore la qualité de la tension, la forme de l'onde de courant et engendre des pertes d'énergie accrues. Le contrôle par hystérésis traditionnel est facile. Le principal inconvénient de ce genre de commande consiste en la fréquence de commutation variable [16]. En vue de régler ce problème, nous avons étudié dans ce chapitre la commande par hystérésis adaptative avec présentation de ses principes ainsi que la simulation par le logiciel MATLAB/Simulink.

## 3. 2 Présentation du principe de la commande à hystérésis adaptative

La technique de commande par hystérésis s'est avéré la plus appropriée et la plus solide pour sa simplicité de mise en œuvre, sa durabilité et sa stabilité. L'hystérésis conventionnelle est remplacée par hystérésis adaptative qui maintient la fréquence de commutation dans une plage très étroite centrée autour de sa valeur moyenne programmée comme le montre la figure (3.1) [18], [19].

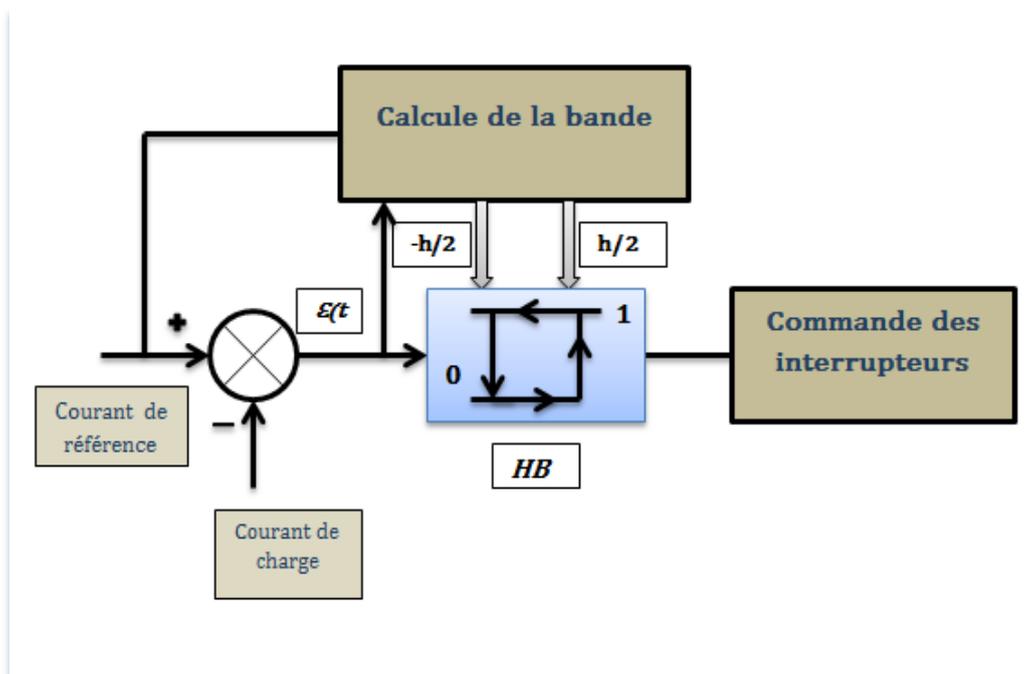
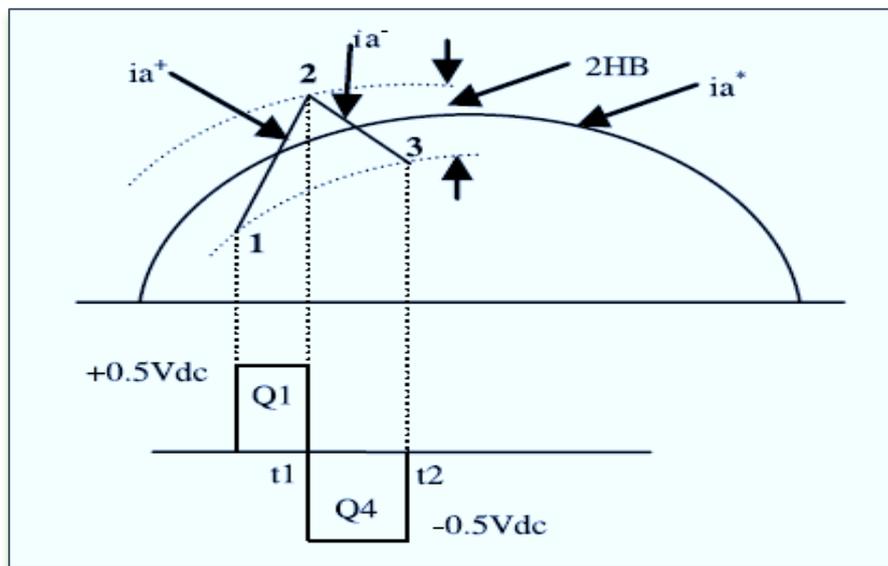


Figure. 3. 1. Principe de la commande par hystérésis avec bande adaptative [20].

## Chapitre 03 : Présentation et simulation sous MATLAB/Simulink De la commande Améliorée du PFC

### 3.3 Calculateur de la bande à hystérésis adaptative

Pour améliorer les propriétés de contrôle du courant du PFC par hystérésis en termes de processus de fréquence de commutation fixe, nous faisons une adaptation hystérésis de la bande passante en utilisant un algorithme d'équation mathématique qui est dérivé d'une expression constante de fréquence de commutation et dépend de la bande à hystérésis selon les critères suivants : la variation du courant de compensation instantanée ; la tension d'alimentation et celle du bus continu. Pour cela, la fréquence de commutation désirée sera déduite facilement de l'expression de la bande d'hystérésis comme suit :



**Figure. 3. 2.** Contrôleur de courant avec hystérésis adaptative [20].

Les équations suivantes de conception peuvent être écrites dans les intervalles de commutation  $t_1$  et  $t_2$  comme suit :

$$\frac{di_a^+}{dt} = \frac{1}{L}(0.5V_{dc} - V_s) \quad (3.1)$$

$$\frac{di_a^-}{dt} = -\frac{1}{L}(0.5V_{dc} + V_s) \quad (3.2)$$

Où  $L$  représente l'inductance d'entrée.

$i_a^+$  et  $i_a^-$  : représentées segments de courants montants et descendants respectivement.

A partir la géométrie de la figure (3.2), on peut écrire :

$$\frac{di_a^+}{dt} t_1 - \frac{di_a^*}{dt} t_1 = 2HB \quad (3.3)$$

$$\frac{di_a^-}{dt} t_2 - \frac{di_a^*}{dt} t_2 = -2HB \quad (3.4)$$

## Chapitre 03 : Présentation et simulation sous MATLAB/Simulink De la commande Améliorée du PFC

$$t_1 + t_2 = T_c = 1/f_c \quad (3.5)$$

Où :  $t_1$  et  $t_2$  sont les intervalles de commutation respectifs, et  $f_c$  est la fréquence de modulation. En ajoutant (3.3) et (3.4) et en remplaçant dans (3.5) on peut écrire :

$$\frac{di_a^+}{dt} t_1 - \frac{di_a^-}{dt} t_2 - \frac{1}{f_c} \frac{di_a^*}{dt} = 0 \quad (3.6)$$

En soustrayant (3.3) de (3.4), on obtient :

$$\frac{di_a^+}{dt} t_1 - \frac{di_a^-}{dt} t_2 - (t_1 - t_2) \frac{di_a^*}{dt} = 4HB \quad (3.7)$$

En soustrayant (3.6) de (3.7) et par simplification :

$$\frac{di_a^+}{dt} (t_1 + t_2) - (t_1 - t_2) \frac{di_a^*}{dt} = 4HB \quad (3.8)$$

En remplaçant (3.2) dans (3.6) et en simplifiant :

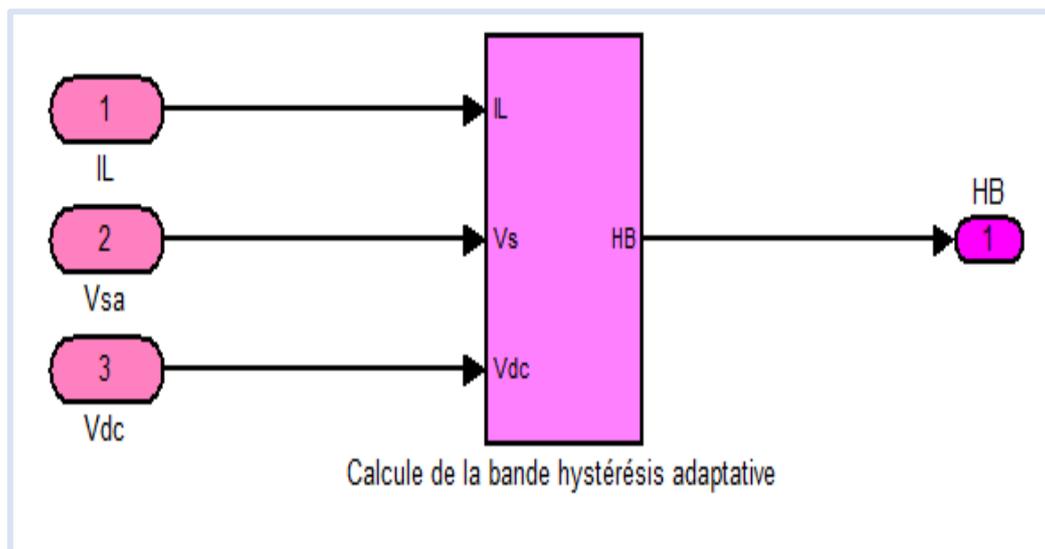
$$(t_1 - t_2) = \frac{di_a^*/dt}{f_c(di_a^+/dt)} \quad (3.9)$$

En remplaçant (3.9) dans (3.8) cela donne :

$$HB = \left\{ \frac{0.125V_{dc}}{Lf_c} \left[ 1 - \frac{4L^2}{V_{dc}^2} \left( \frac{V_s}{L} + m \right)^2 \right] \right\} \quad (3.10)$$

Avec :  $m = \frac{di_a^*}{dt}$  pente des signaux de courant de référence [20], [21].

Il est à signaler que cet algorithme avec ces relations s'appliquent au filtre actif. Nous avons appliqué le changement de variables suivant :  $I_f \Rightarrow I_L$  et  $L_f \Rightarrow L_L$  dont tout a été testé sur PFC.



**Figure.3.3.** Schéma illustrant le calcul de la bande d'hystérésis adaptative.

La logique de commutation des interrupteurs pour notre système est donnée comme suit :

## Chapitre 03 : Présentation et simulation sous MATLAB/Simulink De la commande Améliorée du PFC

- L'interrupteur supérieur à l'état ON et l'interrupteur inférieur à l'état OFF si :  $(i^*L - icrél) \leq HB$ .
- L'interrupteur supérieur à l'état OFF et l'interrupteur inférieur à l'état ON si :  $(i^*L - icrél) \geq HB$ .

La figure 3.4 représente le schéma de blocs illustratif du comparateur à hystérésis adaptatif utiles pour le contrôle du courant du PFC [19].

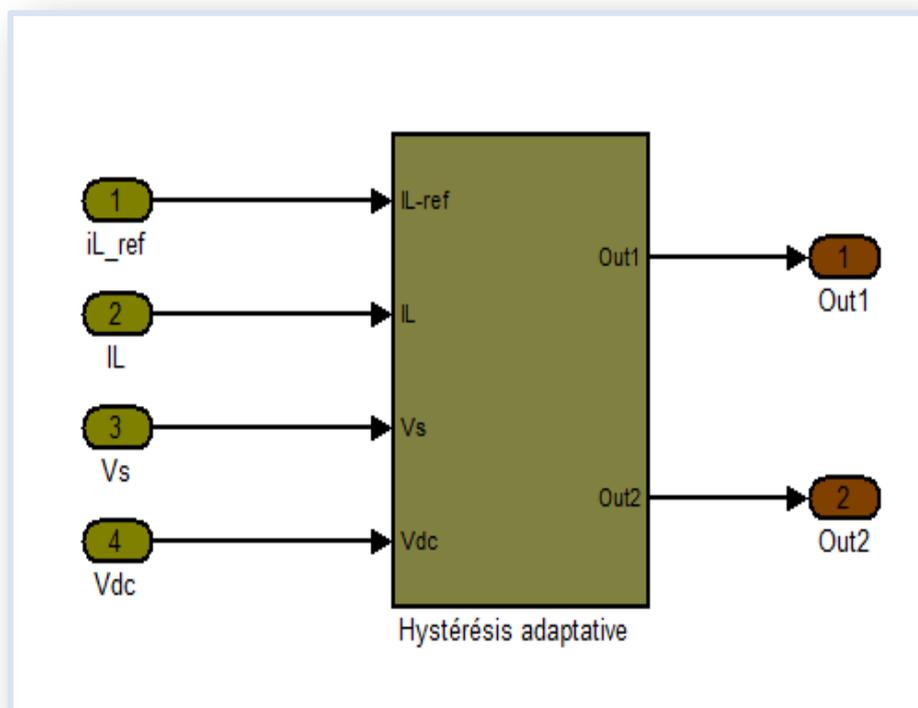


Figure.3.4. Schéma bloc expliquant l'hystérésis adaptative.

### 3.4 Simulation de la commande adaptative étudiée

Nous allons simuler la correction du facteur de puissance basée sur la commande à hystérésis adaptative en utilisant le logiciel MATLAB/Simulink comme le montre la figure (3.5). Les mêmes paramètres de simulation utilisés pour la commande classique du PFC ont été conservés pour la commande adaptative du PFC avec imposition d'une fréquence de commutation égale à 50 KHz.

# Chapitre 03 : Présentation et simulation sous MATLAB/Simulink De la commande Améliorée du PFC

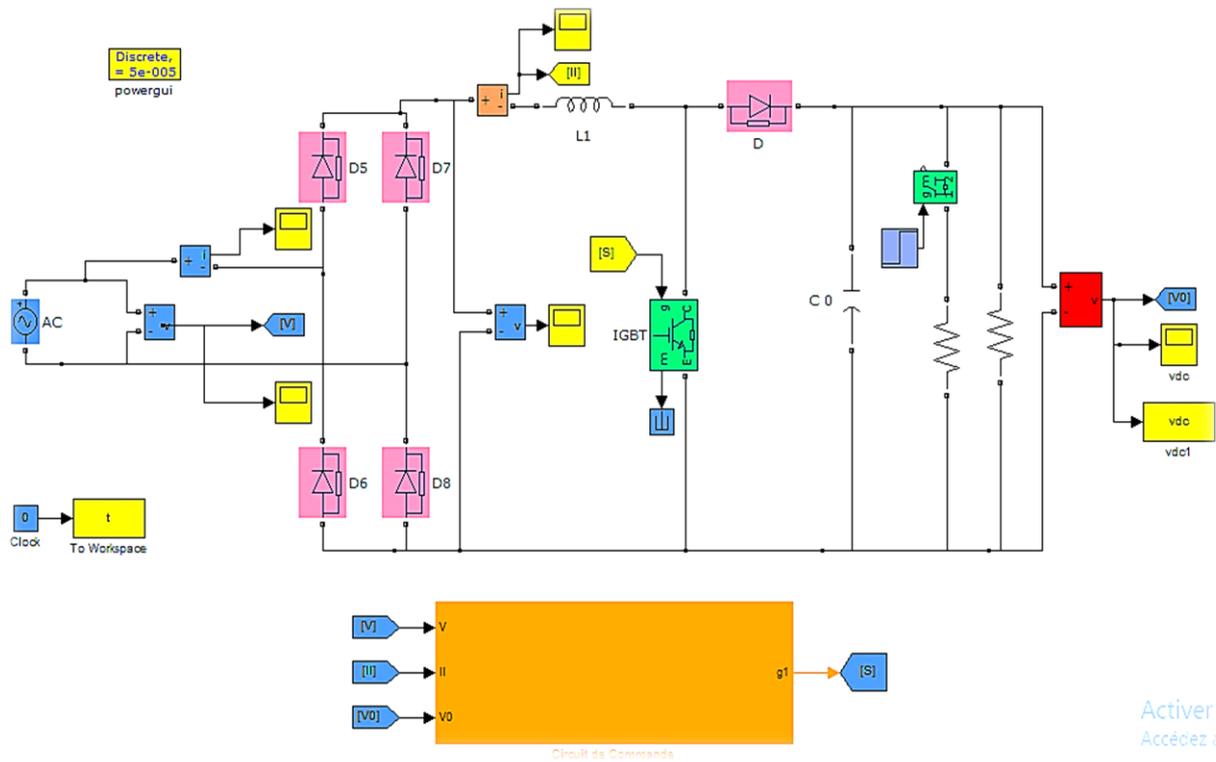


Figure.3. 5. Schéma de simulation sous MATLAB de la commande à hystérésis adaptative proposée.

## 3. 5 Résultats de simulation et interprétations

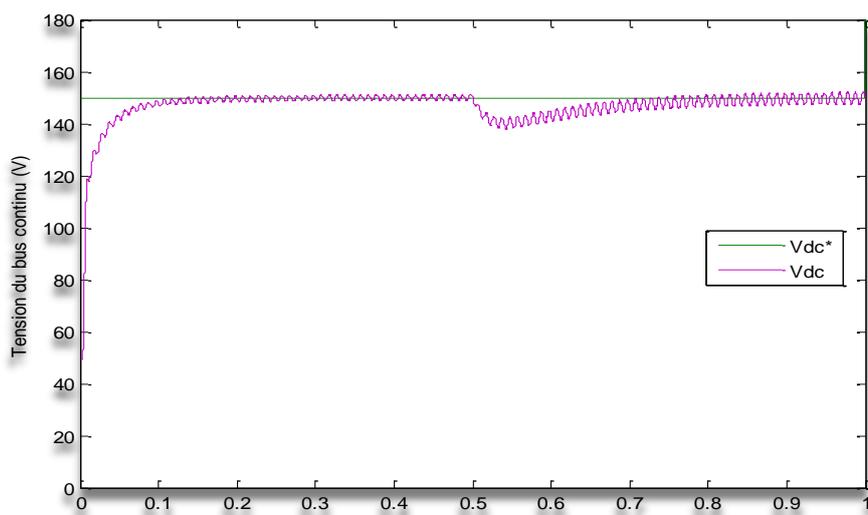


Figure. 3. 6. Tension de sortie (Vdc) avec sa tension référence (Vdc\*).

# Chapitre 03 : Présentation et simulation sous MATLAB/Simulink De la commande Améliorée du PFC

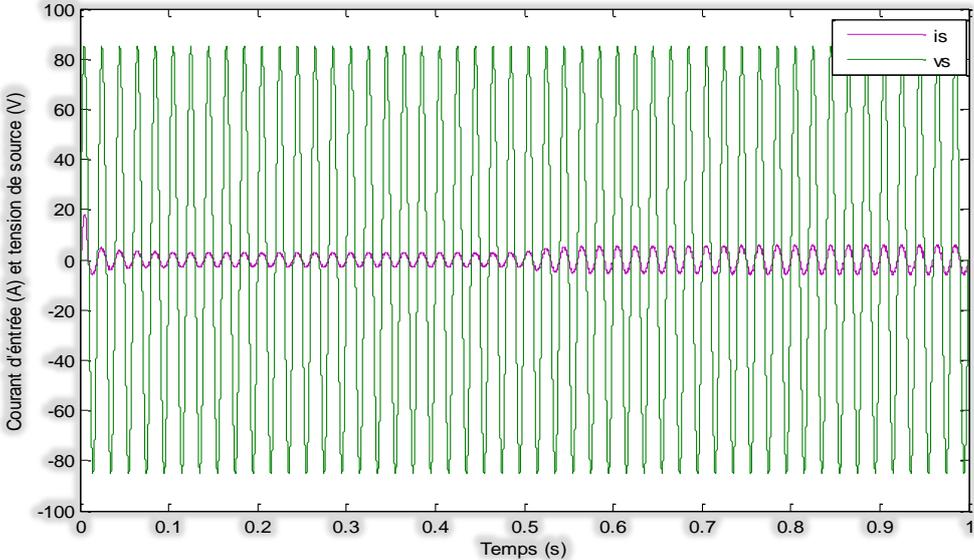


Figure. 3. 7. Tension de source (Vs) avec courant de source (Is).

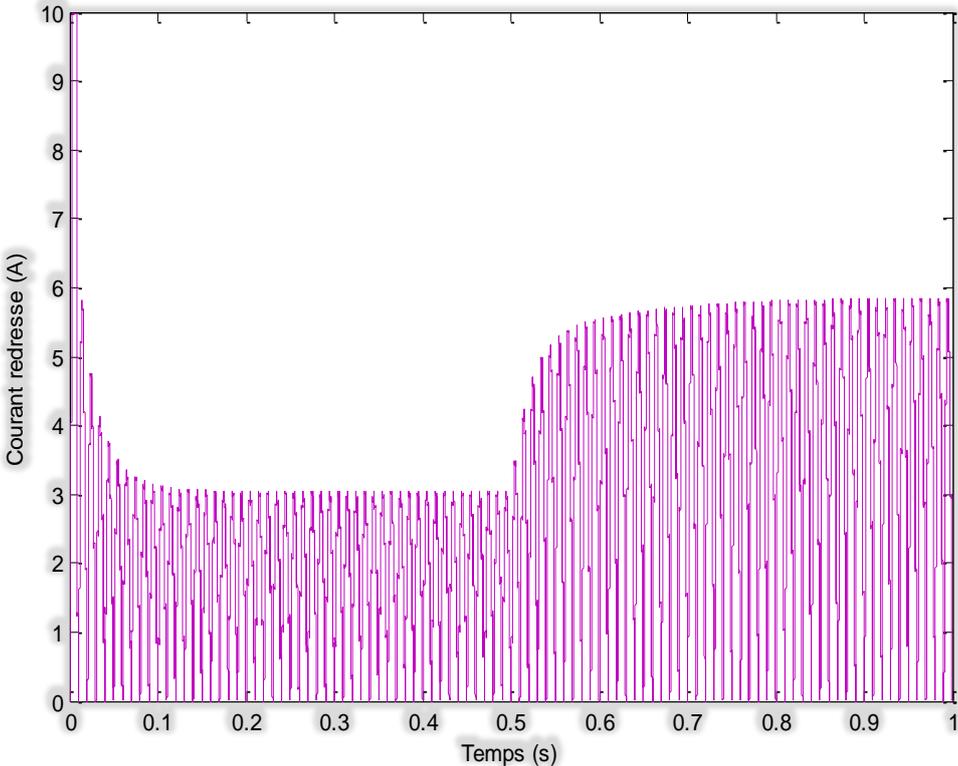
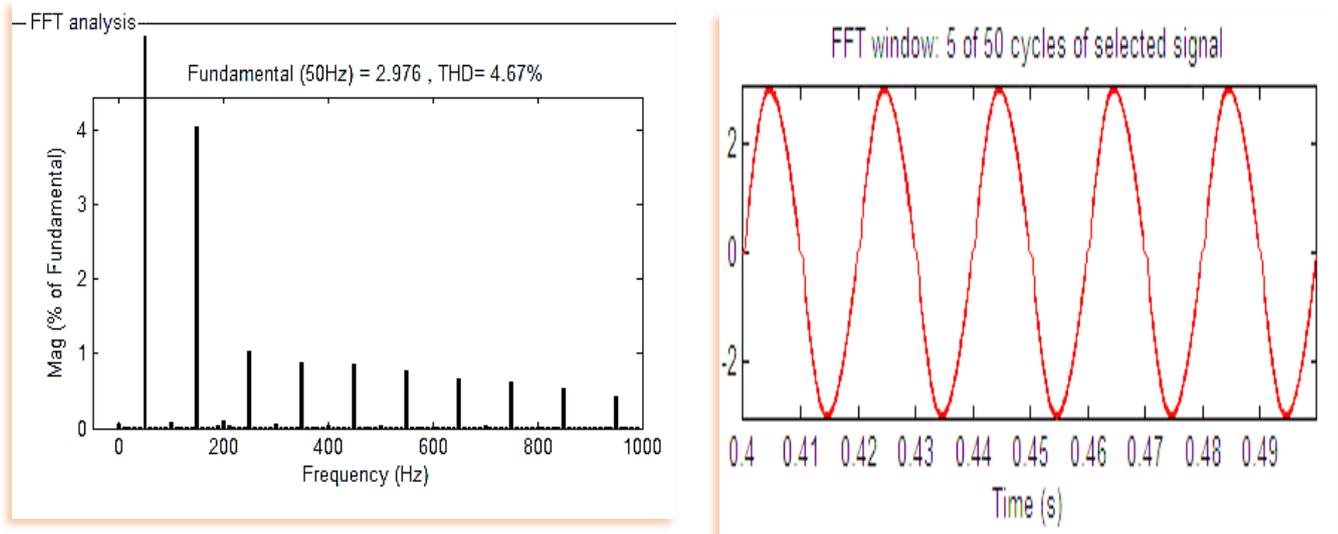


Figure. 3. 8. Courant redressé (IL).

## Chapitre 03 : Présentation et simulation sous MATLAB/Simulink De la commande Améliorée du PFC



**Figure.3. 9.** Forme et THD du courant de source.

### Commentaires

Les figures (3.6), (3.7), (3.8) et (3.9) montrent les résultats de simulation obtenus en présence de la correction du facteur de puissance contrôlé par la commande à hystérésis adaptative. On remarque que la tension du bus continu suit sa référence correctement même en cas de la variation de la charge et cela est dû au régulateur PI utilisé. Le courant de source est sinusoïdal, en phase avec la tension d'entrée et présente un THD de 4.67%. D'autre part, on peut remarquer que le courant redressé est présenté par sa forme appropriée et réagit positivement avec le test de robustesse appliqué.

### 3.6 Etude comparative des deux techniques de commande traitées

Le tableau suivant montre la différence entre les deux techniques étudiées, présentant le THD du courant de la source pour la correction du facteur de puissance pour les deux techniques étudiées dans ce mémoire de fin d'études.

**Tableau. 3.2.** Comparaison du taux de distorsion harmonique du courant.

|             | Commande classique |          | Commande adaptative |          |
|-------------|--------------------|----------|---------------------|----------|
|             | Sans PFC           | Avec PFC | Sans PFC            | Avec PFC |
| $THD_{I_s}$ | 47.20%             | 4.69%    | 47.15%              | 4.67%    |

## **Chapitre 03 : Présentation et simulation sous MATLAB/Simulink De la commande Améliorée du PFC**

---

Après examen des résultats de ce tableau, on constate que la commande adaptative du correcteur du facteur de la puissance est efficace en termes de qualité d'énergie (THD) par rapport à la commande classique dotée du régulateur à hystérésis classique.

### **3.7 Conclusion**

L'objectif de ce chapitre est de présenter la simulation par MATLAB de la commande du courant par hystérésis adaptative du PFC. Nous avons donné les principes et les calculs nécessaires pour appliquer cette technique adaptative dans le contrôle du système PFC. Cette commande a assuré le fonctionnement du PFC sous une fréquence de commutation fixe. D'autre part, le courant de la source a été présenté par une forme d'onde sinusoïdale comparativement à celle donnée par la technique classique.

---

# *Conclusion générale*

---

### Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire fait partie des solutions modernes et nouvelles visant à améliorer la qualité de l'énergie pour l'utilisateur. Dans ce travail, nous avons présenté l'étude et la simulation de la commande classique et adaptative du facteur de puissance à l'entrée d'un convertisseur monophasé non-contrôlé de type AC/DC pour réduire et éliminer les perturbations harmoniques et assurer un courant d'entrée de forme sinusoïdale. Nous avons présenté deux stratégies de contrôle pour le PFC étudié :

1. Régulation de la tension continue à la sortie du PFC par un régulateur PI classique.
2. Contrôle par hystérésis classique et adaptatif du courant.

La première stratégie de contrôle proposée dans ce travail est de contrôler le PFC par un régulateur PI et un autre à hystérésis. Ce contrôle est facile, rapide et flexible dans l'exécution, mais l'un de ses inconvénients est que sa fréquence de commutation est variable. Ensuite, nous avons proposé une nouvelle stratégie basée sur le même régulateur PI et un autre de type hystérésis adaptatif pour assurer un fonctionnement du PFC avec une fréquence de commutation fixe. Les résultats de simulation obtenus montrent la performance de la commande adaptative par rapport à celle classique dont le THD du courant d'entrée pour la première commande adaptative est meilleur (THD = 4.67%) par rapport à celui de la deuxième (THD = 4.69%).

En ce qui concerne nos aspirations futures, nous espérons appliquer d'autres méthodes avancées telles que la logique floue.

---

# *Références Bibliographiques*

---

# Références Bibliographiques

---

## Références Bibliographiques

- [1] A .Yousfi, "Amélioration de la qualité d'énergie électrique en utilisant un onduleur de tension cinq niveaux," : Université Hassiba Benbouali de Chlef, soutenance la année 2008.
- [2] N. Djafer, "Technique de correction du facteur de puissance (PFC) dans les convertisseurs AC-DC monophasé Application boost PFC," : Université Mohamed Khider de Biskra, soutenance le 25 /06/ 2018.
- [3] A. Dahmane, K. Bougeurra , "Etude et Commande d'un Convertisseur Statique AC/DC à Prélèvement Sinusoïdal," : Université Mohamed Boudiaf - M'sila, soutenance la année 2018 / 2019.
- [4] A. Kessal, "Correction du facteur de puissance à l'entrée d'un convertisseur AC/DC," thèse de doctorat : Université Farahat Abbes de Sétif, soutenance le 26/04/2012.
- [5] S. Khood, "Amélioration de la qualité de l'énergie à l'aide de compensateurs actifs série, parallèle ou conditionneurs unifiés de réseaux électriques," : Université de Nantes, Thèse de doctorat de l'école Polytechnique de l', Nantes, 2006.
- [6] C. Duffey, R. Stratford, "Update of harmonic standard IEEE-519: IEEE recommande practice and requirements for harmonic control in electric power system," IEEE Transactions on Industry Applications, vol .25. No, 6, pp. 025-1034, 1989.
- [7] S.Hdad, "Gestion de la qualité d'énergie électrique dans un réseau de transmission," Thèse Doctorat : Université Badji Mokhtae- Annaba, 2010.
- [8] A. Arora, " Solutions innovatrices pour l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique," Revue Qualité De L'énergie Electrique ABB 3/1998.
- [9] T. Gouraud, "Identification et Rejet de Probation Harmoniques dans des Réseaux de Distribution Electrique, " Thèse de Doctorat, Ecole doctorale science pour l'ingénieur de Nantes, Janvier 1997.
- [10] D. Nekkar, "Contribution à l'étude des stratégies de commande des filtres actifs Triphasés", Mémoire de Magister, : Université Mohamed Chérif Messaadia de Souk- Ahras, 2014.
- [11] Hamadi, " Contribution à l'étude des filtres hybrides de puissance utilisés pour améliorer la qualité de l'énergie dans le réseau électrique de distribution," Thèse Doctorat : Université du Québec, 2010.
- [12] S.Begag, N. Belhaouchet, L. Rahmani, "Correction du facteur de puissance d'un convertisseur AC-DC monophasé à fréquence de commutation constante," 3rd International Conference on Electrical Engineering (ICEE'09), Algérie, May 19/21/2009.

## Références Bibliographiques

---

[13] J.Jovanovic, "State-of-the-art, single-phase, active power-factor-correction techniques for high-power applications-on overview," *IEEE Trans. on Industrial Electroics.*, vol.52, no.3, pp.701-708, Jun.2005.

[14] N. Houd., Ould Elhacen. Ahmed, "Etude d'un convertisseur AC/DC à absorption sinusoïdale de courant commandé par logique floue," : Université de M'sila, soutenu en 2008 / 2009.

[15] K. Chebahi, "Etude d'une loi de commande en courant par hystérésis à bande adaptative pour un onduleur de tension," : Université Mohamed Khider de Biskra, soutenu le 07 /06/ 2019.

[16] N. Belhouchet, "Fonctionnement à fréquence de commutation constante des convertisseurs de puissance en utilisant des Techniques de commande Avancées,» Thèse de doctorat : Université Ferhat Abbas Sétif, soutenu le 06/07/2011.

[17] K. Bounab, "Correction du facteur de puissance du réseau par différentes techniques de modulation," : Université Larbi Ben M'Hidi de Oum El Bouaghi, soutenu en 2013/2014.

[18] B. K. Bose, "An adaptive hysteresis band current control technique of a voltage feed PWM inverter for machine drive system", *Electron.* 37 (5), pp. 402–406, 1990.

[19] A. Mansouri. M. Lamara, "Etude et Simulation du Filtrage Actif Parallèle Destiné à la Dépollution du Réseau Electrique," Mémoire de master : Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi, Bordj Bou Arréridj, soutenu en 2021.

[20] P. Karuppanan, K.Kanta Mahapatra, "PI and fuzzy logic controllers for shunt active power filter," *ISA Transactions*, vol.51, pp.163–169, 2012.

[21] H. R. Imani jajarmi, M. Azah, H. shareef, subiyanto, "Adaptive interval type2 fuzzy hysteresis-band current-controlled active power filter for power quality improvement," *przeгляд elektrotechniczny*, R. 90 NR 9/2014.