

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريريج

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

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département Electromécanique

## MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

**En** : Electrotechnique

**Spécialité** : Commandes Electriques

**Par** : - TOUATI Khaoula

- CHIHEB Ouarda

## Sujet

*Dépollution du Réseau Electrique via un Système de Filtrage*

*Actif Parallèle Basé sur L'intelligence Artificielle*

Soutenu publiquement, le /07/ 2023, devant le jury composé de :

Mr. BENHENICHE Abdelhak	MCA	Univ-BBA	Président
Mr. TALHAOUI Hicham	MCA	Univ-BBA	Examineur
Mr. AISSA Oualid	MCA	Univ-BBA	Encadrant

Année Universitaire 2022/2023



# ***Dédicaces***

*Je dédie ce travail à :*

*À mes chers parents,*

*Je vous remercie pour tous les efforts et les sacrifices que vous avez  
consenti pour mon bonheur et ma réussite.*

*Merci pour votre accompagnement le long du chemin de ma vie.*

*À Mon fiancé Meftah boungab et toute sa famille*

*À mes chères sœurs et frères et ma grande famille CHIHEB*

*À mes amies : Khaoula, Rania, Faiza, et tous ceux qui me connaissent.*

***Ouarda***

# ***Dédicaces***

*Je dédie ce travail à :*

*À mes chers parents,*

*Que nulle dédicace ne puisse exprimer mes sincères sentiments,  
Pour leur patience illimitée, leur encouragement continu, leur aide,  
En témoignage de mon profond amour et respect pour leur grand  
sacrifice*

*À mes chères sœurs « Imen et Ikram ».*

*À mon frère « Abdeljalil ».*

*À ma chère amie du binôme « Ouarda » et à tous ceux qui ont  
contribué de près ou de loin pour que ce travail soit possible, je vous  
dis merci.*

***Khaoula***

# *Remerciements*

*Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements et notre profonde gratitude à tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail de recherche et à la rédaction de notre mémoire de fin d'études.*

*Tout d'abord, nous souhaitons exprimer notre gratitude à notre directeur de mémoire **Dr. AISSA Oualid** pour son soutien, son expertise et ses conseils précieux tout au long de ce projet de fin d'études. Sa disponibilité et ses orientations éclairées ont grandement contribué à l'aboutissement de ce travail. D'autre part, nous remercions également le président du jury **Dr. BENHENICHE Abdelhak** et l'examineur **Dr. TALHAOUI Hicham** d'avoir accepté l'évaluation de notre travail.*

*Nous aimerions également remercier nos enseignants qui nous ont prodigué leurs connaissances et leurs expertises tout au long de notre parcours universitaire. Leurs enseignements et leur passion pour leurs domaines respectifs nous ont inspirés et nous ont aidés à développer nos compétences.*

*Nous tenons à remercier nos familles et nos amis pour leur soutien inconditionnel et leur encouragement tout au long de nos études. Leur présence et leur motivation ont été une source de force et de persévérance pour nous.*

*Enfin, nous aimerions exprimer notre reconnaissance envers tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet de fin d'études, que ce soit en fournissant des ressources, des conseils ou des commentaires constructifs.*

*En conclusion, nous sommes extrêmement reconnaissants envers tous ceux qui ont contribué à notre réussite académique et à la réalisation de ce mémoire de fin d'études. Leur soutien indéfectible a été essentiel dans notre parcours et nous les remercions du fond du cœur.*

# Liste des Tableaux

---

## Liste des Tableaux

<b>Tableau.1.1</b> Niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux publics basse tension (norme CEI 6100 -2-2) _____	8
<b>Tableau.1.2</b> Limite des composantes harmoniques en courant (norme CEI 61000-3-2)___	9
<b>Tableau.2.1</b> Tensions produites par l'onduleur de tension_____	21
<b>Tableau.2.2</b> Valeurs des éléments caractérisant la structure étudiée_____	27
<b>Tableau.3.1</b> Règle de contrôle de la logique floue _____	36
<b>Tableau.3.2</b> THD avec et sans filtrage de la commande adaptative et la commande adaptative floue du filtre actif parallèle _____	40

# Liste des Figures

## Liste des Figures

<b>Fig.1. 1</b>	Creux et coupures de tension -----	4
<b>Fig.1. 2</b>	Fluctuations de tension -----	4
<b>Fig.1. 3</b>	Déséquilibre du système triphasé -----	5
<b>Fig.1. 4</b>	Variation de fréquence -----	5
<b>Fig.1. 5</b>	Diagramme de Fresnel des puissances -----	8
<b>Fig.1. 6</b>	Filtre passif résonnant -----	11
<b>Fig.1. 7</b>	Filtre passif amorti -----	11
<b>Fig.1. 8</b>	Filtre actif série -----	12
<b>Fig.1. 9</b>	Filtre actif parallèle-----	12
<b>Fig.1. 10</b>	Filtre combiné -série parallèle-----	13
<b>Fig.1. 11</b>	Filtre actif hybride -----	13
<b>Fig.2. 1</b>	Structure générale du filtre actif parallèle _____	16
<b>Fig.2. 2</b>	Structure d'un onduleur à deux niveaux _____	17
<b>Fig.2. 3</b>	Filtre actif à structure de tension _____	18
<b>Fig.2. 4</b>	Interrupteurs équivalents du filtre actif à source de tension _____	18
<b>Fig.2. 5</b>	Filtre actif à structure courant _____	18
<b>Fig.2.6</b>	Interrupteurs équivalents _____	18
<b>Fig.2. 7</b>	Onduleur triphasé de tension _____	19
<b>Fig.2. 8</b>	États de commutations des interrupteurs de l'onduleur _____	21
<b>Fig.2. 9</b>	Onde du courant et de la tension avec contrôle du par bande d'hystérésis _____	24
<b>Fig.2. 10</b>	Schéma fonctionnel de la bande d'hystérésis adaptative _____	26
<b>Fig.2. 11</b>	Schéma montrant les impulsions de commutation générées par l'hystérésis adaptatif _____	26
<b>Fig.2. 12</b>	Schéma bloc du régulateur PI classique du filtre étudié _____	26
<b>Fig.2. 13</b>	Circuits de puissance et celui de commande de la stratégie adaptative du filtre actif parallèle _____	28
<b>Fig.2. 14</b>	Tensions et courants de sources de la commande adaptative du filtre _____	29
<b>Fig.2. 15</b>	Tension du bus continu de la commande adaptative du filtre _____	29
<b>Fig.2. 16</b>	Courants du filtre et de charge de la commande adaptative du filtre _____	30
<b>Fig.2. 17</b>	THD du courant de la source de la première phase après filtrage _____	31
<b>Fig.2. 18</b>	THD du courant de la source de la première phase avant filtrage _____	31
<b>Fig.3. 1</b>	Structure du contrôleur à logique floue _____	35
<b>Fig.3. 2</b>	Schéma de commande adaptative basé sur la logique floue. _____	35
<b>Fig.3. 3</b>	Entrée de la fonction d'appartenance ( $V_s$ ) _____	36
<b>Fig.3.4</b>	Entrée de la fonction d'appartenance ( $diff * dt$ ) _____	36
<b>Fig.3. 5</b>	Sortie de la fonction d'appartenance ( $HBf$ ) _____	37
<b>Fig.3. 6</b>	Tensions et courants de sources de la commande adaptative basée sur la logique floue _____	37
<b>Fig.3. 7</b>	Tension du bus continu de la commande adaptative basée sur la logique floue _____	38
<b>Fig.3. 8</b>	Courants du filtre et de charge de la commande adaptative basée sur la logique floue du filtre actif parallèle _____	38
<b>Fig.3. 9</b>	THD du courant de la source avant filtrage _____	39
<b>Fig.3. 10</b>	THD du courant de la source après filtrage _____	40

---

# *Résumé*

---

# Résumé

## Résumé :

La cause principale de la dégradation de la qualité d'énergie des systèmes électriques est due à l'utilisation des convertisseurs statiques. Ce genre de convertisseur est connu comme charge non linéaire polluante, caractérisé par son absorption de courants non sinusoïdaux et son fonctionnement sous un facteur de puissance dégradé. Le présent projet de fin d'études a pour but d'améliorer la qualité de l'énergie électrique alimentant une charge polluante via un filtre actif parallèle de puissance basé sur la logique floue où des régulateurs à hystérésis adaptatifs flous ont été utilisés. L'efficacité de la loi de commande intelligente développée a été évaluée par le logiciel MATLAB/Simulink où une bonne qualité du courant de source a été enregistrée.

**Mots clés :** Filtrage actif parallèle, Qualité d'énergie, Charge non linéaire, Logique floue, Hystérésis adaptatif, MATLAB/Simulink.

## ملخص

السبب الرئيسي لتدهور جودة الطاقة للأنظمة الكهربائية هو استخدام المحولات الثابتة. هذا النوع من المحولات هو المعروف بالحمل اللاخطي، الملوث ويتميز بامتصاصه للتيارات غير الجيبية وتشغيلها تحت عامل القدرة المتدهور. الهدف من مذكرة نهاية الدراسة هو تحسين جودة الطاقة الكهربائية التي تغذي الحمولة الملوثة عبر مرشح طاقة نشط مواز يعتمد على المنطق الضبابي أين تم استعمال المنظمات الهستيرية التكيفية. وفي الأخير، فعالية قانون التحكم الذكي الذي تم تطويره وتقييمه بواسطة MATLAB/Simulink أثبتت جودة التيار الكهربائي المتحصل عليه.

**الكلمات المفتاحية:** التصفية النشطة المتوازية، جودة الطاقة، الحمل غير الخطي، المنطق الضبابي، المنظم التكيفي، MATLAB /Simulink.

## Abstract:

The main cause of the degradation of the energy quality of electrical system is due to the use of static converters. This type of converter is known as a non-linear polluting load, characterized by its absorption of non-sinusoidal currents and its operation under a degraded power factor. The purpose of this project is to improve the quality of the electrical energy supplying a polluting load via a parallel active power filter based on fuzzy logic where the fuzzy adaptive hysteresis regulators have been used. The efficiency of the developed intelligent control law has been evaluated by MATLAB/Simulink software where a good quality of the source current has been recorded.

**Keywords:** Parallel active filtering system, Power quality, Non-linear load, Fuzzy logic, Adaptive hysteresis, MATLAB/Simulink.

# *Sommaire*

---

## *Sommaire*

Introduction générale ..... 1

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

1.1 Introduction ..... 3

1.2 Qualité de l'énergie électrique ..... 3

1.3 Perturbations électriques et leurs origines ..... 3

1.3.1 Creux de tension et coupures ..... 4

1.3.2 Fluctuations de tension ..... 4

1.3.3 Déséquilibre du système triphasé de tension ..... 5

1.3.4 Variation de fréquence ..... 5

1.3.5 Harmonique ou inter harmonique ..... 5

1.4 Perturbation harmonique ..... 6

1.4.1 Origines des harmoniques ..... 6

1.4.2 Conséquences des harmoniques ..... 6

1.5 Caractérisation des perturbations harmoniques ..... 7

1.5.1 Taux de distorsion harmoniques (THD) ..... 7

1.5.2 Facteur de puissance ..... 7

1.6 Normes et réglementations ..... 8

1.7 Solutions traditionnelles de dépollution ..... 9

1.7.1 Solution traditionnelles ..... 9

1.7.2 Solutions modernes de dépollution ..... 11

1.8 Conclusion ..... 13

### **Chapitre 02 : Présentation et simulation du filtre actif parallèle adaptatif**

2.1 Introduction ..... 15

2.2 Description des filtres actifs parallèles ..... 15

2.2.1 Structure générale du filtre actif parallèle ..... 15

2.2.2 Modélisation de l'onduleur de tension ..... 16

2.2.3 Filtre actif parallèle à source de tension ..... 17

2.2.4 Filtre actif parallèle à source de courant ..... 18

# *Sommaire*

---

2.2.5 Élément de dépollution (convertisseur DC/AC) .....	20
2.2.6 Système de stockage d'énergie .....	21
2.2.7 Inductance de couplage .....	22
2.3 Commande adaptative du filtre actif parallèle .....	22
2.3.1 Calcul de la bande d'hystérésis adaptative .....	23
2.4.1 Résultats de simulation avec interprétations .....	30
2.5 Conclusion .....	32

## **Chapitre 03 : Présentation et simulation du filtre actif parallèle basé sur l'intelligence artificielle**

3.1 Introduction .....	34
3.2 Principe et domaines d'applications de la logique floue .....	34
3.3 Commande adaptative floue du filtre actif parallèle .....	35
3.4 Résultats de simulation avec interprétations .....	37
3.5 Étude comparative des deux techniques de commandes traitées .....	40
3.6 Conclusion .....	42
Conclusion générale et respectives .....	43

---

# *Introduction générale*

---

### Introduction générale

Ces dernières années, l'utilisation des convertisseurs statiques dans des systèmes de conversion de l'énergie électrique grandement contribué aux progrès de la performance et l'efficacité de ces systèmes. Ces convertisseurs absorbent le courant non sinusoïdal, même s'ils sont alimentés par une tension sinusoïdale. Ils se comportent en tant que générateur de courant perturbateur avec consommation de l'énergie réactive [1]. Les distributeurs d'énergie électrique sont donc obligés de mettre en place des normes et de se protéger de ces perturbations. Des normes harmoniques ont été proposées par la Commission électrotechnique internationale CEI61000 et IEEE Std. 519-1992 [2]. Il existe un certain nombre de solutions techniques pour éliminer ou réduire les effets liés à une mauvaise qualité de l'énergie, dans ce mémoire nous avons étudié une de ces solutions modernes qui est le filtrage actif parallèle. Ce dernier est commandé par deux stratégies de contrôle avancées qui sont l'approche adaptative et celle adaptative basée sur la théorie de la logique floue.

Dans le premier chapitre, nous allons présenter la qualité d'énergie électrique, les perturbations électriques, les harmoniques et leurs origines. Les distributeurs d'énergie électrique sont donc obligés de mettre en place des normes et de se protéger de ces perturbations. Des normes harmoniques ont été proposées par les organismes concernées. Ensuite, nous présentons les solutions traditionnelles et modernes pour la dépollution du réseau électrique.

Dans le deuxième chapitre, nous allons étudier le filtre actif parallèle comme élément de dépollution présenté par le convertisseur DC/AC couplé au réseau par inductances. Puis, nous présenterons le principe de la commande par hystérésis à bande adaptative ainsi que sa simulation en MATLAB/Simulink pour examiner les performances de cette loi de commande étudiée.

Dans le troisième chapitre, nous présenterons le principe de la commande adaptative basée sur la logique floue du filtre actif parallèle ainsi que sa simulation en MATLAB/Simulink. Les résultats obtenus et alors sont présentés et comparés avec ceux de la commande adaptative déjà traitée au deuxième chapitre.

Enfin, nous avons présenté une conclusion générale pour ce projet de fin d'études avec des perspectives.

# *Chapitre 01 :*

---

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

---

## **1.1 Introduction**

Pendant de nombreuses années, les distributeurs d'énergie électrique ont eu du mal à assurer la qualité de l'approvisionnement en électricité. Les principaux efforts portent sur la continuité de service afin que l'énergie soit toujours disponible pour les utilisateurs. Aujourd'hui, les normes de qualité évoluent avec le développement d'appareils dans lesquels l'électronique occupe une place prépondérante dans le système de contrôle [3].

Dans ce chapitre, Nous allons présenter les perturbations électriques et leurs origines (creux, coupure, fluctuation de tension ...), perturbations harmoniques, normes et réglementations. Enfin, on présentera les solutions traditionnelles et modernes de dépollution des réseaux électriques.

## **1.2 Qualité de l'énergie électrique**

L'énergie dépend de trois paramètres essentiels qui sont : la qualité de l'onde de tension, la qualité de la fourniture électrique et la qualité des courants. L'énergie électrique est délivrée sous forme d'un système triphasé caractérisé par des tensions sinusoïdales. Les paramètres spécifiques de ce système sont les suivants [4] :

- L'amplitude des trois tensions ;
- La fréquence ;
- La symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leurs déphasages respectifs ;
- La forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde.

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

Les perturbations électriques affectant l'un des quatre paramètres mentionnés ci-dessus peuvent se manifester par : des creux ou des coupures de tension, des fluctuations de tension, des déséquilibres dans le système de tension triphasé, des variations de tension, présence de fréquences, harmoniques ou d'inter harmoniques.

### 1.3.1 Creux de tension et coupures

Un creux de tension est défini comme une chute de 10% à près de 90% de la tension contractuelle pendant une période comprise entre l'alternance fondamentale du réseau (10ms à 50hz) et une minute. Les paramètres caractérisant le creux de tension sont :sa profondeur ( $\Delta V$ ) et sa durée( $\Delta T$ ) [2].

Les Coupures de tension sont des cas où la profondeur de tension est supérieure à 99%, elles sont caractérisées par un seul paramètre qui est la durée. La durée des coupures brèves inférieure à une minute entre 10 ms et 1 s des « coupures très brèves » (voir la figure 1.1).

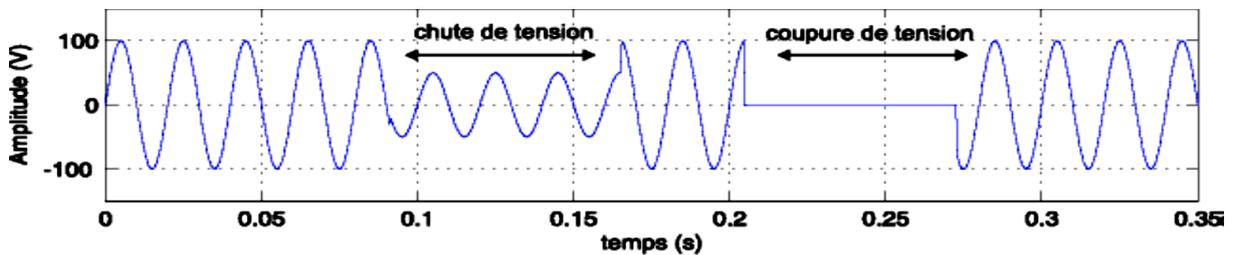


Fig.1.1 Creux et coupures de tension [4].

Les causes principales du creux de tension et coupure brève sont :

Les phénomènes qui provoquent des courants pupillaires à travers l'impédance des éléments du réseau se traduisent par une chute de l'amplitude de la tension qui diminue à mesure que la distance électrique entre le point d'observation et la source de la perturbation augmente [2].

### 1.3.2 Fluctuations de tension

Les Fluctuations de tension sont des changements dans l'enveloppe de tension. Leurs amplitudes doivent être à moins de 10% de leurs valeurs nominales. Ce type de fluctuations doit être distingué des variations lentes de tension dues aux évolutions progressives de la consommation du réseau. La principale source de fluctuations rapides sont les charges industrielles dont le fonctionnement aléatoire ou intempestif provoque des changements brusques de puissance, comme les machines à souder et les fours à arc électrique [5].

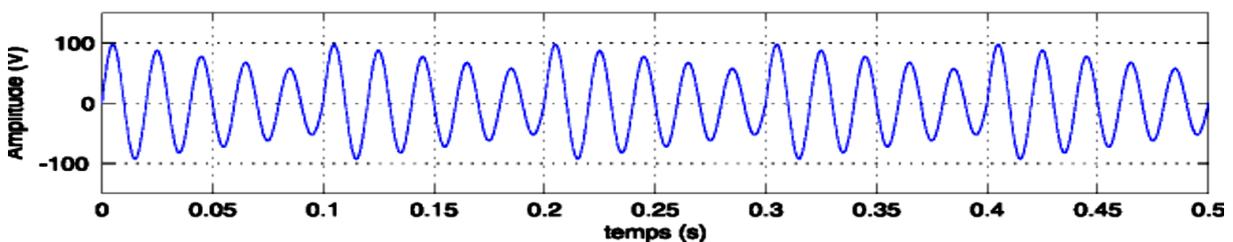


Fig.1. 2 Fluctuations de tension [4].

### 1.3.3 Déséquilibre du système triphasé de tension

Le déséquilibre du système triphasé se produit lorsque les trois tensions ne sont pas égales en amplitude ou déphasées les unes par rapport aux autres de  $120^\circ$  [2].

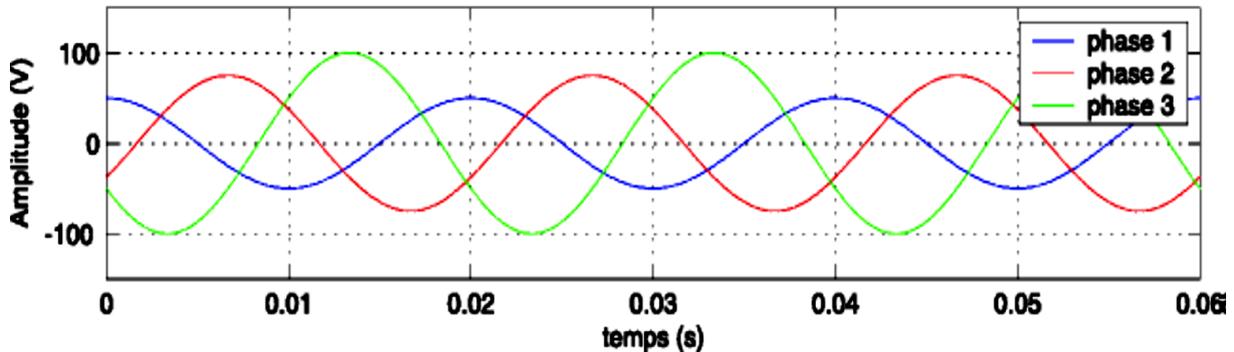


Fig.1. 3 Déséquilibre du système triphasé [4].

### 1.3.4 Variation de fréquence

Dans les conditions normales, la fréquence du réseau de distribution doit être dans l'intervalle  $50 \pm 1$  Hz. Des changements dans la fréquence du réseau peuvent affecter le réseau, comme la montre la figure suivante :

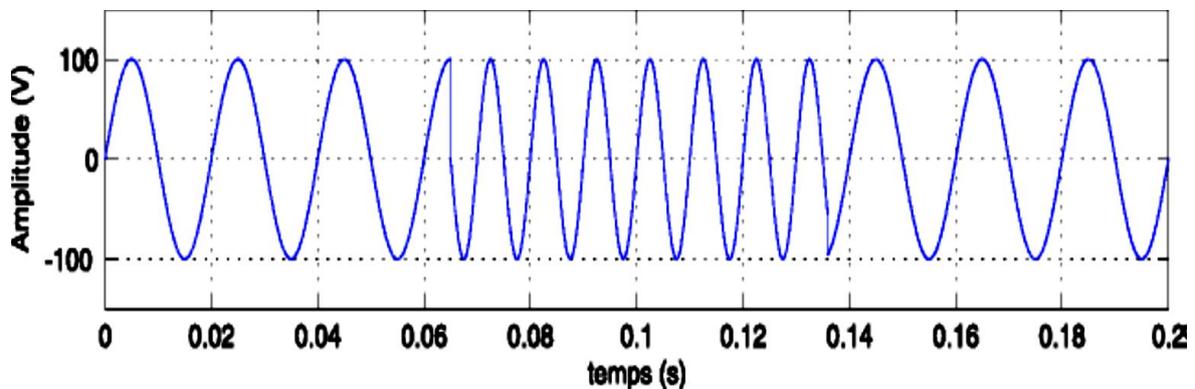


Fig.1. 4 Variation de fréquence [4].

### 1.3.5 Harmonique ou inter harmonique

Les harmoniques sont des ondes périodiques ou des composantes de grandeurs dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale. Les inter-harmoniques sont superposées à l'onde fondamentale mais, ne sont pas des multiples entiers de la fréquence de réseaux [6].

## **1.4 Perturbation harmonique**

Une augmentation significative du niveau de pollution harmonique dans le réseau électrique est le résultat de la prolifération des convertisseurs statiques. En fait, ces convertisseurs sont considérés comme une charge non linéaire émettant des courants harmoniques. Ces courants harmoniques au point de connexion, polluent alors les consommateurs sont alimentés par le même réseau [7].

### **1.4.1 Origines des harmoniques**

Les harmoniques sont produites par des charges non linéaires qui tirent des courants non sinusoïdaux. Actuellement, les appareils basés sur l'électronique de puissance sont la principale source de ces harmoniques. Les caractéristiques électriques de ces appareils varient avec les valeurs de tension.

### **1.4.2 Conséquences des harmoniques**

Les courants harmoniques se propageant dans le réseau peuvent déformer la forme du courant de source et contaminer les consommateurs alimentés par le même réseau. Les effets causés par les harmoniques peuvent être divisés en deux types [7].

#### **-Les effets instantanés apparaissent immédiatement dans certains appareillages :**

\*Défaut de fonctionnement de certains équipements électriques [8] ;

\*Troubles fonctionnels des micro-ordinateurs ;

\*Erreurs dans les appareils de mesure ;

\*Vibrations de bruits.

#### **-Effets à terme :**

\*Échauffement des câbles et des équipements ;

\*Échauffement des condensateurs ;

\*Échauffement dû aux pertes supplémentaires des machines et des transformateurs.

## 1.5 Caractérisation des perturbations harmoniques

Différentes 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 [8].

### 1.5.1 Taux de distorsion harmoniques (THD)

Les perturbations harmoniques peuvent être caractérisées par la distorsion en régime déformé. Le taux global de distorsion harmonique quantifie les interférences harmoniques tandis que le facteur de puissance limite la consommation de puissance réactive [9].

Le taux de distorsion harmonique (THD) calculé pour le courant est le suivant :

$$THD\% = 100 \sqrt{\sum_h^\infty \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} \quad (1.1)$$

Avec :

$I_1$  : valeur efficace du courant fondamental ;

$I_h$  : valeur efficace du courant harmonique.

### 1.5.2 Facteur de puissance

Le facteur de puissance est donné par le rapport entre la puissance active P et la puissance apparente S dans un signal sinusoïdal.

En cas des harmoniques : une puissance supplémentaire (la puissance déformante D) est exprimée dans la relation (1.5).

Avec :

$$P = 3 \sum_{h=1}^\infty V_h I_h \cos(\varphi_h) \quad (1.2)$$

$$Q = 3 \sum_{h=1}^\infty V_h I_h \sin(\varphi_h) \quad (1.3)$$

$$D = 3 V_1 \sqrt{\sum_{h=2}^{50} I_h^2} \quad (1.4)$$

$$F_p = \frac{p}{s} = \frac{p}{\sqrt{p^2 + Q^2 + D^2}} \quad (1.5)$$

Avec : P Puissance active, Q la puissance réactive et D la puissance déformante.

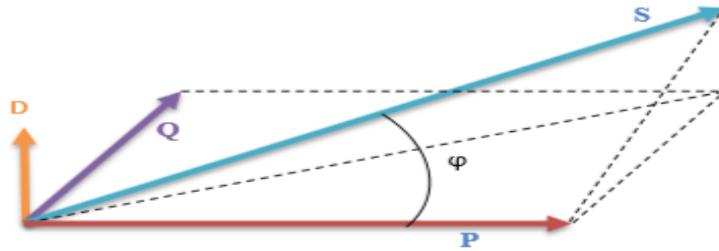


Fig.1. 5 Diagramme de Fresnel des puissances.

## 1.6 Normes et réglementations

Les normes et réglementations ont pour but de limiter les défauts causés par les harmoniques. Les deux principaux organismes de normalisation internationaux dans le domaine sont la CEI (Commission Électrotechnique Internationale) et IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). La CEI définit le niveau des courants et des tensions harmoniques à ne pas dépasser par une série de normes de compatibilité électromagnétique (CEI 61000) [10].

### La norme CEI 61000-2-2 :

Elle détermine les niveaux de compatibilité de tensions harmoniques sur les réseaux basse tension pour protéger les équipements raccordés sur ce réseau (voir le tableau 1.1) [4].

**Tableau.1. 1** Niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux publics basse tension (norme CEI 6100 -2-2).

Harmoniques impaires				Harmoniques paires	
Non multiples de 3		Multiples de 3		Rangs	Taux (%)
Rangs	Taux (%)	Rangs	Taux (%)		
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	18	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				

**La norme CEI 61000-3-2 :** fixe la limitation des courants injectés dans le réseau public pour les équipements dont le courant par phase est inférieur à 16A, représenté par le tableau suivant :

**Tableau.1.2** Limite des composantes harmoniques en courant (norme CEI 61000-3-2).

Harmoniques impaires		Harmoniques paires	
Rangs	Taux (%)	Rangs	Taux (%)
3	2.3	2	1.080.43
5	1.140.77	4	0.3
7	0.40	6	0.23*8/h
9	0.330.21	8≤h≤40	
11	0.15*15/h		
13			
15			
15≤h≤39			

### Norme IEEE:

IEEE 519-1992 (Recommended Practices and Requirements for harmonic Control in Power Systems, 1992) : elle définit les exigences et les recommandations pratiques pour le contrôle des harmoniques dans les systèmes électriques de puissance. Cette norme s'applique tant aux fournisseurs qu'aux utilisateurs et couvre toutes les gammes de puissance. Dans cette norme, les limites sont définies par rapport au courant de court-circuit au point de raccordement du réseau et le courant de charge fondamentale. La norme IEEE 519-1992 recommande notamment une distorsion harmonique totale de tension inférieure à 5% pour les systèmes de moins de 69K et une distorsion harmonique individuelle de tension inférieure à 3% [10].

## 1.7 Solutions traditionnelles de dépollution

Plusieurs types de solutions sont possibles. Elles apportent une solution facile et rapide pour quelques cas de perturbations bien localisées et utilisent des composants passifs tels que : inductances, condensateurs, transformateurs et des branchements qui modifient le schéma de l'installation [11-12].

### 1.7.1 Solutions traditionnelles

#### -Agir sur la structure de l'installation :

Afin d'assurer leur résistance aux surcharges harmoniques, cette solution envisagée n'a aucun effet sur les harmoniques définitivement mais permet de résoudre le problème des harmoniques pendant une durée limitée. Le déclassement des équipements de distribution électrique soumis aux harmoniques est utilisé dans le cas des installations existantes. Cette méthode cause un surcoût de production et ne tire pas profit du potentiel réel de l'installation

**-Renforcer la puissance de court-circuit :**

La diminution de l'impédance totale placée à l'amont de la charge non linéaire permet de réduire la tension créée par les harmoniques de courant et par voie de conséquence diminuer le THD en tension au point de raccordement. Cependant, les courants harmoniques ne sont pas atténués.

**-Rééquilibrer les courants du réseau électrique :**

La solution préconisée consiste en une répartition identique des charges sur les trois phases. Les charges monophasées et biphasées étant mal réparties provoquent un déséquilibre des courants dans un réseau électrique à basse tension.

**-Filtrage passif :**

Ce dispositif est utilisé pour empêcher les courants harmoniques de se propager dans les réseaux électriques. Il peut aussi être utilisé pour compenser la puissance réactive. Le principe est basé sur l'insertion à l'amont de la charge d'un ou plusieurs circuits accordés sur les harmoniques à rejeter. Pour filtrer un courant de fréquence particulière, un filtre résonnant série est placé en parallèle sur le réseau (Figure 1.6). Cependant, ce type de filtre est très sélectif. Pour atténuer toute une bande de fréquences, un filtre passif amorti du second ordre (Figure 1.7) est préférable. Le dimensionnement de ces filtres dépend des performances exigées, des harmoniques à éliminer, de la nature des récepteurs et de la structure du réseau. Cette technique est simple pour rejeter les harmoniques de rang élevé que celles de rang faible. Malgré sa large utilisation dans l'industrie, ce dispositif a certains inconvénients à savoir :

-Équipements volumineux ;

-Manque de souplesse à s'adapter aux variations de la charge du réseau ;

-Une connaissance approfondie de la configuration du réseau électrique est nécessaire ;

-Problèmes de résonance avec l'impédance du réseau.

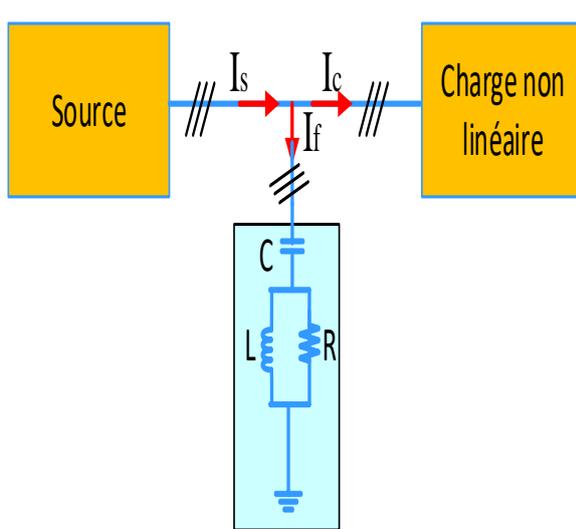


Fig.1. 6 Filtre passif résonnant.

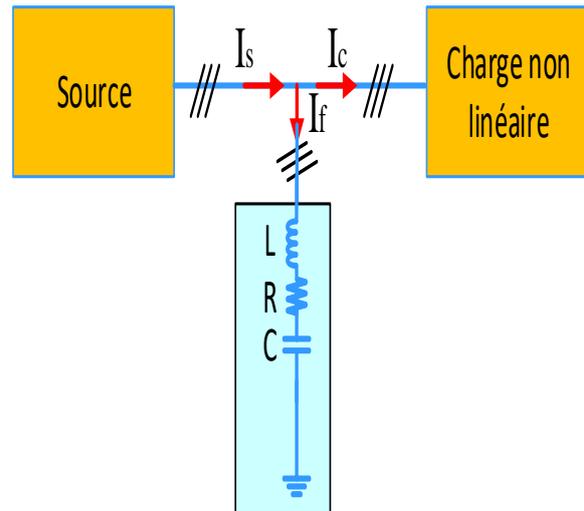


Fig.1. 7 Filtre passif amorti.

### 1.7.2 Solutions modernes de dépollution

Ces solutions sont proposées comme des solutions efficaces pour éliminer la pollution des réseaux électriques qui corrigent les défauts inhérents des solutions traditionnelles comme les filtres passifs (non adaptables aux variations de charge et de réseau, phénomènes de Résonance).

Dans toutes les solutions modernes, il existe deux types de structures :

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

Le but de ces filtres actifs est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques, soit associés à des filtres passifs [13].

#### 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 Perturbateur 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 [14].

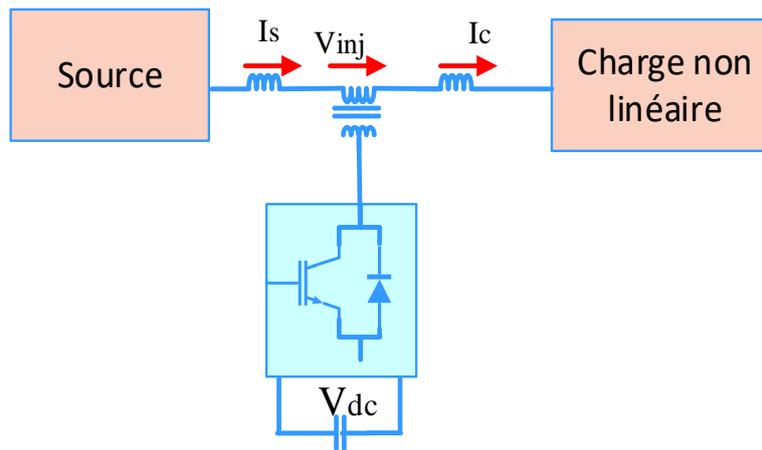


Fig.1. 8 Filtre actif série.

### Filtre actif parallèle (FAP)

Le FAP se connecte en parallèle avec le réseau et injecte en temps réel les composantes harmoniques inverses des courants harmoniques générés par les charges non linéaires connectées au réseau. Ainsi, le courant fourni par la source d'énergie devient sinusoïdal [15].

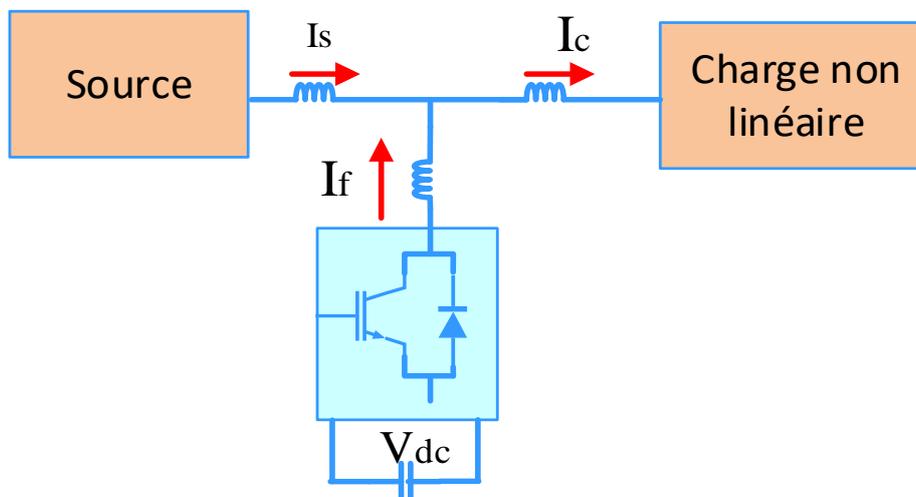


Fig.1. 9 Filtre actif parallèle.

### Filtres combinés série-parallèle

La combinaison série-parallèle actif, dénommée également : Unified Power Quality Conditioner (UPQC), résulte de l'association de deux filtres actifs série et parallèle, comme le montre la Figure (1.9). Profitant des avantages des deux filtres actifs, l'UPQC assure une tension et un courant de forme sinusoïdale du réseau électrique à partir d'une tension et d'un courant perturbés. Cependant, la complexité des commandes de ce filtre et le prix important limitent son utilisation à des applications critiques [16], [17].

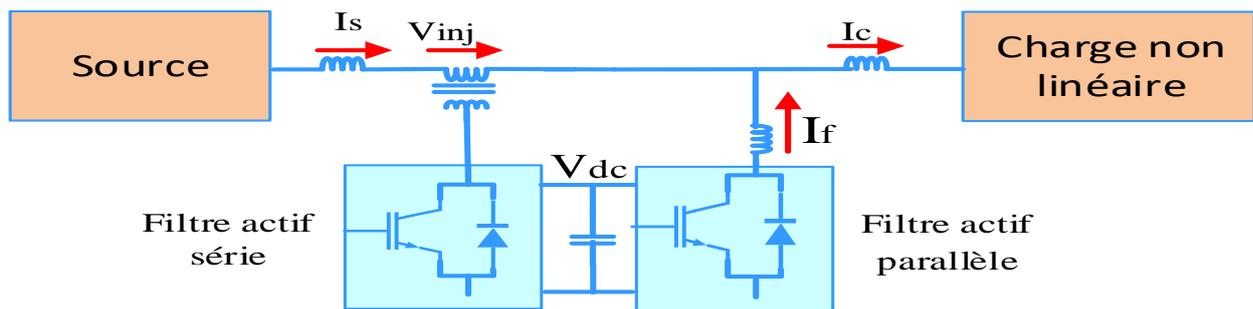


Fig.1. 10 Filtre combiné -série parallèle.

### Filtre actif hybride

Le rôle des filtres passifs consiste en l'élimination des harmoniques à basse fréquence, la possibilité de fournir de l'énergie réactive favorisant et la réduction du dimensionnement du filtre hybride [18].

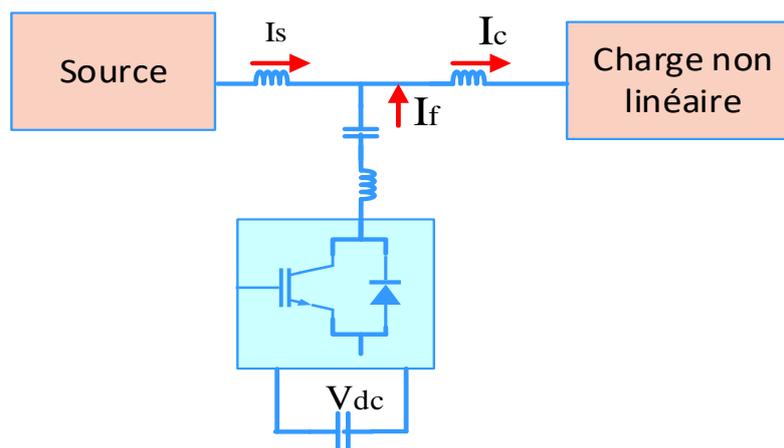


Fig.1. 11 Filtre actif hybride.

## 1.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents problèmes du réseau électrique causés par la charge non linéaire qui provoque la dégradation de la qualité d'énergie électrique. Pour éviter ces problèmes de perturbations on a discuté des solutions traditionnelles et des solutions modernes. Enfin, le chapitre suivant traitera la présentation et simulation du filtre actif parallèle adaptatif.

# *Chapitre 02 :*

---

*Présentation et simulation du  
filtre actif parallèle adaptatif*

---

## 2.1 Introduction

Les filtres actifs de puissance sont une solution novatrice pour la compensation des harmoniques polluantes dans les réseaux électriques. Il existe plusieurs types de filtres actifs à savoir : le filtre actif série, le filtre actif parallèle, le filtre actif combiné, ...etc. Le filtre actif parallèle compense les harmoniques de courant et il est alimenté par une tension continue fournie par un condensateur. Cette tension doit être maintenue constante pour assurer un bon fonctionnement du filtre actif [20]. Afin de compenser la puissance réactive et le courant harmonique généré par la charge non linéaire, nous proposons le filtrage actif parallèle pour les avantages qu'il représente, tel que l'adaptabilité et la flexibilité avec la variation de la charge polluante. Le présent chapitre présente le principe et la simulation de la commande adaptative du filtre actif parallèle.

## 2.2 Description des filtres actifs parallèles

Le filtre actif shunt est un onduleur de tension à MLI qui est connecté en parallèle sur le réseau de distribution dont le but est d'injecter dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge non linéaire mais en opposition de phase avec obtention d'un courant sinusoïdal du côté réseau [23-25]. Dans ce chapitre, nous présenterons la structure générale du filtre actif parallèle, son principe de fonctionnement et sa modélisation.

### 2.2.1 Structure générale du filtre actif parallèle

La structure générale du filtre actif parallèle est constituée de deux parties distinctes : Une partie puissance et une partie commande, comme le montre la Figure (2.1) [2], [21], [25].

#### **Le bloc puissance est constitué :**

- \* D'un onduleur de tension à base d'interrupteurs de puissance, commandables au blocage et à l'amorçage (GTO, IGBT, ...etc.) avec des diodes en antiparallèle ;
- \* D'un circuit de stockage d'énergie, souvent capacitif ;
- \* D'un filtre de sortie ;

#### **La partie commande est constituée :**

- \* De la commande de l'onduleur de tension ;
- \* Du système à base de PLL ;
- \* De la régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie.

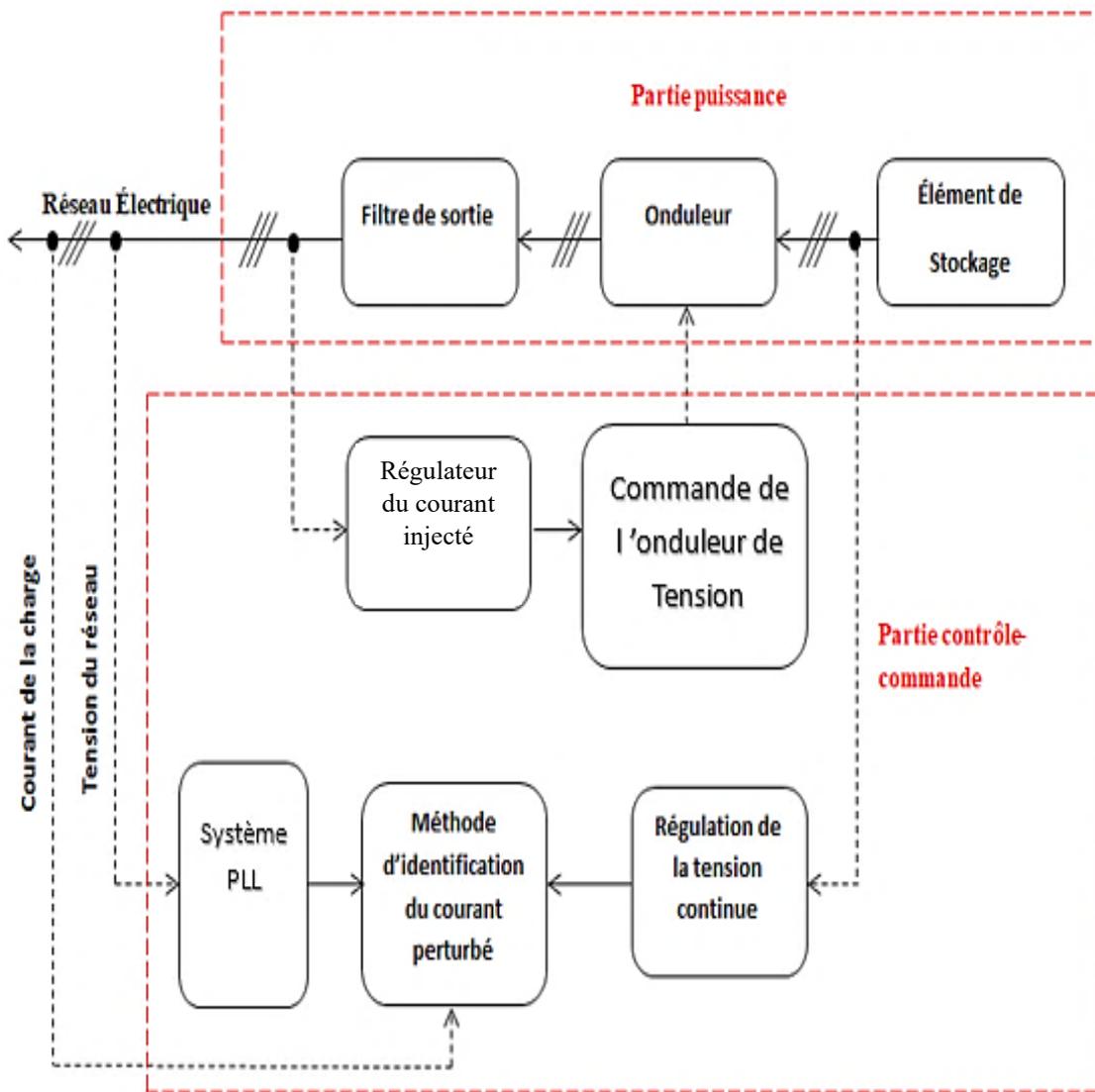


Fig.2. 1 Structure générale du filtre actif parallèle [24].

### 2.2.2 Modélisation de l'onduleur de tension

Un onduleur triphasé de tension se compose de trois bras à interrupteurs réversibles en courant, commandés à l'ouverture et à la fermeture (IGBT, transistors bipolaires, GTO) en antiparallèle avec des diodes. Cet onduleur a pour but de transiter la puissance continue vers le réseau et de dépolluer le courant de source, à travers les ordres de commande appliqués aux interrupteurs de puissance [25]. Les deux commutateurs sur le même bras sont commandés de façon complémentaire : la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre. Avec cette hypothèse, la fermeture et l'ouverture des interrupteurs de l'onduleur de la figure (2.2) dépendent de l'état des trois signaux de commande ( $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ) comme suit ;

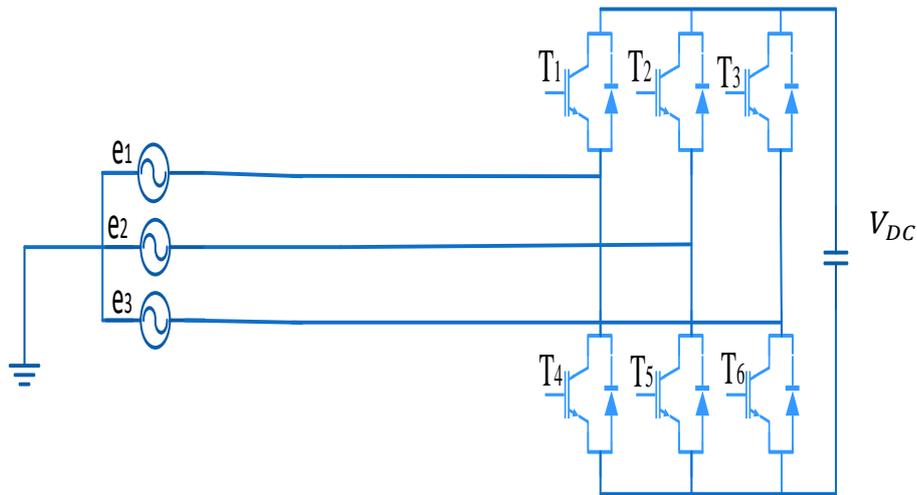


Fig.2. 2 Structure d'un onduleur à deux niveaux.

### 2.2.3 Filtre actif parallèle à source de tension

Le filtre actif à structure de tension connecté en parallèle au réseau est illustré dans la figure (2.3). Pour insérer un filtre d'entrée du premier ordre entre l'onduleur et le réseau, une simple inductance est utilisée en réalité. La capacité (C) remplit la fonction d'une source de tension continue et maintient la tension à ses bornes ( $V_{DC}$ ) à une valeur quasi-constante [21]. La fluctuation de cette tension doit être faible afin de ne pas dépasser la limite en tension des semi-conducteurs et pour maintenir une performance optimale du filtre actif, compte tenu d'une inductance donnée. L'onduleur de tension est équipé d'interrupteurs réversibles en courant fabriqués à partir de semi-conducteurs commandés pour la fermeture et l'ouverture, associés à des diodes montées en parallèle inverse, comme indiqué sur la figure (2.4). Selon la puissance nécessaire, on privilégie :

- le transistor à effet de champ ou MOSFET pour les faibles puissances ;
- le transistor bipolaire ou l'IGBT pour les courants moyens ;
- le thyristor GTO pour les fortes puissances.

Le thyristor classique avec circuit auxiliaire d'extinction est de moins en moins utilisé dans les équipements récents. Phrase signifie que le thyristor classique avec circuit auxiliaire d'extinction n'est pas souvent utilisé dans les équipements modernes. On peut supposer que cela est dû à l'apparition de technologies plus avancées qui ont remplacé le thyristor classique [21].

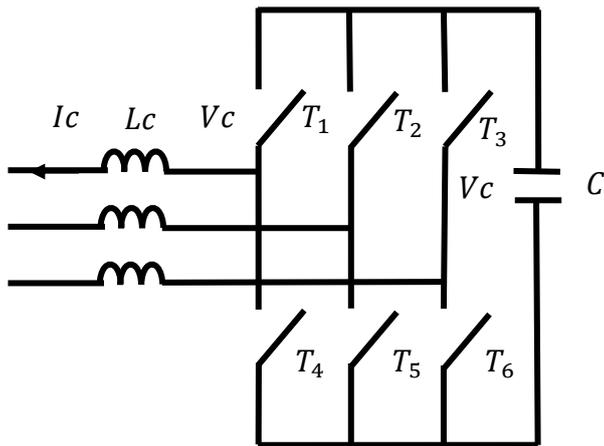


Fig.2. 3 Filtre actif à structure de tension.

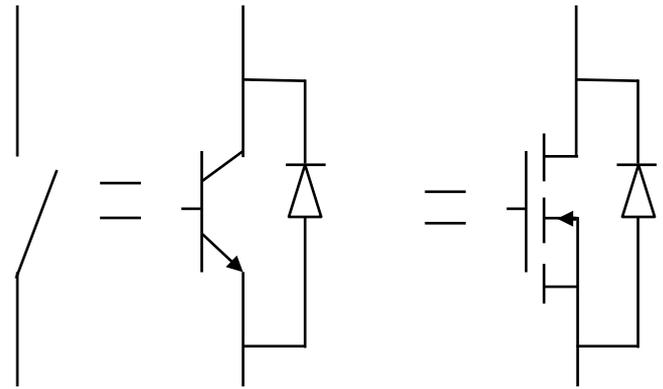


Fig.2. 4 Interrupteurs équivalents du filtre actif à source de tension.

### 2.2.4 Filtre actif parallèle à source de courant

Le schéma de base du filtre actif à structure courant connecté est présenté par la figure (2.5). Un filtre d'entrée du second ordre est inséré entre l'onduleur et le réseau. L'inductance ( $L$ ) stocke de l'énergie et agit comme une source de courant continu. Le courant traversant cette inductance est maintenu pratiquement constant et son ondulation qui se produit à la fréquence de puissance fournie au réseau par le filtre actif, est faible.

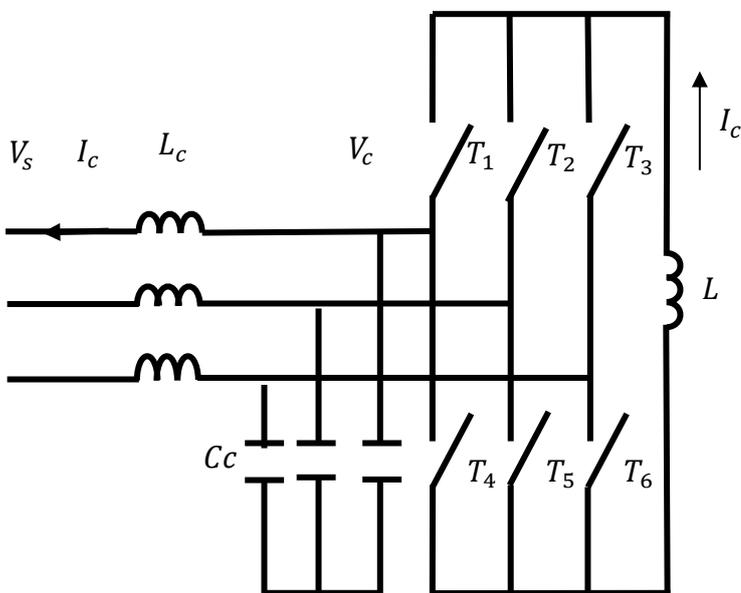


Fig.2. 5 Filtre actif à structure courant.

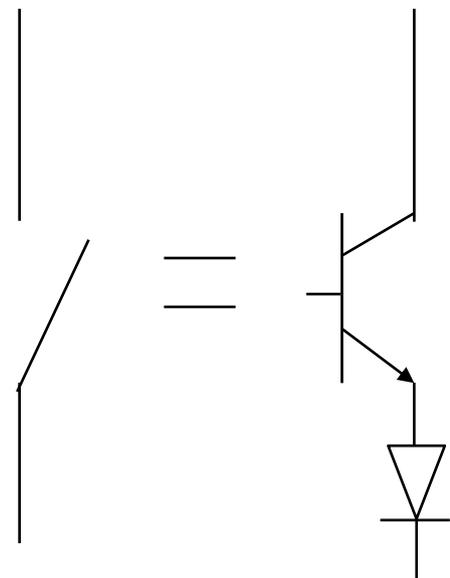


Fig.2. 6 Interrupteurs équivalents du filtre actif à source de courant.

L'onduleur de courant triphasé en pont est composé de six interrupteurs bidirectionnels en tension et unidirectionnels en courant, commandables pour l'ouverture et la fermeture (voir figure 2.6). Parmi les interrupteurs connectés à la même borne de la source de courant continu, il est impératif qu'il y ait toujours un interrupteur fermé pour éviter un circuit ouvert dans la source de courant. D'un autre côté, un seul interrupteur doit être fermé à la fois pour éviter tout court-circuit entre deux bornes du récepteur de tension [21].

### 2.2.5 Élément de dépollution (convertisseur DC/AC)

L'onduleur est un convertisseur statique de type continu/alternatif qui convertit une source de tension continue en une tension alternative. Il se compose de six interrupteurs réversibles en courant formant trois bras, qui sont des composants semi-conducteurs (transistors bipolaires, IGBT, GTO) en antiparallèle avec des diodes, commandés à la fermeture et à l'ouverture, comme illustré dans la figure (2.7) [2].

L'énergie côté continu est stockée à travers un condensateur ( $C_{DC}$ ) de la tension ( $V_{DC}$ ). Le filtre de sortie est un filtre passif habituellement de premier ordre ( $L_f, R_f$ ) utilisé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique.

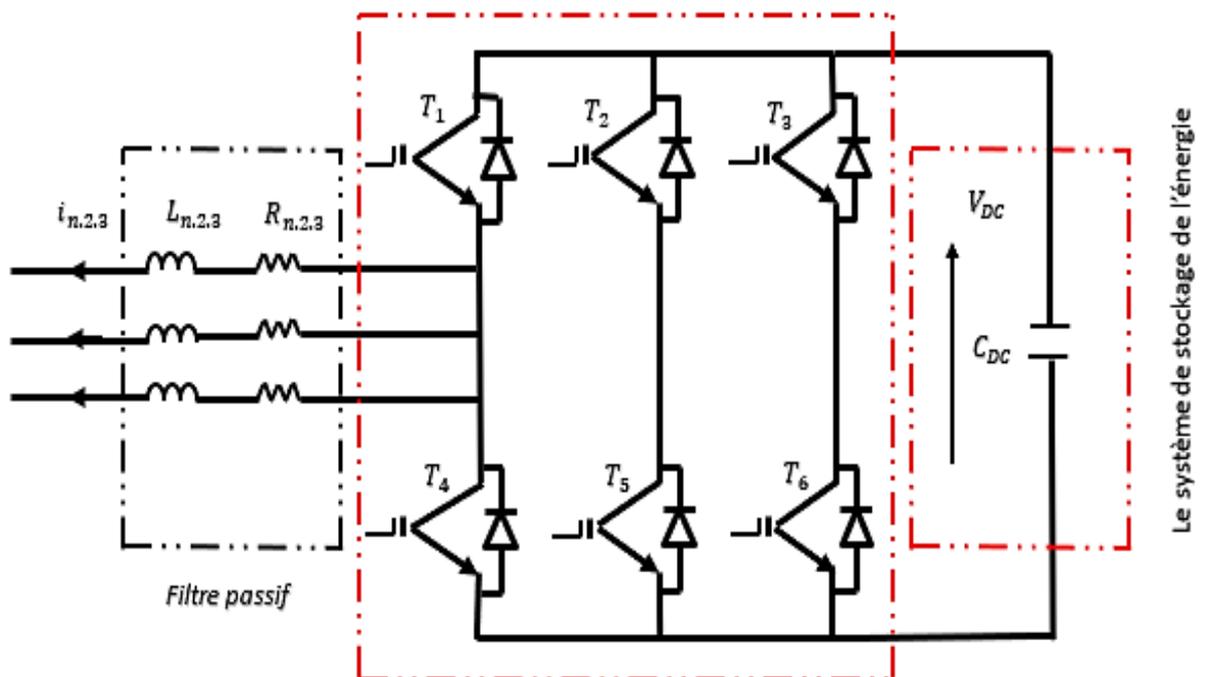


Fig.2. 7 Onduleur triphasé de tension.

Cette structure est soumise à des contraintes importantes :

- Le courant de ligne doit toujours suivre un chemin possible assuré par les diodes en parallèle avec les interrupteurs de puissance de chaque bras ;
- À tout moment, un seul interrupteur d'un même bras doit être conducteur pour éviter tout court-circuit de la source de tension.

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur dépendent de l'état des signaux de commande ( $T_1, T_2, T_3$ ) tels que définis ci-dessous [6] :

$$T1 = \begin{cases} 1, & T_1 \text{ fermé et } T_4 \text{ ouvert} \\ 0, & T_4 \text{ fermé et } T_1 \text{ ouvert} \end{cases} \quad (2.1)$$

$$T2 = \begin{cases} 1, & T_2 \text{ fermé et } T_5 \text{ ouvert} \\ 0, & T_5 \text{ fermé et } T_2 \text{ ouvert} \end{cases} \quad (2.2)$$

$$T3 = \begin{cases} 1, & T_3 \text{ fermé et } T_6 \text{ ouvert} \\ 0, & T_6 \text{ fermé et } T_3 \text{ ouvert} \end{cases} \quad (2.3)$$

Les tensions composées ( $V_{12}, V_{23}, V_{31}$ ) à la sortie de l'onduleur sont influencées par l'état des signaux de commande ( $T_1, T_2, T_3$ ). Plus précisément :

$$\begin{cases} V_{12} = V_{DC}(T_1 - T_2) \\ V_{23} = V_{DC}(T_2 - T_3) \\ V_{31} = V_{DC}(T_3 - T_1) \end{cases} \quad (2.4)$$

Supposons que les tensions simples ( $e_1, e_2, e_3$ ) constituent un système triphasé équilibré.

Ainsi, il est possible de les synthétiser de la manière suivante :

$$\begin{cases} e_1 = \frac{V_{DC}}{3}(2T_1 - T_2 - T_3) \\ e_2 = \frac{V_{DC}}{3}(2T_2 - T_1 - T_3) \\ e_3 = \frac{V_{DC}}{3}(2T_3 - T_1 - T_2) \end{cases} \quad (2.5)$$

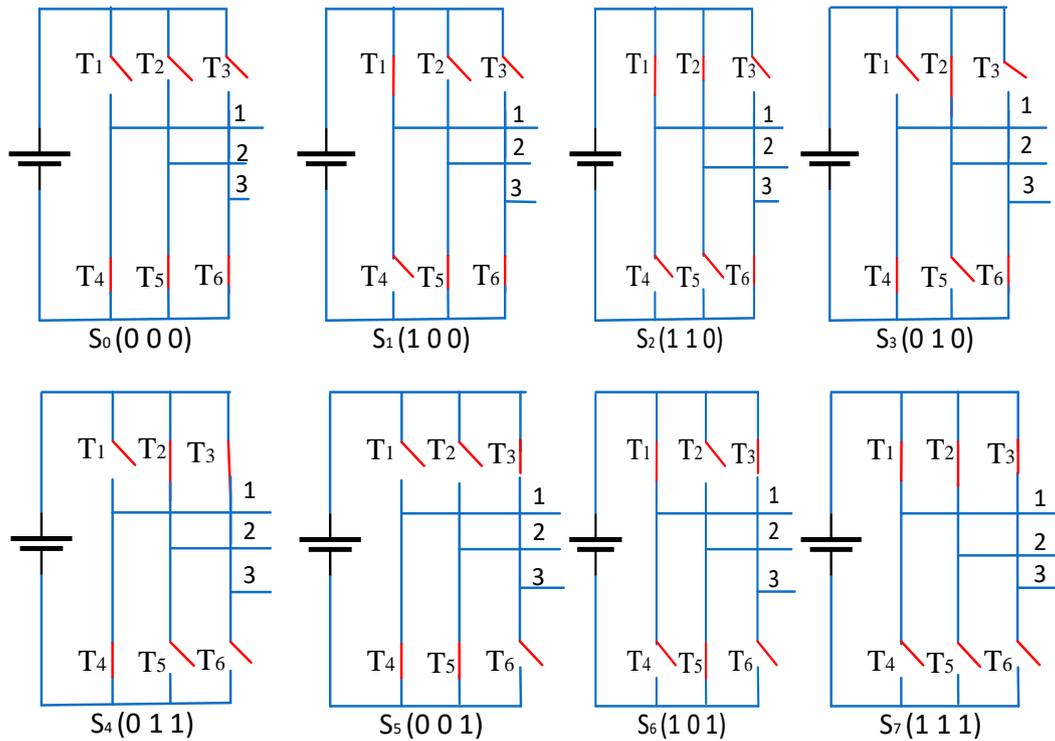


Fig.2. 8 États de commutations des interrupteurs de l'onduleur.

En se basant sur les états des interrupteurs représentés par les variables  $T_1, T_2$  et  $T_3$ , il est possible d'observer huit configurations distinctes de l'onduleur, comme récapitulé dans la Figure (2.8) et le Tableau (2.1). Chaque configuration est déterminée par l'état des interrupteurs du commutateur supérieur ainsi que ceux du commutateur inférieur, qui sont à l'état opposé en accord avec le principe de complémentarité. Ainsi, huit cas possibles de tension de sortie de l'onduleur peuvent être exprimés selon la source [6], comme illustré dans le Tableau (2.1) :

Tableau.2. 1 Tensions produites par l'onduleur de tension [6].

N° du cas	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$e_1$	$e_2$	$e_3$
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	1	$-VDC/3$	$-VDC/3$	$2VDC/3$
3	0	1	0	$-VDC/3$	$2VDC/3$	$-VDC/3$
4	0	1	1	$-2VDC/3$	$VDC/3$	$VDC/3$
5	1	0	0	$2VDC/3$	$-VDC/3$	$-VDC/3$
6	1	0	1	$VDC/3$	$-2VDC/3$	$VDC/3$
7	1	1	0	$-VDC/3$	$VDC/3$	$-2VDC/3$
8	1	1	1	0	0	0

### **2.2.6 Système de stockage d'énergie**

Le système de stockage d'énergie utilisé dans un onduleur de tension est un condensateur ( $C_{DC}$ ) qui remplit le rôle d'une source de tension continue ( $V_{DC}$ ). Bien que ce condensateur doive stocker de l'énergie, les pertes dans les interrupteurs signifient que l'énergie doit être fournie au condensateur à partir du réseau via l'onduleur [6]. Afin de garantir une qualité de filtrage stable, la tension ( $V_{DC}$ ) doit être maintenue constante malgré les fluctuations éventuelles. La capacité placée du côté continu de l'onduleur est l'élément de stockage d'énergie le plus approprié, ayant deux fonctions essentielles selon les sources à savoir :

- Elle sert d'élément de stockage d'énergie pour compenser les différences de puissance réelles entre la charge et la source pendant les périodes transitoires.
- En régime permanent, elle maintient la tension du bus continu ( $V_{DC}$ ) constante avec de faibles oscillations.

### **2.2.7 Inductance de couplage**

Connectée en parallèle avec le réseau, il est nécessaire d'installer un filtre de raccordement inductif entre l'onduleur de tension et le réseau. Ce filtre permet de transformer le compensateur en un dipôle de courant du point de vue du réseau et de limiter la dynamique du courant pour faciliter son contrôle [22]. Dans la plupart des cas, l'inductance utilisée comme filtre de sortie est appelée inductance de couplage ou inductance de lissage. Ce paramètre est important car, avec une fréquence de commutation élevée, il est nécessaire de régler le niveau d'ondulation du courant de compensation injecté. Pour obtenir un filtrage efficace, les interrupteurs du convertisseur doivent être parfaitement commandés, en particulier à haute fréquence de commutation et en cas de connexion en parallèle avec le réseau. En effet, pour un filtrage efficace, l'inductance de couplage joue un rôle crucial dans la conception de l'onduleur de tension. Pour des fréquences de commutation élevées et des faibles puissances, l'inductance doit être faible afin de permettre une réactivité suffisante pour suivre les variations rapides du courant de compensation. Cependant, pour des faibles fréquences de commutation et des hautes puissances, l'inductance doit être élevée pour ralentir les variations du courant de compensation.

## **2.3 Commande adaptative du filtre actif parallèle**

La commande conventionnelle par hystérésis est largement utilisée en raison de sa simplicité d'utilisation et de sa robustesse. En effet, cette stratégie permet un contrôle satisfaisant du courant sans nécessité d'une connaissance approfondie du modèle du système à contrôler ou de ses paramètres. Cependant, elle ne permet pas de contrôler la fréquence de commutation des

semi-conducteurs, ce qui entraîne la présence d'un grand nombre d'harmoniques dans les courants générés. Afin d'obtenir un fonctionnement à une fréquence de commutation fixe, le régulateur à hystérésis classique a été remplacé par un comparateur à hystérésis adaptatif. Ce régulateur repose sur un calculateur d'hystérésis, qui génère une fenêtre d'hystérésis afin de maintenir la fréquence de commutation dans une bande très étroite centrée autour de sa valeur moyenne programmée [22].

### **2.3.1 Calcul de la bande d'hystérésis adaptative**

La technique de contrôle du courant par bande d'hystérésis(HB) s'est avéré la plus appropriée pour toutes les applications de contrôle du courant. La commande de courant par bande d'hystérésis se caractérise par une stabilité inconditionnelle, une réponse très rapide et une bonne précision. D'autre part, la technique de base de l'hystérésis présente également plusieurs caractéristiques indésirables, telles qu'une fréquence de commutation irrégulière qui provoque des bruits acoustiques et la difficulté de concevoir des filtres d'entrée [22].

La largeur de bande du contrôleur de courant à hystérésis détermine l'erreur de mise en forme du courant admissible. En modifiant la largeur de bande, l'utilisateur peut contrôler la fréquence moyenne de l'onduleur connecté au réseau et évaluer la performance pour différentes valeurs de la largeur de bande de l'hystérésis. En principe, l'augmentation de la fréquence de fonctionnement de l'onduleur permet d'obtenir une meilleure forme d'onde de courant. Cependant, l'augmentation de la fréquence de commutation entraîne des pertes de commutation accrues et des problèmes liés aux interférences électromagnétiques. La gamme des fréquences de commutation utilisées est basée sur un compromis entre ces facteurs.

Le calculateur de la bande d'hystérésis adaptative fait varier la largeur de la bande d'hystérésis (HB) en fonction des grandeurs suivantes : la variation du courant de compensation instantanée, la tension d'alimentation et celle du bus continu.

La dérivation analytique donnée sur la figure (2.9) montre que, la fréquence de commutation ( $f_c$ ) peut être maintenue presque constante en changeant ( $HB$ ). Lorsque le courant injecté dans l'inductance tente de sortir de la bande d'hystérésis, l'interrupteur correspondant s'ouvre ou se ferme pour forcer le courant jusqu'à l'atteinte de la bande d'hystérésis [23].

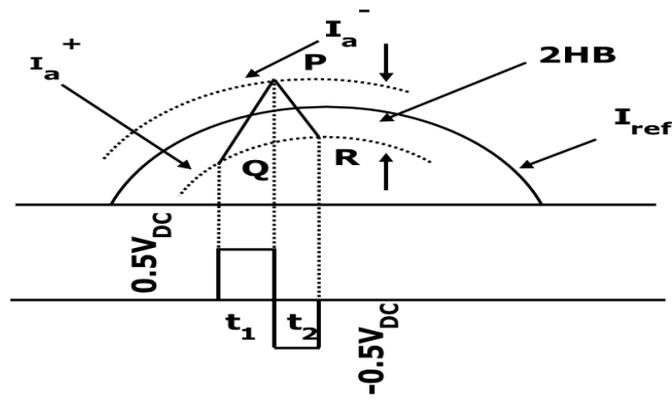


Fig.2. 9 Onde du courant et de la tension avec contrôle du par bande d'hystérésis [23].

Pour fournir une fréquence de commutation fixe des systèmes triphasés, plusieurs solutions ont été proposées. L'analyse mathématique décrit la relation entre la fréquence de découpage et les paramètres du système à étudier [27] :

$$\frac{dI_a^+}{dt} = \frac{1}{L} (0.5V_{DC} - V_s) \quad (2.6)$$

$$\frac{dI_a^-}{dt} = -\frac{1}{L} (0.5V_{DC} + V_s) \quad (2.7)$$

D'après la figure (2.9), on observe que :

$$\frac{dI_a^+}{dt} t_1 - \frac{dI_{ref}}{dt} t_1 = 2HB \quad (2.8)$$

$$\frac{dI_a^-}{dt} t_2 - \frac{dI_{ref}}{dt} t_2 = -2HB \quad (2.9)$$

La fréquence de commutation est donnée comme suit :

$$t_1 + t_2 = T_c = \frac{1}{f_c} \quad (2.10)$$

Où :  $t_1$  et  $t_2$  sont les intervalles de commutation respectifs.

En ajoutant les équations (2.8) et (2.9) et en les remplaçant par l'équation (2.10)

Nous pouvons écrire :

$$\frac{dI_a^+}{dt} t_1 + \frac{dI_a^-}{dt} t_2 - \frac{1}{f_c} \frac{dI_{ref}}{dt} = 0 \quad (2.11)$$

En soustrayant l'équation (2.9) de (2.8), on aura :

$$\frac{dI_a^+}{dt} t_1 - \frac{dI_a^-}{dt} t_2 - (t_1 - t_2) \frac{dI_{ref}}{dt} = 4HB \quad (2.12)$$

En substituant l'équation (2.7) dans (2.12), on obtient :

$$(t_1 + t_2) \frac{dI_a^+}{dt} - (t_1 - t_2) \frac{dI_{ref}}{dt} = 4HB \quad (2.13)$$

En substituant l'équation (2.7) dans l'équation (2.11) on obtient :

$$(t_1 - t_2) = \frac{dI_{ref}/dt}{f_c(dI_a^+/dt)} \quad (2.14)$$

En substituant l'équation (2.14) dans (2.13)

$$HB = \frac{0.125V_{DC}}{f_c L} \left[ 1 - \frac{4L^2}{V_{DC}^2} \left( \frac{V_s}{L} + m \right)^2 \right] \quad (2.15)$$

Où :  $f_c$  : Fréquence de commutation,  $m = \frac{di_{ref}}{dt}$ : la pente de l'onde de courant de commande.

$L$  : L'inductance de couplage et  $V_{DC}$  la tension du bus continu. Comme le montre l'équation (2.25), le  $HB$  est en fonction de la tension d'alimentation, de la tension du bus continue et du courant de référence des variations de modulation ( $m$ ) qui peuvent être contrôlés pour minimiser les effets de la distorsion du courant sur les formes d'ondes modulées. Les profils  $HB$  triphasés, à savoir  $HB_a, HB_b$  et  $HB_c$ , doivent être identiques pour les différentes phases afin d'obtenir des opérations symétriques entre les phases. La figure (2.10) montre le schéma fonctionnel du calcul adaptatif de  $HB$  pour la phase A [22].

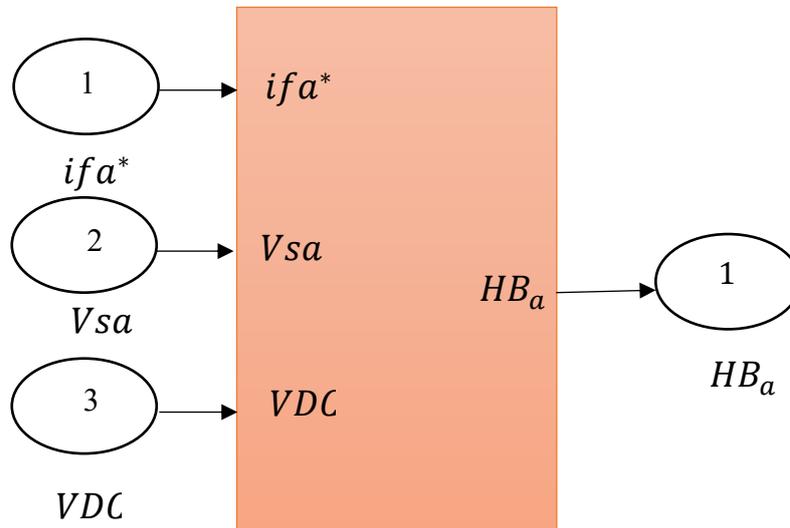


Fig.2. 10 Schéma fonctionnel de la bande d'hystérésis adaptative.

La logique de commutation des interrupteurs pour la phase (A) est donnée comme suit :

L'interrupteur supérieur à l'état *ON* et l'interrupteur inférieur à l'état *OFF* si :

$$(I_{ref} - I_{réel}) \leq HB$$

L'interrupteur supérieur à l'état *OFF* et l'interrupteur inférieur à l'état *ON* si :

$$(I_{ref} - I_{réel}) \geq HB$$

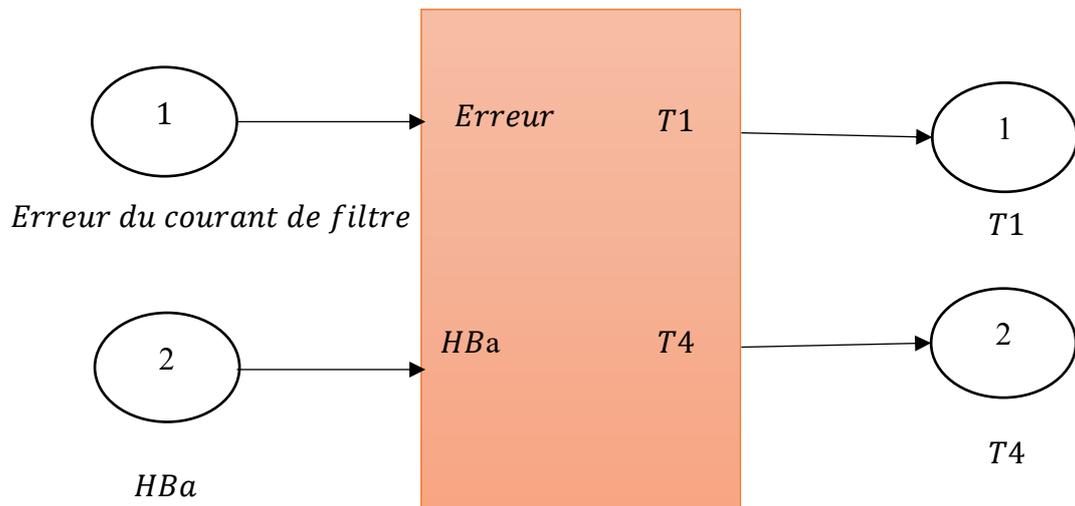


Fig.2. 11 Schéma montrant les impulsions de commutation générées par l'hystérésis adaptatif.

### 2.3.2 Régulateur PI

Le régulateur *PI*, abréviation de proportionnel intégral, est considéré comme le régulateur standard car il est le plus couramment utilisé dans l'industrie [20]. La figure (2.12) représente le schéma de régulation de la tension du bus continu du filtre étudié par le régulateur *PI* classique. Il est utilisé pour la régulation de la tension du bus continu du filtre et pour participer à la production du courant, de source de référence. La valeur crête du courant de source de référence est délivrée par ce régulateur.

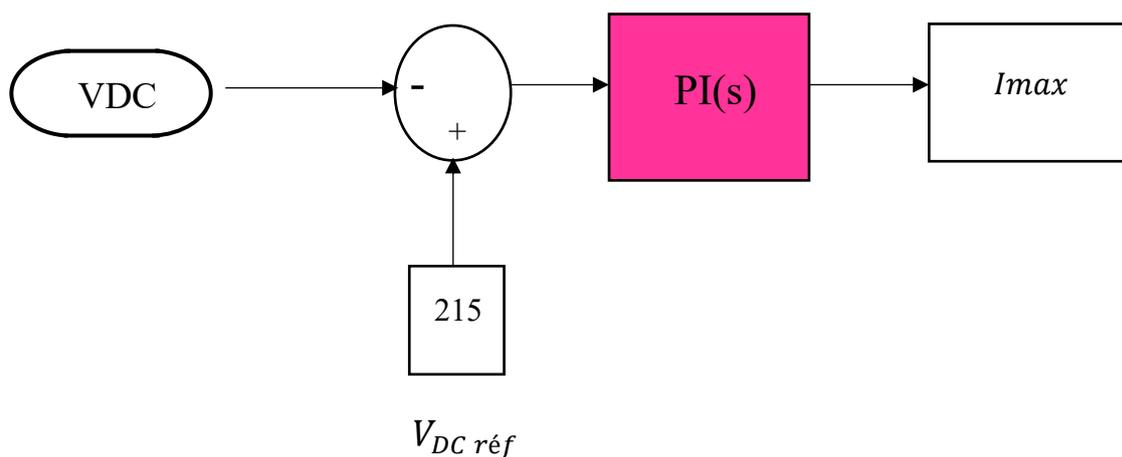


Fig.2. 12 Schéma bloc du régulateur PI classique du filtre étudié.

Les paramètres de simulation du filtre actif parallèle adaptatif sont présentés dans le tableau (2.2) :

**Tableau.2. 2** Valeurs des éléments caractérisant la structure étudiée.

<b>Fréquence Fondamentale de réseau (<math>F</math>)</b>	50 Hz
<b>Fréquence de commutation (<math>f_c</math>)</b>	50 KHz
<b>Tension de source maximale (<math>v_c</math>)</b>	100 V
<b>Résistance de source (<math>R_s</math>)</b>	0.1 $\Omega$
<b>Inductance de source (<math>L_s</math>)</b>	0.15mH
<b>Résistance de charge (<math>R_l</math>)</b>	6.7 $\Omega$
<b>Inductance de charge (<math>L_l</math>)</b>	20mH
<b>Inductance du filtre (<math>L_f</math>)</b>	0.66mH
<b>Condensateur du bus continu (<math>C_{DC}</math>)</b>	2200 $\mu F$
<b>Tension de référence (<math>V_{DC}^*</math>)</b>	215 V

## 2.4 Simulation sous MATLAB/Simulink de la commande adaptative du filtre actif parallèle

Les programmes de simulation développés ont été effectués en utilisant le logiciel MATLAB/Simulink qui permet de visualiser sur un intervalle de temps donné l'évolution des courants et de la tension continue lors de la mise en service du FAP avec le système (réseaux et charge non-linéaire) où la commande par hystérésis adaptatif a une fréquence de commutation fixe de  $f_c=50$  KHz. Pour étudier le comportement du FAP triphasé avec le réseau électrique commandé par des régulateurs à l'hystérésis adaptatif, le schéma de simulation de la figure (2.13) a été simulé sous logiciel MATLAB/Simulink.

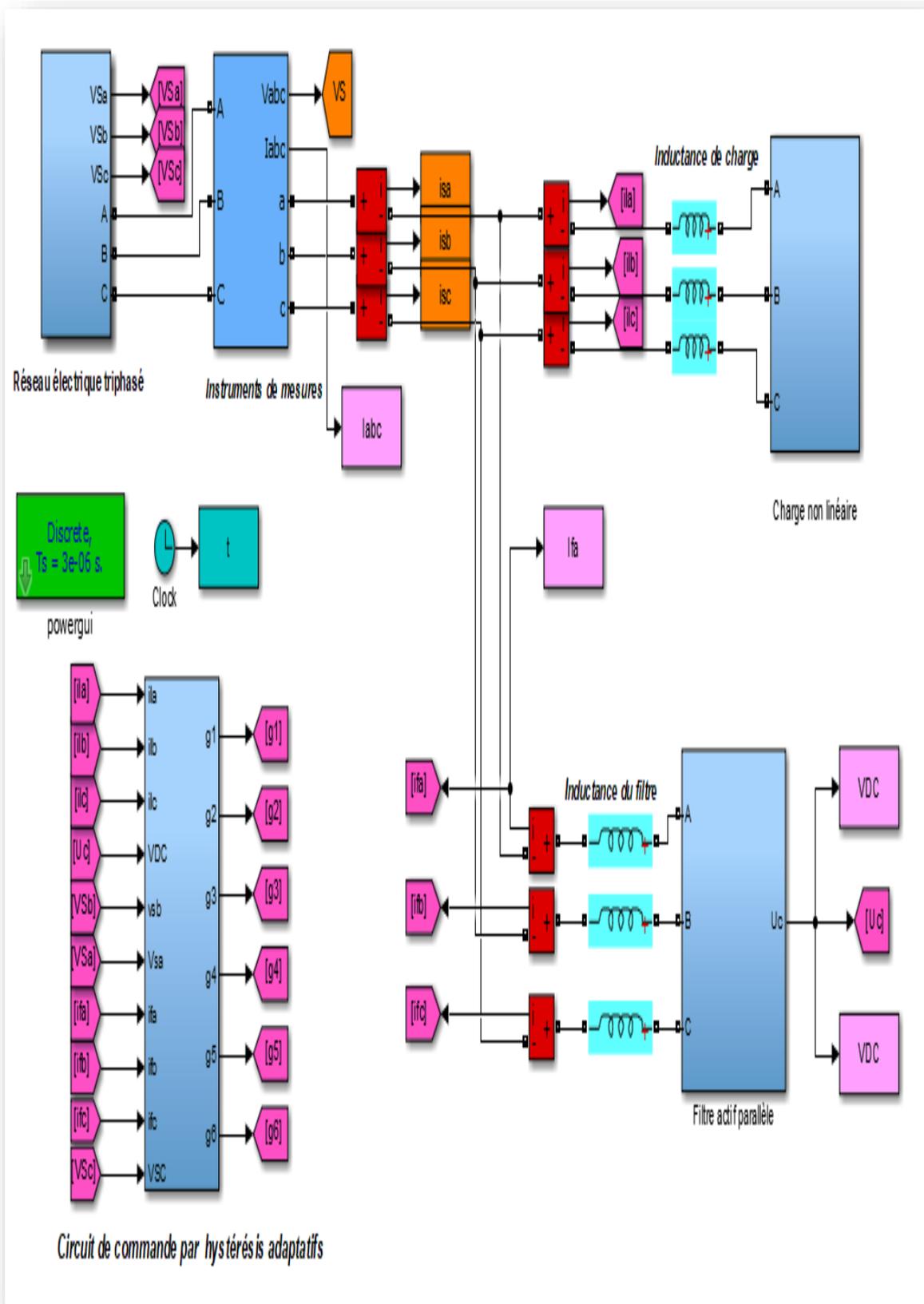


Fig.2. 13 Circuits de puissance et celui de commande de la stratégie adaptative du filtre actif parallèle.

### 2.4.1 Résultats de simulation avec interprétations

En présence du filtre actif parallèle doté de régulateurs à hystérésis adaptatifs, on remarque que les courants de sources sont sinusoïdaux et compatibles avec les tensions correspondantes comme le montre la figure (2.14).

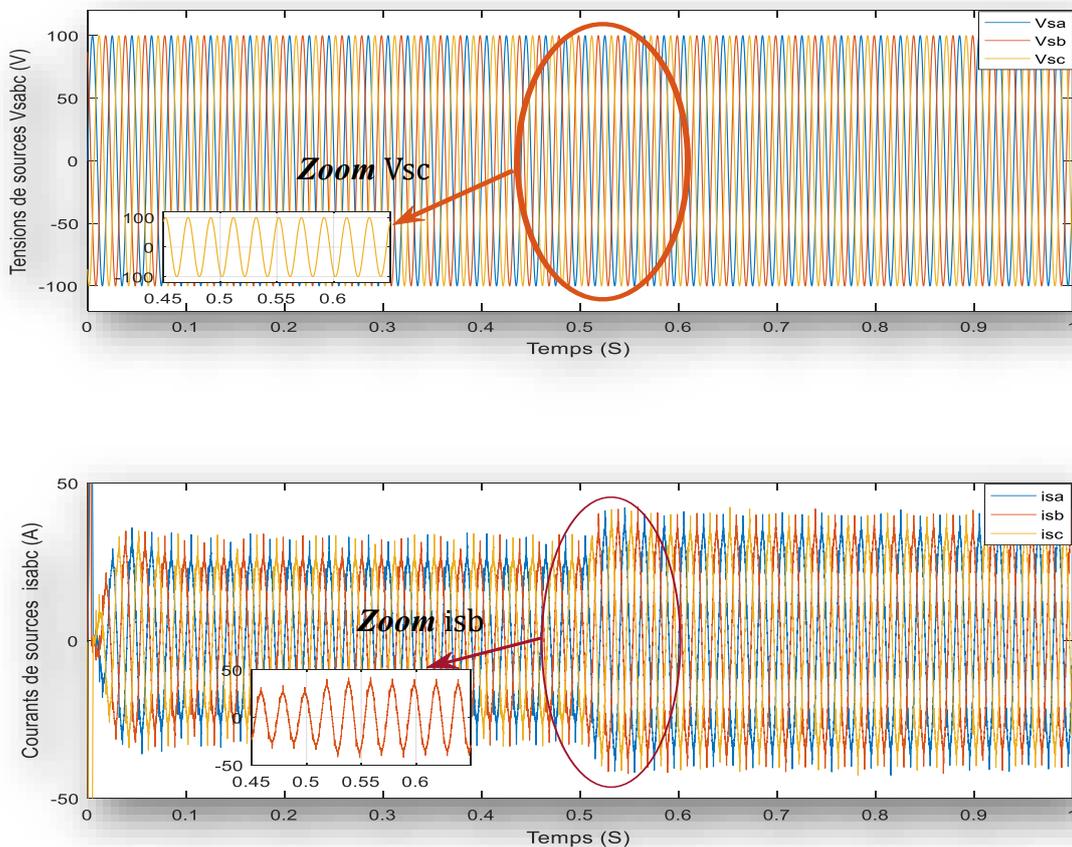


Fig.2. 14 Tensions et courants de sources de la commande adaptative du filtre.

D'autre part, la tension du bus continu suit parfaitement sa valeur de référence de 215 V comme l'indique la figure (2.15).

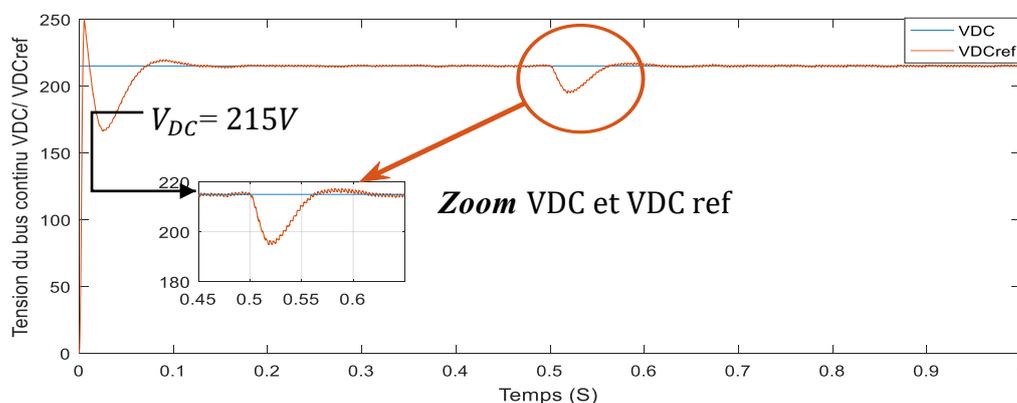


Fig.2. 15 Tension du bus continu de la commande adaptative du filtre.

Néanmoins, lors du test de la variation de la charge à l'instant  $t = 0.5$  (s), une chute de tension de 20 V est observée. Cette chute a repris sa valeur initiale de 215 V après un temps de 0.1 (s) grâce au régulateur PI classique utilisé. Les courants de sources, filtre et charge réagissent d'une manière remarquable à cette chute de tension provoquée comme la figure (2.16).

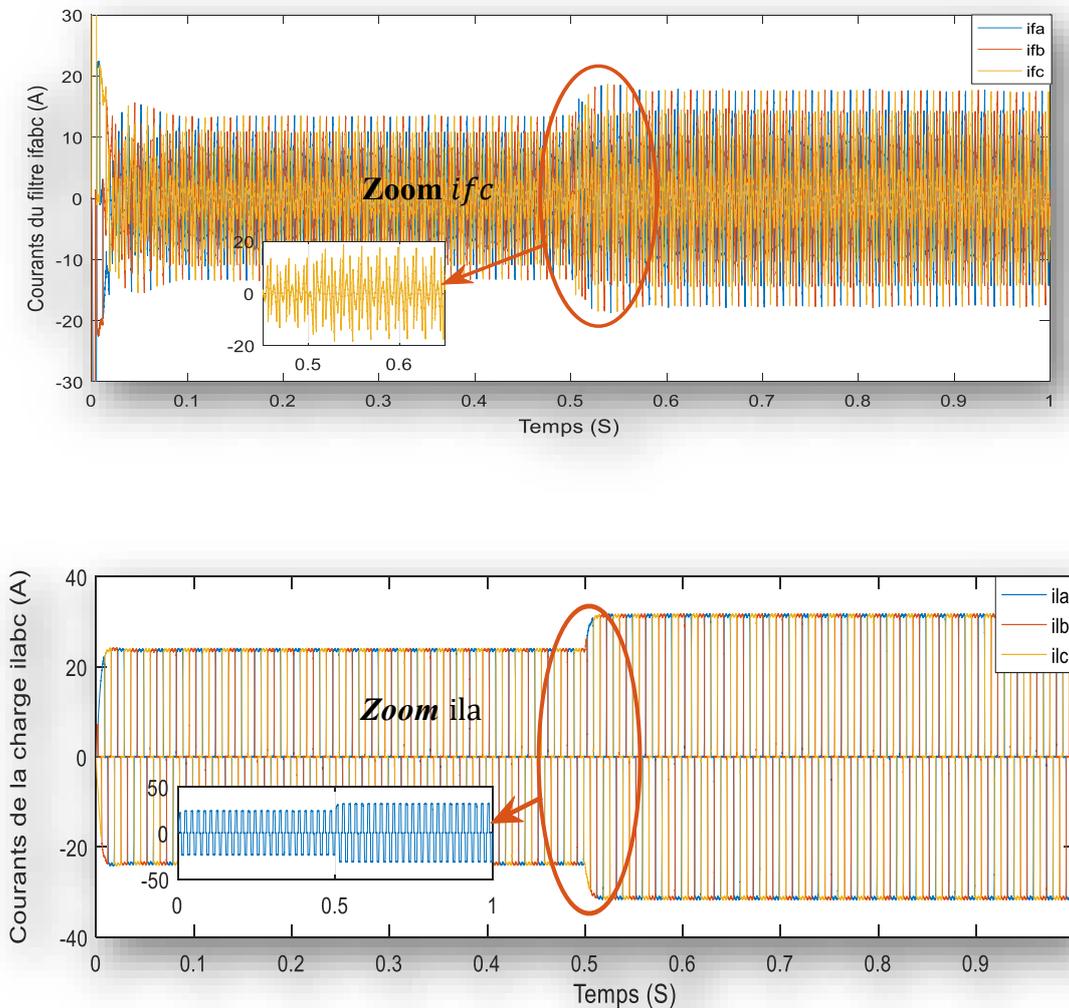


Fig.2. 16 Courants du filtre et de charge de la commande adaptative du filtre.

Sur le plan qualité d'énergie, les figures (2.17) et (2.18) montrent respectivement les formes d'ondes du courant de source avec leurs analyses spectrales pour les cas d'absence et de présence du filtre actif parallèle. Pour le fonctionnement sans présence du filtre, un  $THD$  du courant de source de 26.08% a été enregistré, alors qu'en cas de présence du filtre, la valeur du  $THD$  du courant de source sera égale à 5.95 %.

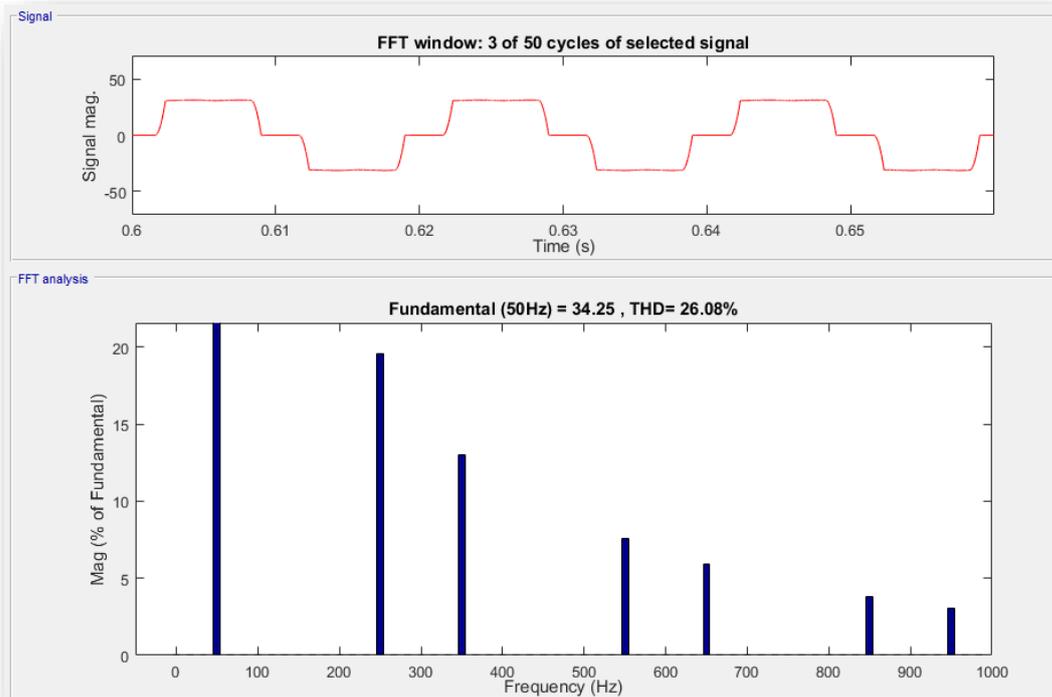


Fig.2. 17 THD du courant de la source de la première phase après filtrage.

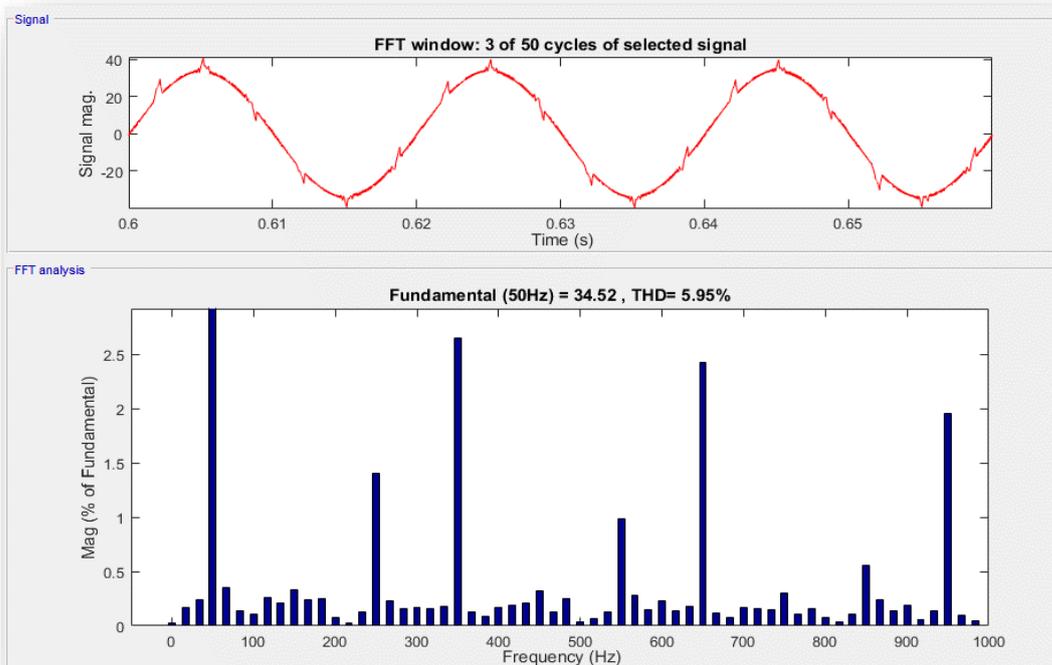


Fig.2. 18 THD du courant de la source de la première phase avant filtrage.

## **2.5 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté le fonctionnement et la simulation sous MATLAB du filtre actif parallèle triphasé adaptatif comme une solution moderne pour la dépollution du réseau électrique. Les résultats de simulation obtenus avec la commande étudiée montrent une réduction du taux de distorsion harmonique du courant de source par rapport à celui obtenu sans activation du système de filtrage. De plus, ce dispositif de filtrage fonctionne sous une fréquence de commutation fixe grâce aux régulateurs à hystérésis adaptatifs employés. Néanmoins, ces régulateurs présentent l'inconvénient de l'existence de plusieurs paramètres lors du calcul de la bande à hystérésis ( $HB$ ). Le prochain chapitre sera réservé à l'application de la logique floue pour surmonter ce problème.

# *Chapitre 03 :*

---

*Présentation et simulation du  
filtre actif parallèle basé sur  
l'intelligence artificielle*

---

### 3.1 Introduction

Aujourd'hui, la logique floue (en anglais fuzzy logic) est de grande actualité. Il s'agit d'une nouvelle méthode de traitement pour les problèmes de réglage ou de commande [28]. Dans ce chapitre, on présentera le principe de la logique floue et ses domaines d'applications. Puis, nous nous sommes tournés vers la simulation par MATLAB/Simulink de la commande intelligente basée sur la logique floue avec interprétations des résultats obtenus. Cette commande améliorée est caractérisée par des régulateurs à hystérésis flous. Enfin, nous avons effectué une étude comparative entre la commande adaptative et celle basée sur logique floue en vue de présenter les avantages de la commande intelligente du filtre étudié.

### 3.2 Principe et domaines d'applications de la logique floue

Le terme d'ensemble flou apparaît pour la première fois en 1965 lorsque le professeur Lotfi A. Zadeh, de l'université de Berkeley aux USA, publie un article intitulé « Ensembles flous » (Fuzzy sets). Il a réalisé depuis de nombreuses avancées théoriques majeures dans le domaine et a été rapidement accompagné par de nombreux chercheurs développant des travaux théoriques [29]. L'approche de logique floue est très efficace pour les systèmes contrôlés linéaires et non linéaires, alors que le modèle mathématique n'est pas nécessaire [29]. Les systèmes flous ont été utilisés dans diverses applications industrielles, gestionnaires et médicales. Parmi ces applications on peut citer [28] :

- Système audiovisuel (caméra autofocus, caméra vidéo avec stabilisateur photos, copieurs, ...etc) ;
- Appareils électroménagers (machines à laver, aspirateurs, autocuiseurs, etc) ;
- Système autonome mobile ;
- Systèmes de transport (trains, métros, ascenseurs... etc) ;
- Systèmes de contrôle/commande dans la plupart des domaines de production industrielle.

Généralement, le contrôleur flou est exécuté en trois étapes essentielles : la fuzzification, l'inférence de règles et la défuzzification [30], comme s'est récapitulé dans la figure (3.16).

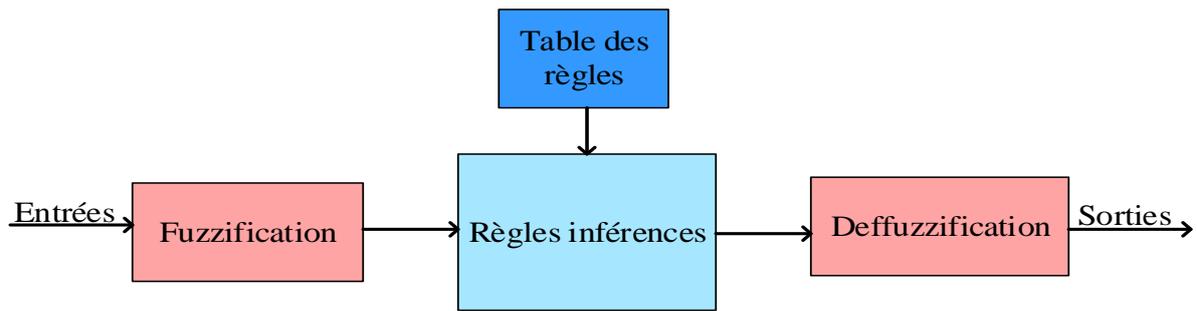


Fig.3. 1 Structure du contrôleur à logique floue.

L'étape de Fuzzification est le processus de changement des variables d'entrée numériques en équivalents linguistiques, qui sont obtenues en utilisant des fonctions d'appartenance. L'étape d'inférence de règles détermine la sortie du contrôleur de logique floue par la méthode Mamdani avec une technique max-min en fonction de l'ensemble appartenant à la base de règles. L'étape de défuzzification convertit les variables linguistiques en une valeur numérique qui calcule la variable de contrôle de sortie [31].

### 3.3 Commande adaptative floue du filtre actif parallèle

Le développement du programme de simulation a été réalisé en utilisant le logiciel MATLAB/Simulink. Ce logiciel permet de représenter graphiquement l'évolution des différents résultats au fil du temps lors de la mise en service du FAP dans le cas de la commande adaptative basée sur la logique floue. Nous avons changé l'hystérésis adaptative par l'hystérésis adaptative basée sur la logique floue avec le maintien du régulateur PI classique qui a pour rôle de régulation de la tension du bus continu et de participation à la production du courant de source de référence. Le schéma global de la commande adaptative floue développé est représenté par la figure (3.2).

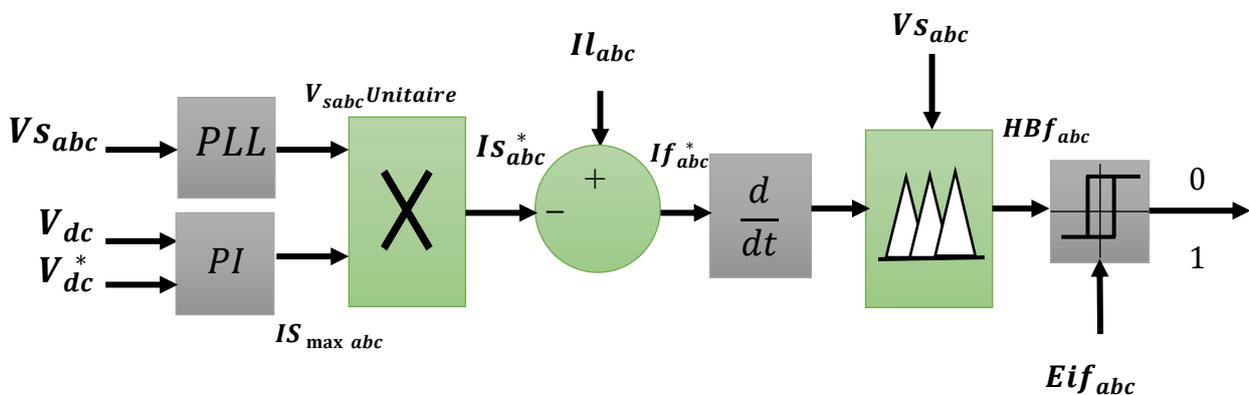


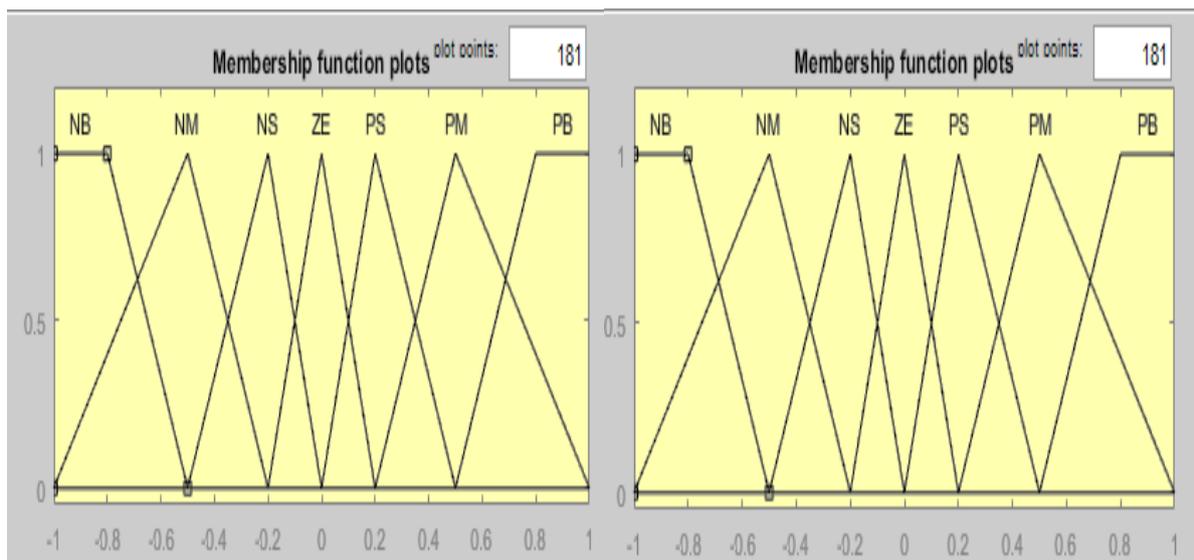
Fig.3. 2 Schéma de la commande adaptative basée sur la logique floue.

-Les variables d'entrée ( $V_s$ ) et  $(di_f^*/dt)$  sont divisées en sept ensembles flous qui sont dénotés comme suit : Négative Big (NB), Négative Medium (NM), Négative Small (NS), Zéro (ZE), Positive Small (PS), Positif medium (PM) et Positive Big (PB). La base de règles relie les entrées floues à la sortie floue par la règle maîtresse de la syntaxe : «si X et Y, alors Z », comme indiqué dans le tableau (3.1) [27].

**Tableau.3. 1** Règle de contrôle de la logique floue.

Entrées	$V_s$							
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
$\frac{di_f^*}{dt}$	NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
	NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	PS
	NS	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
	ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
	PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB
	PM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB	PB
	PB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB

Les fonctions d'appartenance sont sélectionnées pour les variables d'entrée et de sortie comme présenté dans les figures (3.17) et (3.18) :



**Fig.3. 3** Fonctions d'appartenances de l'entrée ( $V_s$ ).

**Fig.3.4** Fonctions d'appartenances de l'entrée  $(\frac{di_f^*}{dt})$

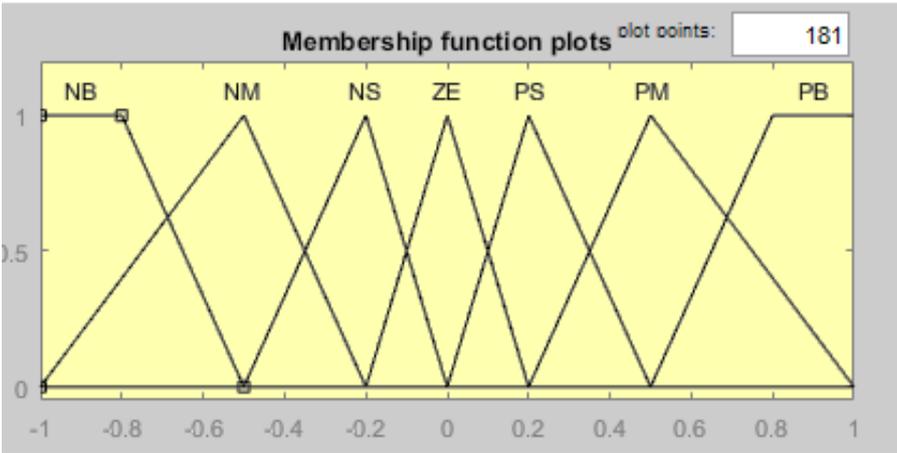


Fig.3. 5 Fonctions d'appartenances de la sortie ( $HB_f$ ).

3.4 Résultats de simulation avec interprétations

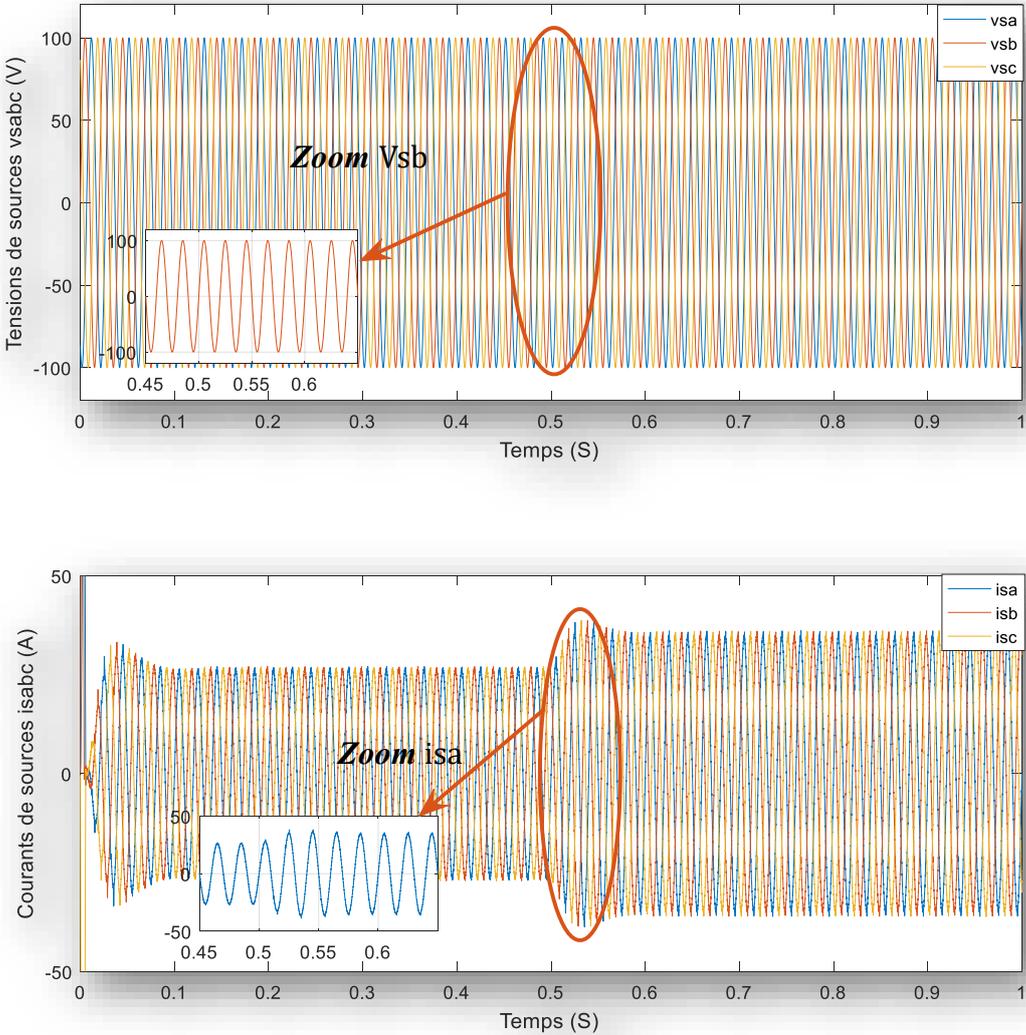


Fig.3. 6 Tensions et courants de sources de la commande adaptative basée sur la logique floue.

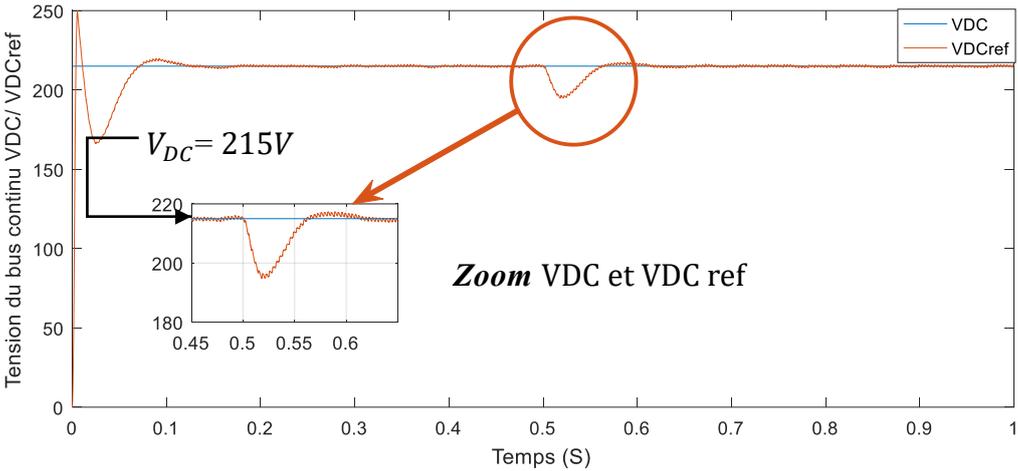


Fig.3. 7 Tension du bus continu de la commande adaptative basée sur la logique floue.

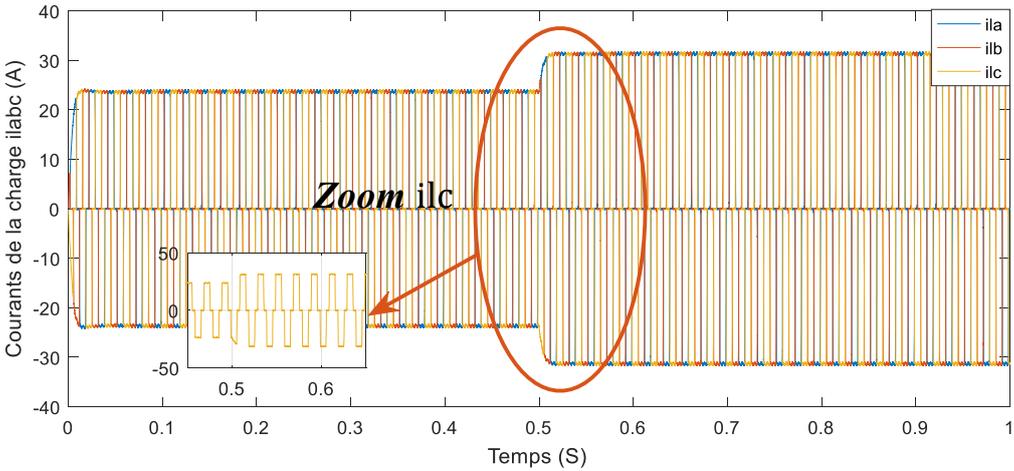
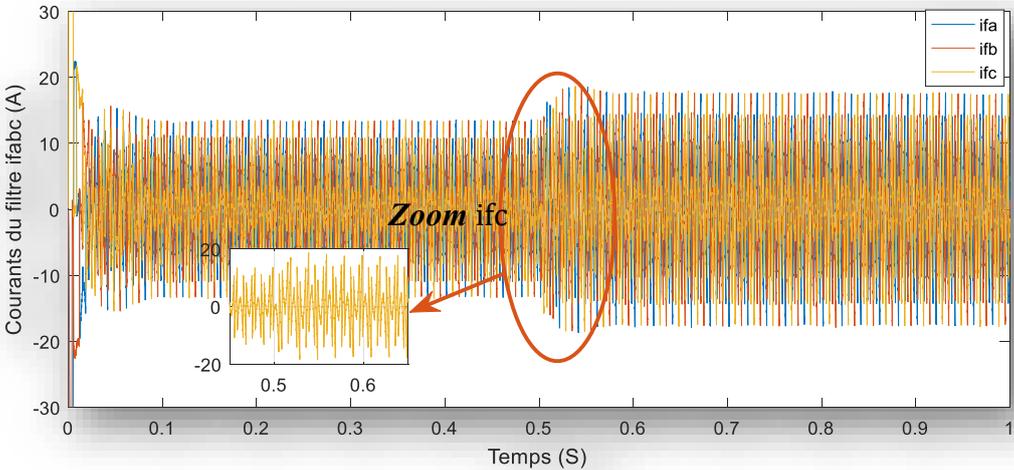


Fig.3. 8 Courants du filtre et de charge de la commande adaptative basée sur la logique floue du filtre actif parallèle.

A partir des résultats obtenus dans les figures précédentes en présence du filtre actif parallèle au cas où l'hystérésis adaptative basée sur la logique floue est employé, on remarque que :

- Les courants de sources sont apparus sinusoïdaux au cas où la commande adaptative basée sur la logique floue est appliquée, ce qui a permis de réduire les harmoniques des courants de source. Ces derniers sont compatibles avec les tensions comme montré dans la figure (3.6).
- La tension de bus continu est arrivée à sa valeur imposée (215V). Ensuite, la perturbation de charge de cette tension a été rejetée complètement comme l'indique la figure (3.7). Mais, lors du test de changement de charge à l'instant  $t=0.5(s)$ , une chute de tension égale à 20V a été observée. Cette chute de tension revient à sa valeur initiale (215V) à travers l'utilisation d'un régulateur PI classique.
- Les courants de filtre et charge représentés par leurs formes appropriées répondent de manière acceptable à la chute de tension induite comme le montre la figure (3.8).
- Au cas d'absence du filtre actif parallèle, le courant de source est distordu et présente un THD élevé de 26.08% comme indiqué dans la figure (3.9). Le THD du courant de source après filtrage est de 0.84% (voir figure (3.10)). Cette valeur respecte la norme IEEE-519. Donc, le filtre actif parallèle contrôlé par la logique floue a pu rendre la forme du courant de la source de forme sinusoïdale et par conséquent réduction du taux de distorsion harmonique.

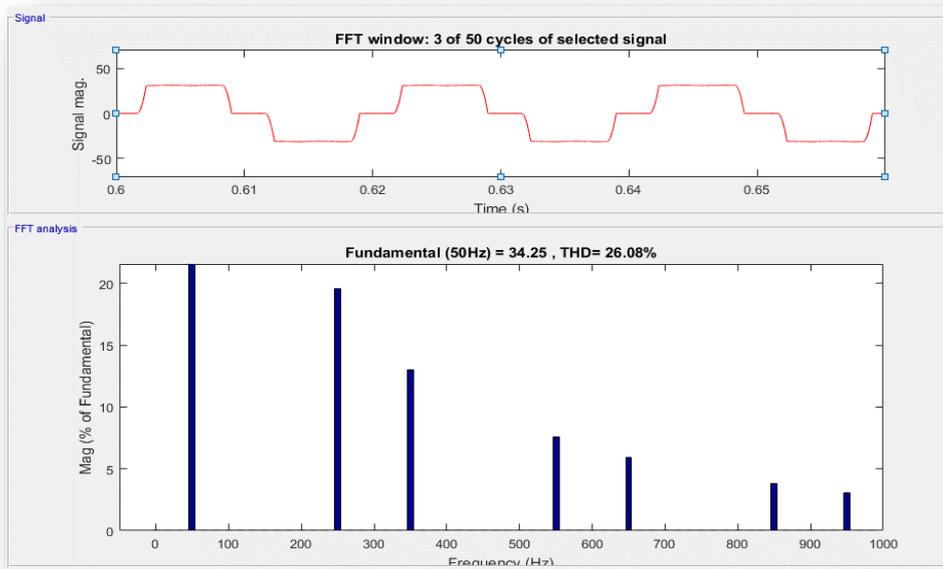


Fig.3. 9 THD du courant de la source avant filtrage.

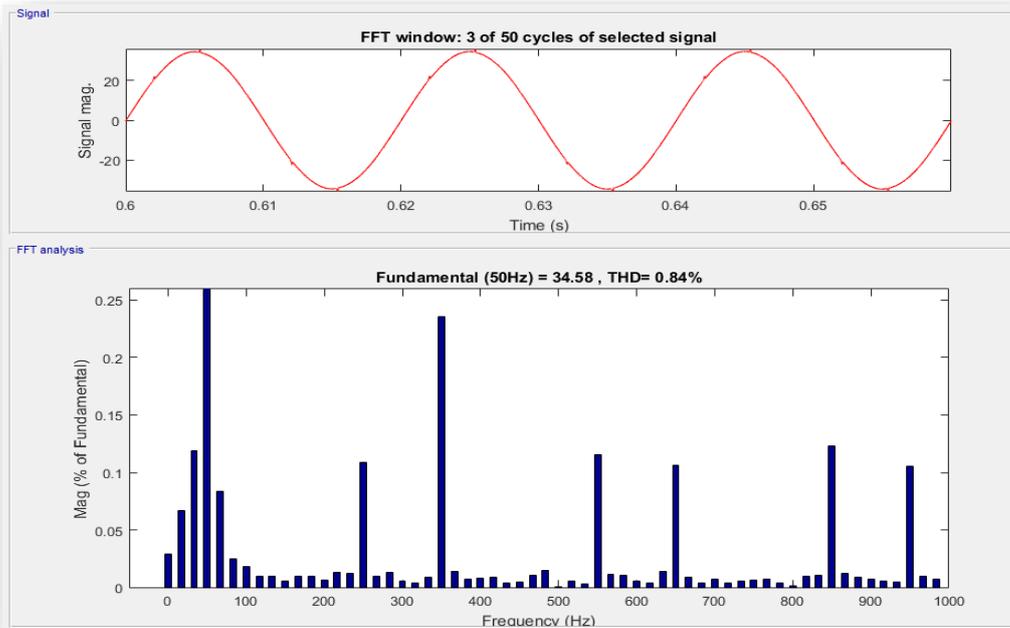


Fig.3. 10 THD du courant de la source après filtrage.

### 3.5 Étude comparative des deux techniques de commandes traitées

Une étude comparative entre les deux techniques de commandes traitées a été effectuée dont les résultats obtenus sont donnés par le tableau suivant :

Tableau.3. 2 THD avec et sans filtrage de la commande adaptative et de la commande adaptative floue du filtre actif parallèle.

<b>Sans filtre actif parallèle</b>	26.08%				
<b>Filtre basé sur la commande adaptative</b>	$f_c=25$ KHz	$f_c=30$ KHz	$f_c=35$ KHz	$f_c=45$ KHz	$f_c=50$ KHz
	7.31%	7.53%	7.33%	6.98%	5.95%
<b>Filtre basé sur la commande adaptative floue</b>	0.84%	0.84%	0.84%	0.84%	0.84%

Après utilisation des deux commandes adaptatives et celle basée sur la logique floue, on en déduit les remarques suivantes :

Le THD de la commande adaptative après filtrage est de 5.95% (plus élevé), alors que celui de la commande adaptative basée sur la logique floue qui est de 0.84% (valeur minimale). On note que la commande adaptative basée sur la logique floue nous a permis d'obtenir de meilleurs résultats par rapport à ceux obtenus par la commande à hystérésis adaptatifs tel que montré à travers les  $THD_s$  obtenus. Chaque fois que nous changeons la valeur de la fréquence, nous remarquons un changement du THD, de sorte que lorsque la valeur de fréquence augmente, le rapport THD diminue pour le cas de la commande adaptative du filtre étudié.

## 3.6 Conclusion

Ce dernier chapitre a été consacré à la présentation et simulation du filtre actif parallèle contrôlé par une commande adaptative dotée de trois régulateurs à hystérésis flous. Au vu des résultats obtenus, la qualité des courants de source pour la commande adaptative floue est meilleure que celle de la commande adaptative. En outre, le calcul de la bande à hystérésis des régulateurs adaptatifs flous a été réalisé seulement avec deux paramètres qui sont  $\frac{di_f^*}{dt}$  et  $V_s$ .

---

*Conclusion générale  
et perspectives*

---

### Conclusion générale et perspectives

Dans ce mémoire de fin d'études, un système efficace de dépollution des réseaux électriques utilisant un système de filtrage actif parallèle basé sur un contrôle intelligent est présenté. Ce système est conçu pour faire face aux problèmes de pollution électrique présents sur le réseau qui affectent la qualité du courant alternatif circulant dans le système. La prédiction et le contrôle de la circulation des courants harmoniques dans les lignes et entre les charges sont difficiles à maîtriser. Après avoir analysé les perturbations harmoniques et leurs impacts sur le réseau électrique, des normes harmoniques ont été proposées pour remédier à ces perturbations. Dans ce mémoire, on a proposé le filtre actif parallèle triphasé contrôlé par deux commandes : commande adaptative et celle basée sur la théorie de la logique floue pour améliorer la qualité d'énergie dans le réseau électrique. Les résultats obtenus sous MATLAB/Simulink en termes de qualité des courants de sources pour la commande adaptative floue sont meilleurs que ceux de la commande adaptative. Le taux de distorsion harmonique de ces courants de sources est évalué à 0.84% respectant ainsi la norme de IEEE-519. D'autre part, cette commande intelligente a assuré un fonctionnement du système de filtrage sous une fréquence de commutation fixe grâce aux comparateurs à hystérésis adaptatifs flous. Le maintien du régulateur PI classique pour ces deux commandes traitées (adaptative et adaptative floue) a permis de régler efficacement la tension du bus continu du système de filtrage et de participer à la production des courants de sources de références pour les commandes étudiées. Enfin, dans notre travail, plusieurs perspectives peuvent être évoquées. Nous citerons à titre d'exemple la validation expérimentale de la commande adaptative floue et l'application des réseaux neuronaux artificiels.

---

*Liste des Symboles et  
Acronymes*

---

# Liste des Symboles et acronymes

---

## Liste des Symboles et Acronymes

### Symboles :

#### Abréviations

#### Titres

$I_1$	Valeur efficace du courant fondamentale
$I_h$	Valeur efficace du courant harmonique
$P$	Puissance active
$Q$	Puissance réactive
$D$	Puissance déformante
$C$	Capacité du condensateur
$V_{DC}$	Tensions aux bornes du condensateur
$L$	Inductance
$L_f$	Inductance du filtre
$R_f$	Résistance du filtre
$F$	Fréquence fondamentale de réseau
$f_c$	Fréquence de commutation
$V_s$	Tensions de source
$R_s$	Résistance de source
$L_s$	Inductance de source
$R_l$	Résistance de charge
$L_l$	Inductance de charge
$I_s$	Courants de source
$I_f$	Courant du filtre
$I_{réf}$	Courant du filtre de référence
$\frac{di_f^*}{dt}$	Dérive de courant du filtre de référence
$E_f$	Erreur du courant de filtre

# Liste des Symboles et acronymes

---

## Acronymes :

### Abréviations

### Titres

THD	Taux de distorsion harmonique
Fp	Facteur de puissance
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
FAS	Filtre actif série
FAP	Filtre actif parallèle
MOSFT	Métal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
IGBT	Insolated Gate Bipolar Transistor
GTO	Gate Turn-Off thyristor
PI	Proportionnel-Intégral
PLL	Phase Locked Loop
BH	Bande hysteresis
HBf	Bande hysteresis floue

---

# *Références Bibliographiques*

---

## Références Bibliographiques

- [1] Boucif Abdelmalek, « Filtrage actif d'un réseau électrique », Mémoire de master, Université Mohamed kheider Biskra, 2014.
- [2] Soualmi A, Labidi A « Amélioration de la qualité d'énergie d'un réseau électrique monophasé via un système de filtrage actif parallèle », Mémoire de Master, Université de Mohamed El Bachir El Ibrahimi, Bordj Bou Arreiridj, 2022.
- [3] Gattal Boulaares, « Méthodes d'analyses des perturbations électriques dans la qualité de l'énergie électrique en utilisant des nouvelles techniques pour l'application aux creux de tension », Mémoire de Master, Université de Batna, 2012.
- [4] Omeiri Amar, « Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant », Thèse de doctorat, Université de Annaba, 2007.
- [5] Chellali Zoubir, « Amélioration de la qualité de l'énergie électrique par un filtre actif d'harmonique », Thèse de doctorat, Université de Badji Mokhtar, Annaba, 2015.
- [6] Z. KHALIL, B. LOTFI « Etude et simulation du filtrage actif parallèle basé sur la méthode des puissances p-q », Mémoire de Master, Université de Mohamed El Bachir El Ibrahimi, Bordj Bou Arreiridj, 2022.
- [7] Sona Othman « Modélisation et commande à base d'une représentation par réseau de pétri d'un filtre actif parallèle avec un onduleur multicellulaire série », Thèse de doctorat, École nationale d'ingénieurs de Gabès, Tunisie, 2021.
- [8] Boukhadoum Aziz « Contribution a l'analyse et la réduction de la pollution harmonique dans le réseau électrique », Mémoire de Magister, Université de Badji Mokhtar, Annaba, 2007.
- [9] Yousfi Abdelkader « Amélioration de la qualité d'énergie électrique en utilisant un onduleur de tension a cinq niveaux », Mémoire de Magister, Université de Chlef, 2008.
- [10] Kenouche Arezki, Kourichi Ilyas, « Etude d'un filtre actif parallèle », Mémoire de Master, Université de Bejaia, 2020.
- [11] Abdelmadjid Chaoui, « Filtrage Actif Triphasé Pour Charges Non Linéaires », Thèse de Doctorat, Université de Ferhat Abbas de Sétif, 2010.
- [12] L. Benchaita « Etude, par simulation numérique et expérimentation, d'un filtre actif parallèle à structure courant avec une nouvelle méthode de contrôle-commande », Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de lorraine, Nancy, 1998.
- [13] Ghadbane Ismail « Etude et réalisation d'un filtre actif parallèle en utilisant différentes stratégies de contrôle », Thèse de doctorat, Université Mohamed Kheider –Biskra, 2016.
- [14] S. Merzouk, S. Mourad « Etude et simulation d'un filtre actif série », Mémoire de Master, Université de Tizi-ouzou, 2018.

- [15] Belhadj Kheira, Bouzir Nessrine, « Harmoniques et dépollution du réseau électrique », Mémoire de Master, Université Mohamed Khider de Biskra, 2022.
- [16] Benjamin Potelon «Étude et conception de filtres hyperfréquences hybrides planaires – volumiques», Thèse de doctorat, Université de Bretagne occidentale, 2007.
- [17] Amaia Lopez de Heredia Bermeo, « Commandes avancées des systèmes dédiés à l'amélioration de la qualité de l'énergie : de la basse tension a la montee En Tension », Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble, France, 2006.
- [18] François Bergeras, « Etude de nouvelles structures de filtres actifs intégrées en hyperfréquences », Thèse de doctorat, Université de limoges, 2010.
- [19] Alali Mohamad , Alaa-Eddin, «Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension », Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur–Strasbourg I, 2002.
- [20] J. Xu «Filtrage actif parallèle des harmoniques des réseaux de distribution d'électricité», Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 1994.
- [21] Salim Mouttou , « nouvelles approches de commande d'un filtre actif parallèle à source de courant » Mémoire de magister, Université du québec à trois-rivières comme exigence partielle de la maîtrise en génie électrique, Octobre 2002.
- [22] H. R, IMANI Jajarmi, AZAH Mohamed, H. Shareef «Adaptive interval type2 fuzzy hysteresis-band current-controlled active power filter for power quality improvement», Ubiyanto department of electrical, electronic, and systems engineering, Universiti Kebangsaan Malaysia .
- [23] Satyaranjan Jena, B.Chitti babu, S.R.Samantaray and Mohamayee Mohapatra. «Comparative study between adaptive hysteresis and SVPWM current control for grid-connected inverter system», department of electrical engineering, national institute of technologie, Rourkela.2011.
- [24] Amaia Lopez De Heredia Bermeo, « Commandes avancées des systèmes dédiés a l'amélioration de la qualité de l'énergie: de la basse tension à la montée en tension », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble avec le Label Européen, 2006.
- [25] M. Sarra, « Contribution à l'étude des filtres actifs hybrides », Thèse de doctorat, Université de Sétif, 2013.
- [26] Boualem Boukezata,« Étude et commande d'une chaine de conversion d'énergie d'un système solaire photovoltaïque », Thèse de doctorat, Universite Ferhat Abbas - Setif 1, 2017.
- [27] H.R, Imani Jajarmi, Azah Mohamed, H. Shareef Subiyanto, « Adaptive interval type2 fuzzy hysteresis-band current-controller active power filter for power quality improvement », PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY Journal, ISSN 0033-2097, R. 90 NR 9/2014.

- [28] Telli Abdelwahab, Chouidira Ibrahim « Commande par logique flou d'un filtre actif parallèle avec correction du facteur de puissance », Université Mohamed Boudiaf, Msila, 2017.
- [29] S. Ouchen, A. Betka, S. Abdeddaim, A. Menadi, « Fuzzy-predictive direct power control implementation of a grid connected photovoltaic system, associated with an active power filter », *Energy Conversion and Management* 122 (2017) 515–525.
- [30] B. Benlahbib, N. Bouarroudj, S. Mekhilef, T. Abdelkrim, A. Lakhdari, A. Bouchafaa, « A Fuzzy Logic Controller Based on Maximum Power Point Tracking Algorithm for Partially Shaded PV Array-Experimental», 2018.
- [31] B. Boukezata, A. Chaoui, J. P. Gaubert, M. Hachemi, « An improved fuzzy logic control MPPT based P&O method to solve fast irradiation change problem», *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 8 (2016) ,doi: 043505-1-043505-14.