

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université A. MIRA, Bejaia  
Faculté de Technologie  
Département de Génie Électrique



## *Mémoire fin de cycle*

En vue de l'obtention du diplôme de Master  
En Électrotechnique  
Option : *Réseaux électriques et Commande des systèmes électriques*

## Thème

---

*Régulation de la tension par DVR commandé  
en tension par contrôleur flou*

---

*Présenté par :*

*M. BELLOUL Fares*

*M. REHAL A/ Hakim*

*Encadrés par :*

*M. ZIANE KHOUDJA A.*

*M. ADLI M.*

*Année universitaire: 2014 /2015*

### Remerciements

*Avant tout, nous remercions Dieu le tout puissant qui nous a donné la force et la Patience de faire ce travail.*

*Nos plus vifs remerciements vont à :*

*Nôtres promoteurs Mr A.Ziane-Khodja et Mr M.Adli d'avoir bien voulu diriger ce travail, Pour leurs disponibilité, leurs franchise, leurs aspects sérieux dans le travail et leurs bagages de connaissance qu'elle nous a fait partager.*

*Aux enseignants qui nous ont suivis tout au long de notre cursus universitaire.*

*A tous les membres du jury pour avoir accepté de juger notre travail.*

*Et à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.*

*Fares & A/Hakim*

**Dédicaces**

*Je tiens à dédier ce modeste travail à:*

*A ma mère et mon père*

*A mes sœurs*

*A mes frères*

*A mes ami(e)s*

*Sans oublier mon binôme Hakim et tous mes copains de chambre*

*omar, yacine, azedine, Nassim, Samir, Khothir.*

*A toute la famille Belloul*

*Et à toute la promotion 2014/2015.*

*BELLOUL Fares*

*Dédicaces*

*Avec l'aide de Dieu tout puissant est enfin achevé ce travail,*

*Lequel je dédie à toutes les personnes qui me sont chères :*

*À la mémoire de mon cher père qui m'a orienté vers la lueur du savoir et de la*

*connaissance depuis mon jeune âge,*

*Aux témoignages d'affection, d'amour et de Grande reconnaissances, aux*

*Êtres les plus Chers que j'ai dans ma vie ;*

*Ma mère et mon frère, mes sœurs.*

*Sans oublier mon binôme qui m'a aidé à faire ce travail.*

*Un clin d'œil à la chambre A116*

*Mes copains de chambre*

*Omar, Yacine, Azedine, Fouad et Fahim.*

*Et à mes chers amis (es).*

**REHAL A/Hakim.**

Remerciement .....	i
Dédicaces .....	ii
Tables des matières .....	iii

Introduction générale .....	1
-----------------------------	---

### **Chapitre I : Généralités sur les perturbations et moyens d'atténuation.**

Introduction .....	3
I.1. Étude des principales perturbations et leurs sources .....	3
I.1.1. Qualité de l'énergie électrique .....	3
I.1.1.1. Qualité de la tension.....	3
I.1.1.2. Qualité du courant .....	3
I.2. Classification des perturbations électriques .....	4
I.2.1. Creux de tension et coupures brèves .....	4
I.2.2. Les surtensions.....	5
I.2.3. Déséquilibre de tension.....	6
I.2.4. Les fluctuations de tension .....	6
I.2.5. Variation de fréquence d'alimentation .....	7
I.2.6. Les harmoniques .....	7
I.2.7. Les inter-harmoniques .....	8
I.3. Solutions aux perturbations .....	10
I.3.1. Solutions traditionnelles de dépollution .....	10
I.3.2. Solutions modernes de dépollution .....	11
I.3.2.1. Filtres actifs.....	11
I.3.2.1.1. Filtre actif parallèle (FAP) .....	11
I.3.2.1.2. Filtre actif série (FAS).....	12
I.3.2.1.3. Combinaison parallèle-série active (UPQC) .....	12
I.3.2.2. Combinaison hybride active et passive .....	13
I.3.2.2.1. Filtres actif série et filtre passif parallèle .....	14
I.3.2.2.2. Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.....	14
I.3.2.2.3. Filtres actif et passif en parallèle avec la charge.....	15
Conclusion .....	15

## **Chapitre II : Notions sur les dispositifs FACTS.**

INTRODUCTION.....	17
II.1. Concept FACTS : un projet EPRI.....	17
II.2. Classification des systèmes FACTS .....	18
II.2.1. Compensateurs séries .....	18
II.2.1.1. TCSC (Compensateur série contrôlé par thyristors) .....	18
II.2.1.2. SSSC (Compensateur série synchrone statique).....	18
II.2.1.3. DVR (restaurateur dynamique de tension) .....	19
II.2.2. Compensateurs parallèles.....	20
II.2.2.1. SVC (Compensateur statique de l'énergie réactive) .....	20
II.2.2.2. STATCOM (Compensateur statique synchrone).....	21
II.2.3. Compensateur série parallèle (hybride).....	22
II.2.3.1. UPFC (Variateur de charge universel).....	22
II.2.3.2. IPFC (Contrôleur de flux de puissance d'interligne).....	22
II.3. Synthèse.....	23
II.4. Amélioration de la qualité d'énergie par DVR.....	24
Introduction .....	24
II.4.1. Structure d'un DVR.....	24
II.4.2. Technologie et fonctionnement du DVR.....	24
II.4.3. Modélisation vectorielle de DVR .....	26
II.4.4. Effet du DVR sur une ligne électrique.....	27
CONCLUSION .....	28

## **Chapitre III : Notions sur la logique floue**

III.1. Historique.....	28
III.2. Introduction.....	28
III.3. Avantages et intérêts de la logique floue .....	29
III.3.1. Intérêts.....	29
III.3.2. Avantages .....	29
III.4. Bases de la logique floue.....	29
III.4.1. L'ensemble flou .....	29
III.4.2. Variable linguistique .....	31
III.4.3. Fonction d'appartenance.....	31
III.4.4. Operateurs de la logique floue .....	32
III.4.4.1. La réunion.....	32
III.4.4.2. L'intersection .....	33
III.4.4.3. Le complément .....	33
III.4.5. Base de règle .....	34
III.4.6. Structure interne d'un système floue.....	35
III.4.6.1. La fuzzification.....	35
III.4.6.2 La base de connaissance .....	36
III.4.6.2.1 Base de données .....	36
III.4.6.2.2 Base de règles .....	36

III.4.6.3 L'inférence .....	36
III.4.6.4 Défuzzification.....	36
III.4.7. Régulateur flou.....	36
III.4.7.1. Fuzzification des entrées .....	37
III.4.7.2. Inférence floue .....	38
III.4.7.3. Défuzzification.....	39
III.5. Application de contrôleur flou sur le DVR .....	41
III.5.1. Fuzzification.....	41
III.5.2. Base de règle .....	42
Conclusion .....	42

## **Chapitre IV : Modélisation et simulation**

Introduction .....	44
IV.1. présentation du système à simuler.....	44
IV.2. Représentation et principe de fonctionnement.....	45
IV.2.1. Stratégie de contrôle de DVR .....	47
IV.3. Modélisation de système à étudier .....	47
IV.3.1. modélisation de DVR.....	47
IV.3.1.1. bloc de contrôleur flou.....	50
IV.3.1.2. Onduleur .....	50
IV.4. Les étapes de la simulation.....	50
IV.5. Simulations et interprétations des résultats .....	50
a. Tension.....	51
b. Puissance active et réactive .....	53
c. Vitesse d'éolienne ( <b>Wr</b> ) .....	55
d. Le couple résistant ( <b>Tr</b> ).....	55
e. Le signal de commande d'un régulateur flou.....	56
IV.5.1.1. Interprétation des résultats .....	56
a) Cas d'un creux de tension en absence du DVR.....	56
b) Cas d'un creux de tension en présence du DVR.....	57
IV.5.2. Surtension .....	57
a. Tension.....	57
b. Puissances active et réactive .....	59
c. Vitesse d'éolienne ( <b>V</b> ) .....	61
d. Le couple résistant ( <b>Tr</b> ).....	62
e. Le signal de commande d'un régulateur flou.....	62
IV.5.2.1. Interprétation des résultats.....	63
a) Cas de surtension en absence d'un DVR .....	63
b) Cas de surtension en présence d'un DVR.....	63
Conclusion .....	63

Conclusion générale.....	64
Références .....	65
Liste des figures .....	vi
Liste des tableaux .....	viii
index glossémique .....	ix



# Introduction générale

### Introduction générale

Actuellement, la très grande majorité de l'énergie électrique consommée dans le monde est acheminée par l'ensemble des réseaux électriques existants. En un peu plus d'un siècle, ce que l'on entend par la formule « *réseau électrique* » est passé de la mutualisation de quelques unités de production à une interconnexion généralisée entre continents. Si les étendues et les ramifications qui caractérisent ces réseaux en multiplient les performances et les potentiels, il faut savoir qu'elles font également des systèmes complexes, gérés par une multitude d'intervenants et tiraillés par des contraintes technico-économiques de plus en plus pesantes<sup>[1]</sup>.

Les exigences croissantes qu'impose l'industrie à la qualité de l'énergie électrique ainsi que la diversification de cette même qualité, amenée par la libération du marché de l'électricité ont provoqué un besoin de dispositifs qui, par leur garantie d'une qualité supérieure de la tension d'alimentation, prémunissent les charges sensibles contre pannes et arrêts de production<sup>[2]</sup>.

Une des solutions possibles pour faire face à ces problèmes est l'utilisation de composants FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems, ou système de transmission Flexible à courant alternatif) qui peuvent contribuer à atténuer les problèmes rencontrés dans l'exploitation des réseaux électriques. Le concept FACTS, introduit en 1986 par Electric Power Research Institute (EPRI, Institut pour la recherche sur la tension électrique) 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 semi-conducteurs de puissance et plus particulièrement des éléments commandables tels que le thyristor et thyristor GTO. Ces éléments jouent le rôle d'interrupteurs très rapides, ce qui confère aux dispositifs FACTS une vitesse et une fiabilité bien supérieures à celles des systèmes électromécaniques classiques<sup>[3]</sup>.

Plusieurs types de FACTS, différents sur les plans architectural et technologique, ont été développés. Parmi eux, les plus connus sont le SVC (Compensateur statique de l'énergie réactive), le TCSC (compensateur série contrôlé par Thyristor), le STATCOM (compensateur Synchrone statique), UPFC (Contrôleur unifié de l'écoulement de puissance), IPFC (Contrôleur de flux de puissance d'interligne) et SSSC (Compensateur série synchrone statique), et DVR (restaurateur dynamique de tension). Chacun de ces dispositifs possède ses propres caractéristiques et peut être utilisé pour répondre à des besoins bien précis. Le choix du dispositif approprié est donc essentiel et dépend des objectifs à atteindre<sup>[3]</sup>.

L'objectif de ce modeste travail est d'étudier les fonctions offertes par le DVR dans la qualité de l'énergie électrique. Il peut être utilisé, particulièrement pour régler la tension, et la flexibilité dans le transit de puissance. Commandé par la méthode heuristique, déjà en vigueur dans plusieurs domaines tels que la médecine, le traitement de signal, la robotique, etc., dite « *logique floue* ». Le travail sera développé en quatre chapitres:

Le premier sera consacré à la présentation des différents types de perturbation, leurs origines, leurs conséquences sur les équipements et machines industrielles ainsi que les moyens d'atténuation tels que les deux variétés de dépollution, la traditionnelle et la moderne.

En deuxième chapitre, nous traiterons de la compensation par les nouvelles technologies des compensateurs basés sur les composants de l'électronique de puissance dits «*FACTS*».

La régulation par logique floue fera l'objet du troisième chapitre. Il y sera présenté une introduction à la logique floue puis son application pour la régulation de la tension d'une charge par un DVR (Restaurateur dynamique de tension).

Le dernier chapitre sera consacré à la modélisation et la simulation de quelques réseaux perturbés et aux interprétations des résultats.

Une conclusion générale clôturera ce mémoire.

# Chapitre I

## Généralités sur les perturbations, conséquences et moyens d'atténuation

## Introduction

Depuis quelques années, les règles en application du secteur de l'énergie électrique ont évolué. C'est le fait de l'ouverture à la concurrence de la production d'électricité, de l'opportunité pour les consommateurs d'électricité d'en choisir leurs fournisseurs. Dans ce contexte, la compétitivité des compagnies d'électricité est tributaire de la qualité de l'énergie fournie, facteur désormais différenciateur. Sa garantie, pour un industriel notamment, peut incarner un critère de choix du fournisseur d'énergie. Il va sans dire, en effet, que pour les industriels, une mauvaise qualité de l'énergie électrique peut s'avérer une cause de dysfonctionnement ou même d'arrêt des outils de production. Le coût des perturbations peut donc, au final, être très élevé car il doit tenir compte du manque à produire, de la remise en marche de l'outil de production, des retards de livraison... Ces problèmes sont devenus d'autant plus importants que les équipements sensibles aux perturbations de la tension et/ou eux-mêmes générateurs de perturbation se sont généralisés<sup>[1]</sup>.

Les principales perturbations susceptibles d'altérer le fonctionnement optimal des équipements et procédés industriels sont : creux de tension, harmoniques et inter-harmoniques, fluctuations de tension ou Flickers, déséquilibres de tension et surtensions.

Nous débuterons ce chapitre par un exposé sur l'état d'art des perturbations affectant la qualité de l'énergie électrique et leurs origines. En deuxième partie, nous nous intéresserons aux conséquences de ces perturbations et aux normes en vigueur. Enfin, seront passées en revue les solutions envisagées propres à pallier à ces problèmes.

### I.1. Étude des principales perturbations et leurs sources

Les perturbations, à vrai dire, seraient innombrables en ceci comme dans d'autres domaines, nous en aborderons quelques-unes des plus préjudiciables.

#### I.1.1. Qualité de l'énergie électrique

Combinaison d'une paire de qualités, celles de la tension et du courant, la qualité de l'énergie électrique se définit selon deux notions comme il sera développé dans la suite de ce paragraphe<sup>[8]</sup>.

##### I.1.1.1. Qualité de la tension

L'énergie électrique distribuée s'effectue, dans la pratique, sous forme d'un ensemble de tensions constituant un système alternatif triphasé, qui possède quatre caractéristiques principales : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie.

##### I.1.1.2. 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 les tensions par quatre paramètres : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie. Dans le cas idéal, les trois courants sont d'amplitude et de fréquence constantes, déphasés de  $2\pi/3$  radians entre eux, et de forme purement sinusoïdale.

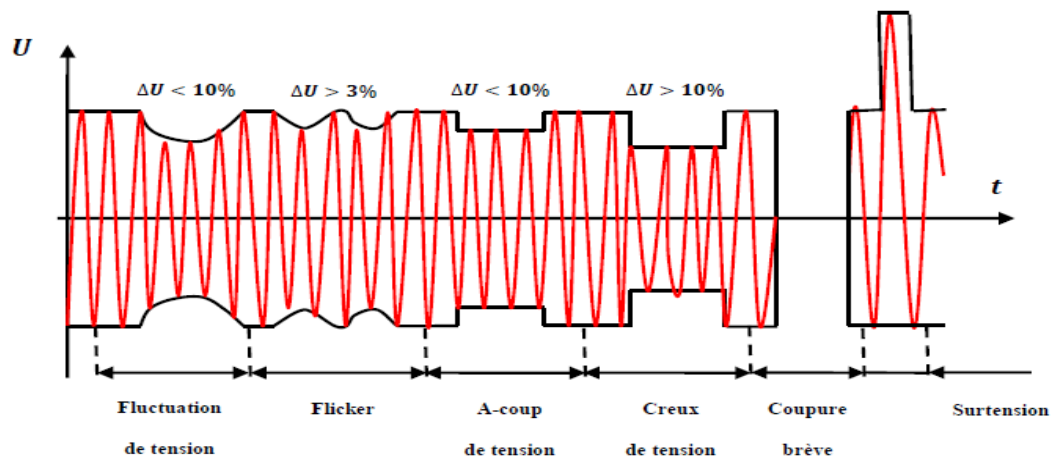
L'expression « *qualité du courant* » est d'usage rare, car la qualité du courant est étroitement liée à la qualité de la tension et la nature des charges. Pour cette raison, l'expression

« *qualité de l'énergie électrique* » sera souvent réduite à celle de « *qualité de tension* ». C'est l'hypothèse que nous retiendrons dans la suite de ce document, où le terme de « *qualité de l'énergie* » s'appliquera uniquement à celle de la tension.

**I.2. Classification des perturbations électriques**

En se basant sur les paramètres caractérisant la tension et énumérés au paragraphe précédent, on distingue six familles de perturbation électriques <sup>[5] [8]</sup> :

- Creux de tension et coupures brèves ;
- Surtension ;
- Déséquilibre de tension ;
- Fluctuations de tension ;
- Variation de fréquence d'alimentation ;
- Les harmoniques et inter-harmoniques.



*Figure.I.1.* Exemple de perturbations réseau basse tension (BT).

**I.2.1. Creux de tension et coupures brèves**

Un creux de tension est une brusque réduction de la tension, en un point du réseau électrique, suivie de son rétablissement après une courte durée allant d'une demi-période à quelques secondes<sup>[6]</sup>.

Les coupures brèves peuvent être considérées comme des creux de tension d'amplitude 100%. Un creux de tension peut être produit par des manœuvres d'enclenchement mettant en jeu des courants de forte intensité ou par le fonctionnement de protection consécutif à l'apparition de défauts dans le réseau.

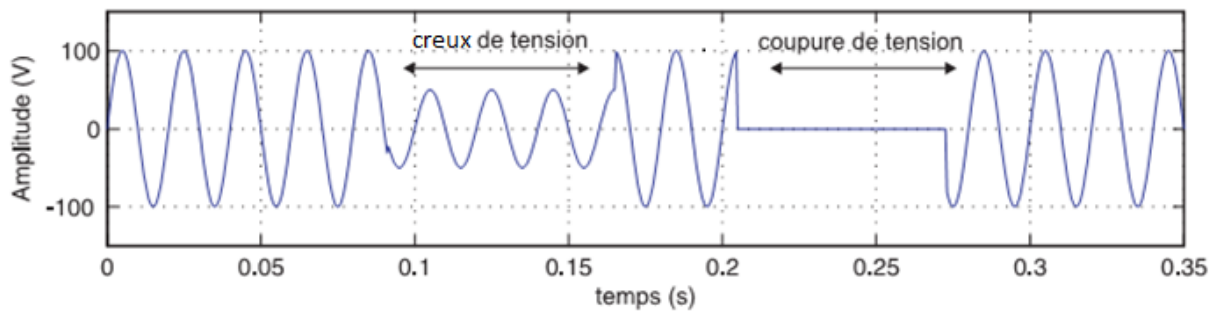


Figure I.2. Creux et coupure de tension.

### I.2.2. Les surtensions

On qualifie de surtension toute augmentation de tension, simple ou composée en fonction du temps, dépassant la valeur crête de 0.1 pu à 0.8 pu. Autrement dit, ce sont des perturbations qui se superposent à la tension nominale du réseau illustré sur la figure I.3. Elles peuvent apparaître<sup>[7]</sup> :

- Entre phases ou différents circuits, dit mode différentiel ;
- Entre conducteurs actifs et la masse ou la terre, dit mode commun.

Les surtensions peuvent être principalement d'origine externe (coup de foudre et propagation d'une surtension HT à travers un transformateur vers un réseau interne d'usine) ou interne (manœuvres de coupure ou de fermetures d'appareils de protection ou de commandes).

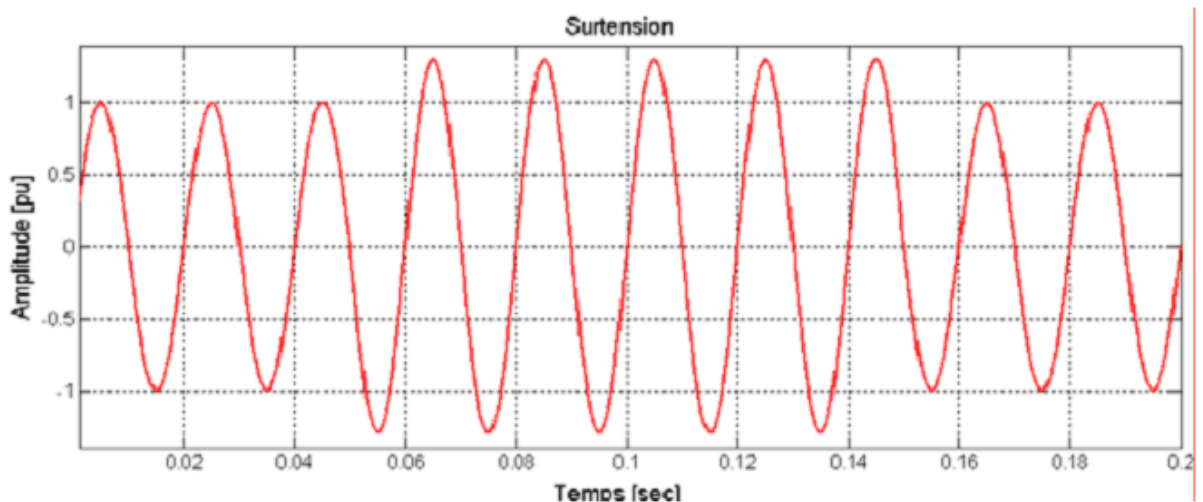
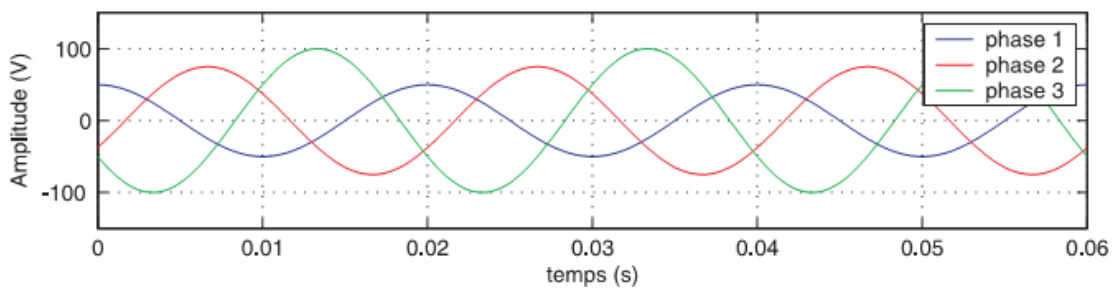


Figure I.3. Exemple de surtension.

**I.2.3. Déséquilibre de tension**

Le phénomène de déséquilibre de tension est la situation où les trois tensions du système triphasé ne sont pas égales en amplitude et/ou ne sont pas décalées normalement les unes par rapport aux autres de 120°. Le taux de déséquilibre est habituellement défini en utilisant la méthode des composantes symétriques, par le rapport du module de la composante inverse (ou homopolaire) à celui de la composante directe. Les tensions inverses d'un réseau (ou homopolaire) résultent pour l'essentiel de la circulation des courants inverses (ou homopolaire) produits par des charges déséquilibrées<sup>[5]</sup>.

La cause majeure de déséquilibre résulte de la présence de charges monophasées réparties de façon non équilibrées sur les trois phases du réseau. Dans les réseaux de basse tension, c'est particulièrement le cas puisque la grande majorité des charges sont connectées entre phase et neutre. Dans les réseaux de moyenne tension, les charges monophasées peuvent être connectées entre phases ou entre phase et neutre. Des charges monophasées importantes sont constituées par les sous-stations des chemins de fer à courant alternatif et les fours à induction monophasés<sup>[5][11]</sup>.



**Figure I.4.** Déséquilibre d'amplitude.

**I.2.4. Les fluctuations de tension**

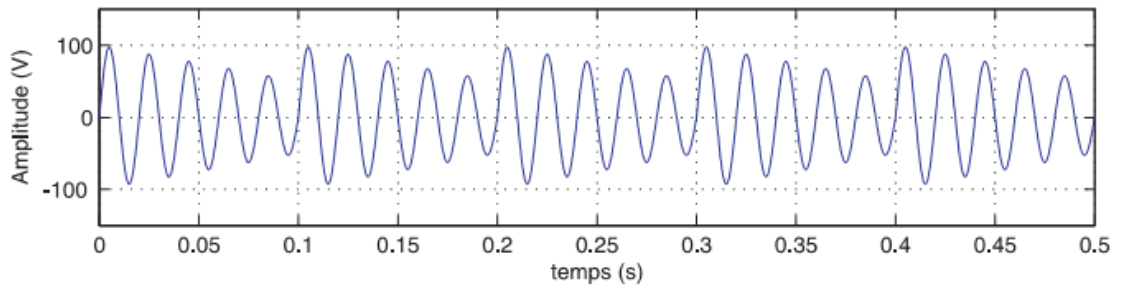
Les fluctuations de tension peuvent être décrites comme une variation périodique de l'enveloppe de la tension ou comme une suite de variations de tension aléatoires. Sur ces variations, il faut différencier les fluctuations de tension des variations lentes qui sont dues aux variations progressives de la consommation dans les réseaux.

Dans les réseaux de basse tension, les appareils électrodomestiques sont la source principale des fluctuations de tension, mais chaque appareil ne gêne qu'un nombre limité de consommateurs. En général, les principales sources de fluctuation de tension sont les charges industrielles.

- Machines à souder à résistance ;
- Laminoirs ;
- Gros moteurs à charges variables ;
- Fours à arc.



La mise en/hors du service de batteries de condensateurs ou plus généralement le raccordement de charges importantes produit des variations de tension en créneau. Notons que les fluctuations produites par ces activités industrielles peuvent toucher un grand nombre de consommateurs à partir de la même source.

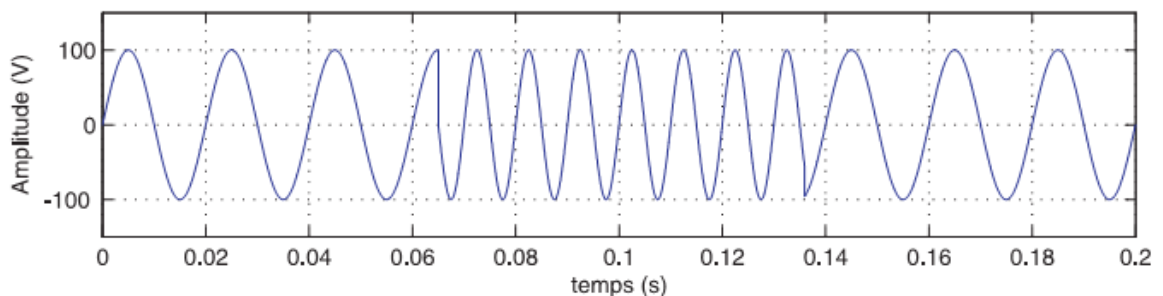


**Figure I.5.** Exemple de fluctuation de la tension.

**I.2.5. Variation de fréquence d'alimentation**

La fréquence d'un réseau alternatif est directement liée à la vitesse de rotation des alternateurs. La fréquence dépend de l'équilibre dynamique entre la charge et la puissance des usines de production. Ainsi lorsque le point d'équilibre change, de petites variations de fréquence surgissent.

Dans les réseaux publics d'alimentation, la capacité de production est normalement excédentaire par rapport à la consommation. Cela permet de maintenir les variations de fréquence à l'intérieur de la plage de fréquences désirées. Toutefois, il peut arriver qu'une partie importante de la production ou de la consommation disparaisse. Il s'ensuit des variations de fréquence qui sortent de la plage normalement tolérée. Dans de tels cas, une partie de la production ou de la consommation doit être déconnectée pour rétablir l'équilibre aussi vite que possible<sup>[6]</sup>.



**Figure I.6.** Variation de la fréquence.

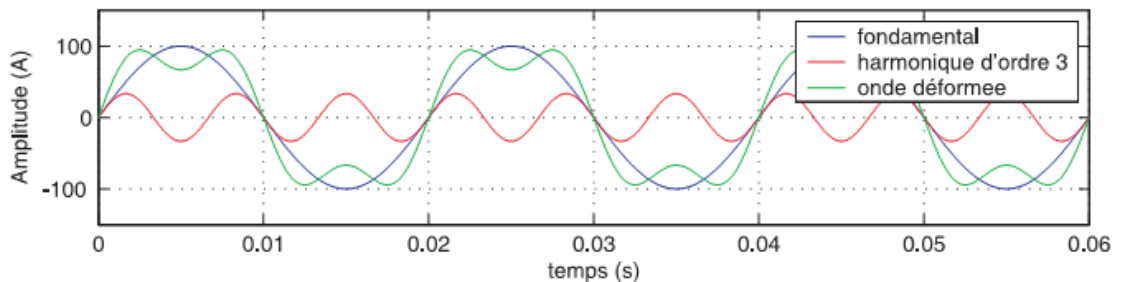
**I.2.6. Les harmoniques**

On désigne par harmoniques les tensions ou les courants sinusoïdaux dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence du réseau (50 Hz dans notre cas).

Les perturbations harmoniques sont généralement créées par des appareils munis de dispositifs à caractéristique courant/tension non linéaire. Ces appareils peuvent être considérés comme des sources de courants harmoniques. Les courants harmoniques produits par les différentes sources provoquent des chutes de tension harmonique sur les impédances du réseau.

Par suite du raccordement de charges capacitatives (par exemple, les condensateurs de correction de facteurs de puissance) et de l'effet capacitif des câbles, des résonances série ou parallèle peuvent se produire sur le réseau et provoquer des amplifications de la tension harmonique même en des points éloignés de la charge perturbatrice<sup>[8]</sup>.

Les courants harmoniques sont produits dans de faibles proportions et avec de faibles niveaux de distorsion par les appareils de production, de transport et de distribution d'électricité. Ce sont les charges domestiques et industrielles qui provoquent la plus grande proportion de courants harmoniques avec des niveaux de distorsion relativement élevés<sup>[6]</sup>.



**Figure I.7.** Onde déformée et sa décomposition.

### I.2.7. Les inter-harmoniques

Entre les harmoniques de courant et de tension réseau, on peut observer d'autres fréquences, qui ne sont pas des multiples entiers du fondamental. Elles peuvent apparaître soit sous la forme de fréquences discrètes, soit sous forme d'un spectre continu à large bande. On trouve ce type de source aussi bien dans les réseaux à basse qu'à moyenne et haute tension. Sur les réseaux à basse tension, ces perturbations sont rapidement amorties et ne se propagent donc qu'aux appareils proches.

Les sources principales de perturbation sont les convertisseurs statiques de fréquence, les cyclo-convertisseurs, les cascades hypo-synchrones, les moteurs asynchrones, les machines à souder (sur les réseaux de basse tension), les fours à arc (sur les réseaux de moyenne et haute tension). Le tableau suivant, permet de résumer toutes les notions précitées<sup>[15]</sup> :

**Tableau. I.1.** Récapitulatif des différentes harmoniques.

Types de perturbation	Origines	conséquences	Exemples de solutions
Variation et fluctuation de la tension	La variation importante de charge (machine à souder, four à arc...)	Fluctuation de luminosité des lampes (papillotement ou Flicker).	Compensateur électromécanique d'énergie réactive, compensateur automatique en temps réel, compensateur électronique série, régulateur en charge.
Creux de tension	Court-circuit, surcharges, maintenance, déclenchement intempestif	Perturbation ou arrêt du procédé : perte de données, données erronées, ouverture de contacteur, verrouillage de variateurs de vitesse, ralentissement de moteur, extinction de lampes à décharge	ASI, compensateur automatique en temps réel, régulateur électronique dynamique de tension ; démarreur progressif, compensateur électronique série. Augmenter la puissance de court-circuit (Pcc). Modifier la sélectivité des protections.
Coupures	Court-circuit, surcharges, maintenance, déclenchement intempestif.		ASI, permutation mécanique de sources, permutation statique de sources, groupe à temps zéro, disjoncteur <i>shunt</i> , téléconduite.
Harmoniques	Charges non linéaires (variateurs de vitesse, fours à arc, machines à souder, lampes à décharge, tubes fluorescents...).	Surcharges (du conducteur de neutre, des sources...), déclenchements intempestifs, vieillissement accéléré, dégradation du rendement énergétique, perte de productivité.	Self anti-harmonique, filtre passif ou actif, filtre hybride, inductance de ligne. Augmenter la Pcc. Confiner les charges polluantes. Déclasser les équipements.
Inter-harmonique	Charges fluctuantes (fours à arc, machines à souder...), convertisseur de fréquence.	Perturbation des signaux de tarification, papillotement (Flicker).	Réactance série.

Surtension transitoire	Manœuvre d'appareillage et de condensateurs, foudre.	Verrouillage de variateurs de vitesse, déclenchements intempestifs, destruction d'appareillage, incendies, pertes d'exploitation.	Parafoudre, parasurtenseur, enclenchement synchronisé, résistance de pré-insertion, self de choc, compensateur automatique statique.
Déséquilibre de tension	Charges déséquilibrées (charges monophasées de forte puissance...).	Couples moteurs inverses (vibrations) et sur-échauffement des machines asynchrones.	Équilibrer les charges. Compensateur électronique <i>shunt</i> , régulateur électronique dynamique de tension. Augmenter la Pcc.

[15]

### I.3. Solutions aux perturbations

Pour diminuer les perturbations en tension ou en courant, il est possible d'agir à deux niveaux :

- Du côté de la source, en filtrant la tension du réseau ou en améliorant le réseau de transport et celui de distribution ;
- Du côté du client, en rendant le courant de ligne le plus sinusoïdal possible.

Deux groupes de solutions de dépollution pour compenser toutes les perturbations peuvent être distingués : les solutions traditionnelles et les solutions modernes<sup>[5]</sup>.

#### I.3.1. Solutions traditionnelles de dépollution

Il s'agit notamment de mettre en œuvre les moyens suivants :

- Inductance anti-harmonique de protection des condensateurs ;
- Inductance de lissage des courants ;
- L'utilisation de transformateurs de couplage approprié permettant de limiter la circulation des courants harmoniques ;
- Les filtres passifs, qui sont utilisés pour empêcher les courants harmoniques de se propager dans les réseaux électriques. Leur utilisation répond aussi au besoin de compenser la puissance réactive. La large utilisation dans l'industrie de ces dispositifs ne doit pas occulter leurs nombreux d'inconvénients : □
  - Manque de souplesse à s'adapter aux variations subies par le réseau ;
  - Problèmes de résonance avec l'impédance du réseau.

### I.3.2. Solutions modernes de dépollution

L'exploitation d'une bonne qualité d'énergie électrique à faible coût est l'objet d'une demande croissante de la part des industriels. Le but principal des chercheurs dans le domaine de l'électronique de puissance est de satisfaire les industriels par l'utilisation des solutions combinant efficacité et économie. Les progrès remarquables réalisés d'une part dans le domaine des composants semi-conducteurs, comme les *IGBT*, *GTO*, ainsi que la maîtrise de leur mise en œuvre 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 en citer<sup>[8]</sup> :

- Filtres actifs ;
- Combinaison hybride active et passive ;
- Systèmes flexibles de transmission en courant alternatif (FACTS).

#### I.3.2.1. Filtres actifs

Les solutions traditionnelles de dépollution ne répondent plus à l'évolution des réseaux électriques et des charges à protéger. Pour fournir aux consommateurs une bonne qualité de l'énergie électrique, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, des filtres actifs de puissance (Active Power Filters) sont proposés comme solutions avancées de dépollution des réseaux électriques. En effet, ces solutions peuvent s'adapter aux évolutions de la charge et du réseau électrique et ceci sans toucher aux installations du fournisseur d'énergie et du consommateur. En fonction du mode de connexion au réseau, on distingue diverses catégories de filtres<sup>[9][10]</sup>.

##### I.3.2.1.1. Filtre actif parallèle (FAP)

Ce type de filtre, connecté en parallèle sur le réseau comme le montre la figure **I.8**, est le plus souvent commandé comme un générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant du côté réseau est alors sinusoïdal. Ainsi, l'objectif du *FAP* consiste-t-il à empêcher les courants perturbateurs (harmoniques, réactifs et déséquilibrés) produits par des charges polluantes de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif<sup>[9]</sup>.

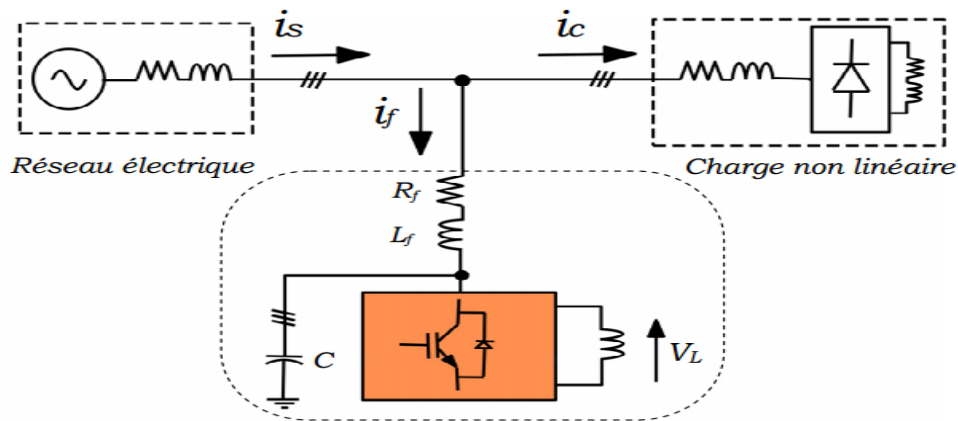


Figure I.8. Filtre actif *shunt*.

I.3.2.1.2. Filtre actif série (FAS)

Dans cette configuration, comme le montre la figure I.9, le filtre est placé en série sur le réseau. Il se comporte comme une source de tension qui s’oppose aux tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmonique) venant de la source et également à celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l’impédance du réseau<sup>[9]</sup>. Ainsi la tension aux bornes de la charge à protéger demeure-t-elle purement sinusoïdale.

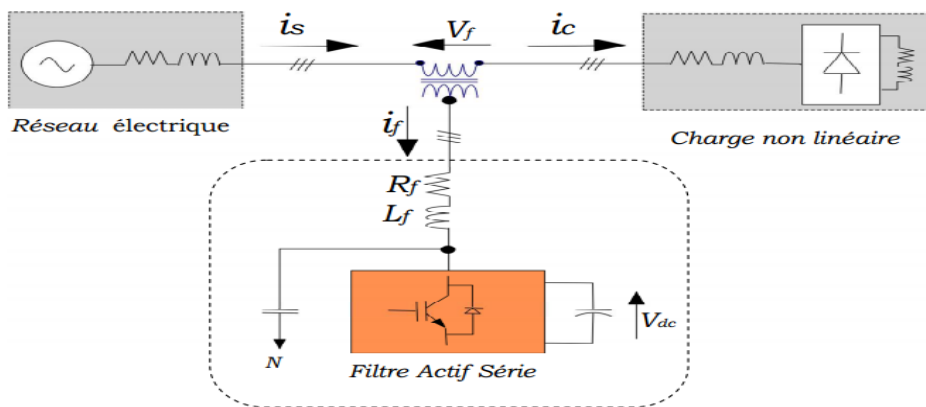


Figure. I.9. Filtre actif série.

I.3.2.1.3. Combinaison parallèle-série active (UPQC)

La figure I.10 schématise la configuration de la combinaison parallèle-série active qui s’appelle aussi (Unified Power Quality Conditionner UPQC). Elle résulte de l’association des deux filtres actifs de puissance parallèle et série. Cette structure bénéficie de deux types d’avantages : les filtres actifs série et parallèle et permet d’assurer simultanément un courant sinusoïdal et une tension du réseau électrique également sinusoïdale<sup>[10]</sup>.

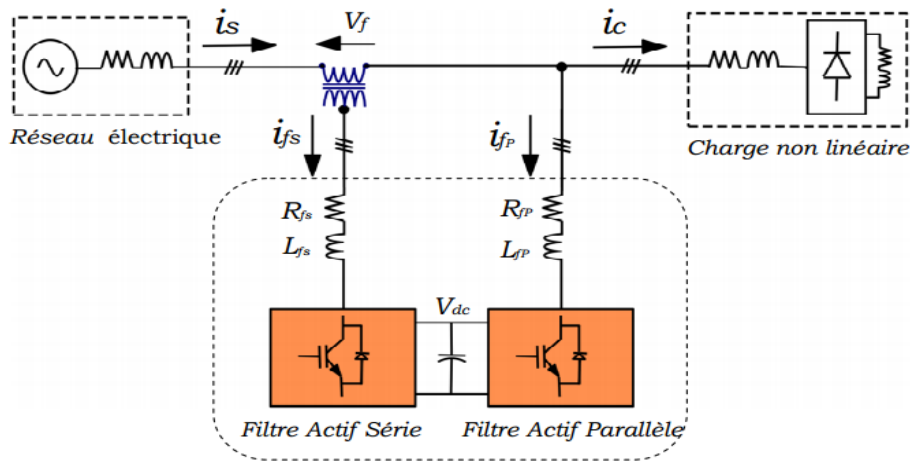


Figure I.10. Combinaison des filtres actifs série-*shunt*.

Le tableau suivant rapporte les différents types de filtres :

Tableau.I.2. Récapitulatif des différentes topologies de filtres actifs.

Topologie	Avantages	Inconvénients
<b>Filtre actif série</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Amélioration de la forme de la tension</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pas d'amélioration de la forme de courant</li> </ul>
<b>Filtre actif parallèle</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Amélioration de la forme de courant et de tension</li> <li>• Amélioration de facteur de puissance</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Amélioration de la forme de tension pas toujours évidente</li> </ul>
<b>Filtre parallèle-série</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Amélioration de la forme du courant et de tension</li> <li>• Adaptabilité à la variation de charge et du réseau</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Réalisation difficile</li> </ul>

Source : Schneider Electric.

### I.3.2.2. Combinaison hybride active et passive

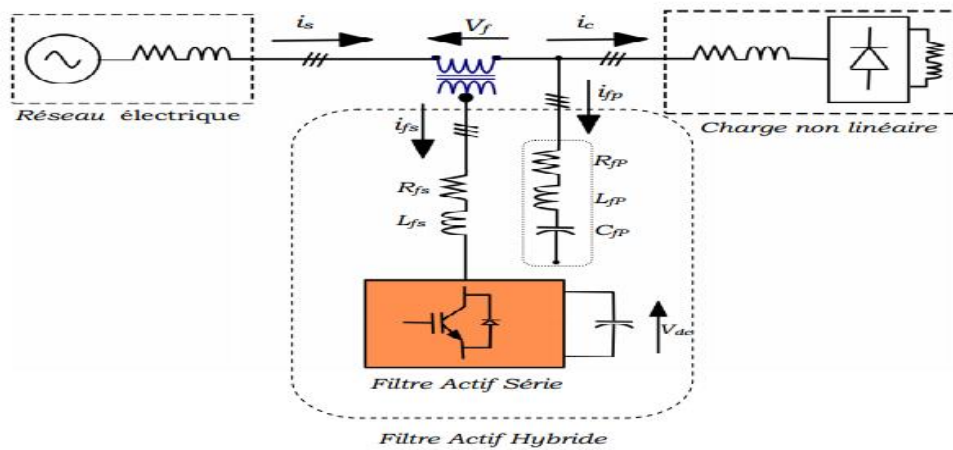
Le filtre actif hybride est une topologie de filtre qui combine les avantages des filtres passifs et des filtres actifs. Pour cette raison, il est considéré comme l'une des meilleures

solutions pour filtrer les harmoniques de courant des réseaux de distribution. Une des principales raisons de l'utilisation du filtre actif hybride est liée au développement des semi-conducteurs de puissance tels que les transistors de puissance de types *MOSFET* ou *IGBT*. De plus, du point de vue économique, le filtre hybride présente un atout majeur, celui de réduire le coût du filtre actif, actuellement obstacle majeur à l'utilisation de ce type des filtres. On peut distinguer trois sortes de configurations du filtre actif hybride :

- Combinaison du filtre actif série et du filtre passif parallèle ;
- Combinaison du filtre actif parallèle et du filtre passif parallèle ;
- Filtre actif et passif en parallèle avec la charge.

**I.3.2.2.1. Filtres actif série et filtre passif parallèle**

Le rôle du filtre actif série, en ce cas, est d'empêcher les courants harmoniques de circuler vers le réseau et de les obliger à passer par le filtre passif raccordé à leurs fréquences (Figure I.11)<sup>[8]</sup>.



**Figure I.11.** Filtre actif série avec filtre passif parallèle.

**I.3.2.2.2. Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle**

Le rôle du filtre actif parallèle dans cette configuration est la compensation des courants harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante. Le filtre passif, raccordé sur une fréquence élevée, élimine les harmoniques hautes fréquences y compris ceux créés par le filtre actif parallèle. Ce type de filtrage a déjà été appliqué à la compensation des courants harmoniques émis par un cyclo-convertisseur de forte puissance (Figure I.12).



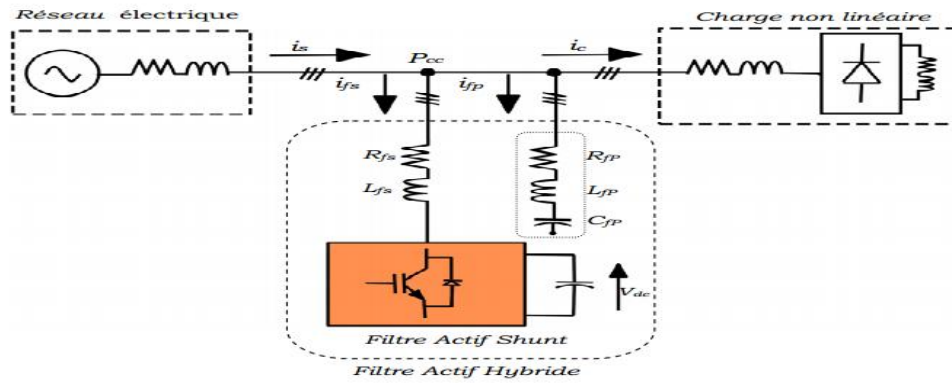


Figure I.12. Filtre hybride composé du filtre actif shunt et du filtre passif parallèle.

**I.3.2.2.3. Filtres actif et passif en parallèle avec la charge**

Le principe de fonctionnement de cette configuration est le même que celui présenté précédemment. Il se distingue par l’avantage de réduire le dimensionnement du filtre actif série car le courant qui le traverse est très faible. De plus, le F.A.S est à l’abri d’un éventuel court-circuit de la charge (Figure I.13)<sup>[10]</sup>.

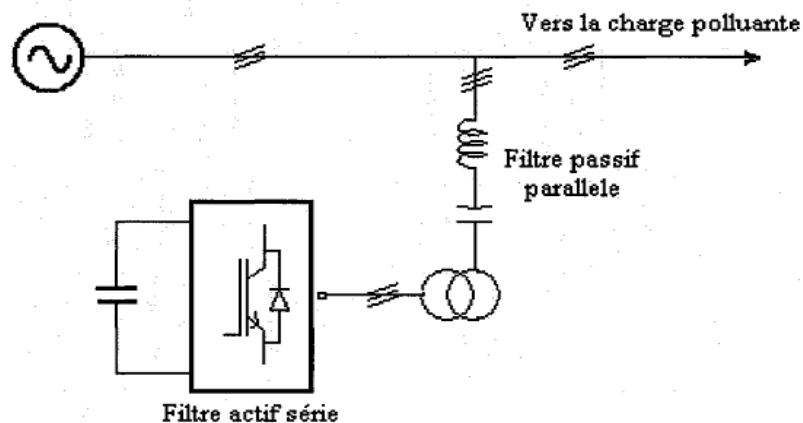


Figure I.13. Filtre actif et passif en parallèle avec la charge.

**Conclusion**

Ce chapitre a porté sur la description des principales perturbations pouvant prendre naissance dans les réseaux électriques, il passe aussi en revue leurs origines et conséquences sur les équipements essentiels existants dans le réseau et les installations industrielles.

Nous avons vu que la dégradation de la qualité de l’énergie électrique peut conduire à une diminution des performances ou même à la destruction d’équipements et de procédés avec des répercussions possibles qui pourraient frapper la sécurité des personnes ou les coûts économiques. Si l’analyse des causes principales de la dégradation de la qualité de l’énergie insiste sur la responsabilité de l’utilisateur sur cette dégradation, notamment quand les utilisateurs sont les gros consommateurs industriels, il revient néanmoins une certaine part de responsabilité au distributeur, liée essentiellement à sa maîtrise de gestion de son réseau.

Les perturbations ne doivent pas être prises pour une fatalité, les solutions existent et doivent être prises par chacun des deux partenaires afin de minimiser les effets des perturbations et de garantir une électricité de qualité. Dans ce sens, nous avons aussi présenté les différentes solutions pour y remédier.

Nous avons présenté les différentes structures des filtrages, passif, actif et universel ; nous avons également noté leurs avantages et inconvénients pour la dépollution harmonique. Nous avons de même cités les dispositifs FACTS comme une solution d'amélioration de la qualité de l'énergie électrique et qui feront l'objet d'une étude de leur technologie et de leur commande.



Chapitre II  
Notions sur les  
dispositifs FACTS

## INTRODUCTION

L'industrie de production de l'électricité subit une évolution rapide, entraînée par la dérégulation et la privatisation. Le niveau de sécurité d'un réseau est jugé satisfaisant si d'une part, il est apte à assurer l'équilibre production/consommation en respectant certaines limites admissibles liées aux transits de puissance dans les lignes, aux tensions en chaque nœud et aux points de fonctionnement des groupes de production et si, d'autre part, il est apte à « *survivre* » à une perturbation plus ou moins violente<sup>[23]</sup>.

La technologie FACTS ne se limite pas à un seul dispositif, elle en regroupe une collection à base d'électronique de puissance implantés dans les réseaux électriques afin de mieux contrôler le flux de puissance et augmenter la capacité de transit de leurs lignes. Par action de contrôle rapide de ces systèmes sur l'ensemble des paramètres du réseau: tension, impédance, déphasage, etc. les dispositifs FACTS permettent d'améliorer les marges de stabilité et de *flexibilité* du transfert d'énergie tout autant qu'à assurer un plan de tension satisfaisant<sup>[24]</sup>.

## II.1. Concept FACTS : un projet EPRI

Pour illustrer le concept FACTS, il nous suffit d'un exemple simple:

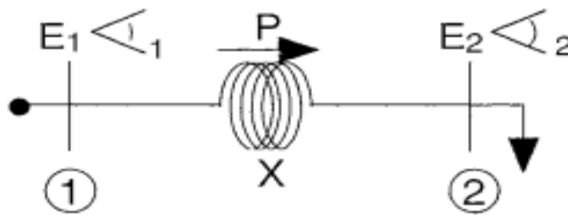


Figure II.1. Ligne de transport à courant alternatif.

Considérons le transit de puissance sur une ligne à courant alternatif. Cette ligne est représentée sur la figure II.1, les pertes étant supposées nulles. La puissance transmise  $P$  est fonction des amplitudes des tensions  $E_1$  et  $E_2$  aux extrémités de la ligne, du déphasage  $\delta_{12}$  entre ces deux tensions et de la réactance  $X$  de la ligne, comme le montre l'équation II.1, ainsi la puissance transmise par cette ligne est donnée par la relation suivante :

$$P = \frac{E_1 E_2}{X} \sin \delta_{12} \quad (\text{II.1})$$

Cette équation montre que la puissance transmissible par une ligne est limitée par les paramètres énoncés ci-dessus et pas forcément par sa limite thermique. De plus, il découle de cette équation que si l'on peut régler un, deux, voire les trois paramètres, on contrôle alors le transit de puissance dans la ligne.

De plus, grâce à leur court temps de réponse à des changements dans les réseaux, les dispositifs FACTS sont apparus comme éléments pouvant contribuer à l'amortissement des oscillations à très basse fréquence en remplacement ou complément des traditionnels stabilisateurs de puissance<sup>[25]</sup>.

## II.2. Classification des systèmes FACTS

Les systèmes FACTS peuvent être classés en trois catégories :

- compensateurs parallèles ;
- compensateurs séries ;
- compensateurs hybrides (série/parallèle).

Nous décrivons sommairement certains d'entre eux et nous nous intéresserons plus particulièrement à la description, au principe de fonctionnement et à la modélisation du DVR qui fait justement l'objet de notre travail dans ce mémoire.

### II.2.1. Compensateurs séries

Ces compensateurs sont connectés en série avec le réseau et peuvent être utilisés comme une impédance variable (inductive, capacitive) ou une source de tension variable. En général, ces compensateurs modifient l'impédance des lignes de transport en insérant des éléments en série avec celles-ci<sup>[26]</sup>.

#### II.2.1.1. TCSC (Compensateur série contrôlé par thyristors)

IEEE définit le TCSC comme étant un compensateur à réactance capacitive ou à inductance qui consiste en une série de condensateurs en parallèle avec des inductances commandées par thyristors afin de pouvoir assurer une variation homogène de la réactance capacitive. Le TCSC permet une compensation variable entre 20% inductive et 80% capacitive, comme illustré sur la figure II.2<sup>[27]</sup>.

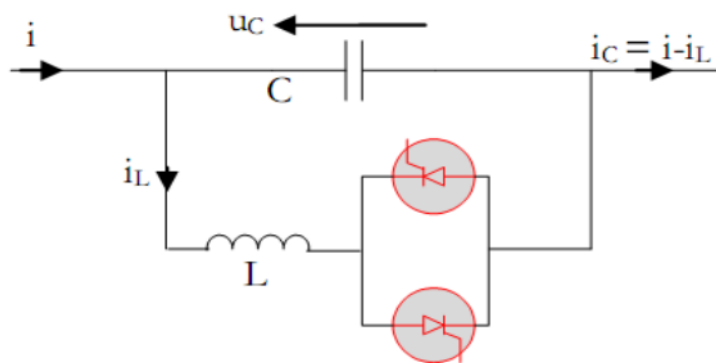


Figure II.2. Schéma de principe d'un TCSC.

#### II.2.1.2. SSSC (Compensateur série synchrone statique)

Ce type de compensateur série (Compensateur série synchrone statique) est le plus important dispositif de cette famille. Il est constitué d'un onduleur triphasé couplé en série avec la ligne électrique à l'aide d'un transformateur. Son rôle est d'introduire une tension triphasée, à la fréquence du réseau, en série avec la ligne de transport. Cette tension est en quadrature avec le courant de ligne. Nous pouvons, dans ce cas, régler continuellement la

valeur apparente de la capacité ou de l'inductance ainsi introduite en série à la ligne tel que restitué dans la figure II.3<sup>[28]</sup>.

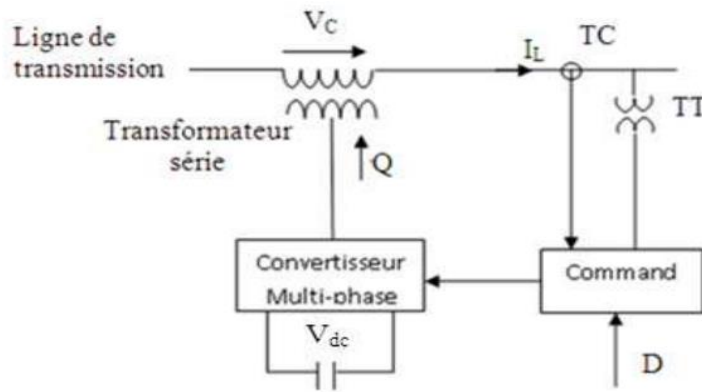


Figure II.3. Schéma de principe d'un SSSC.

On peut expliquer les différents modes de compensation en se référant aux diagrammes vectoriels de la figure II.4.

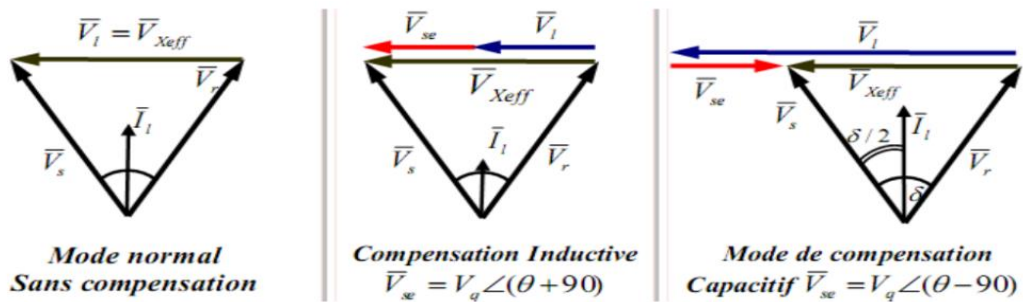


Figure II.4. Représentation de Fresnel des modes de compensation du SSSC.

- Le diagramme qui présente l'état de fonctionnement normal du réseau (état d'équilibre), la tension aux bornes de la réactance effective  $V_{xeff}$  est égale à la tension aux bornes de la ligne de transport sans compensation là où le degré de compensation  $K$  est nul.  $K = 0\%$  compensation =  $\frac{X_c}{X_l} * 100$  avec  $X_c = \frac{V_c}{I_l}$
- Dans le mode de compensation inductif, le courant de la ligne  $I_l$  diminue en augmentant le degré de compensation de 0% à 100%.
- Dans le mode de compensation capacitive, le courant de la ligne augmente avec l'augmentation de degré de compensation de 0% à 100%.

### II.2.1.3. DVR (restaurateur dynamique de tension)

Le DVR est un dispositif de la qualité d'énergie qui possède un circuit de commande pour contrôler la tension au point d'accouplement commun PCC. Le DVR est un système de stockage d'énergie ayant des capacités maximales pour injecter des tensions compensatrices à travers un transformateur d'injection qui relie ce dispositif en série avec le réseau (voir figure II.5).

Le DVR peut avoir une excellente exécution dynamique et capable d'une protection critique d'une charge sensible contre les différentes perturbations de tension<sup>[32]</sup>.

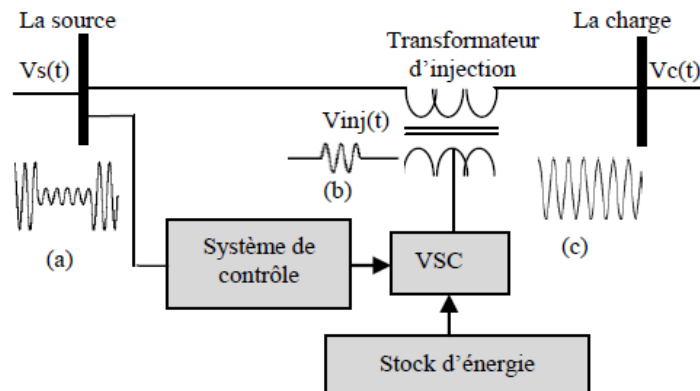


Figure II.5. Schéma de la structure d'un DVR.

## II.2.2. Compensateurs parallèles

Plusieurs équipements utilisant l'électronique de puissance ont fait leur apparition vers la fin des années 1960. Ces équipements avaient l'avantage d'éliminer les rouages mécaniques et de répondre en un temps plus court. Ces dispositifs sont constitués essentiellement d'une inductance en série avec un gradateur. Le retard à l'amorçage des thyristors permettait de régler l'énergie réactive absorbée par le dispositif. En effet, tous les compensateurs parallèles injectent du courant au réseau via le point de raccordement. Quand une impédance variable est connectée en parallèle sur un réseau, elle consomme (ou réinjecte) un courant variable. Cette injection de courant modifie les puissances actives et réactives qui transitent par la ligne<sup>[29]</sup>.

### II.2.2.1. SVC (Compensateur statique de l'énergie réactive)

IEEE définit le SVC (Compensateur statique de l'énergie réactive) comme un générateur (ou absorbeur) *shunt* statique d'énergie réactive, dont la sortie est ajustée en courant capacitif ou inductif afin de contrôler des paramètres spécifiques du réseau électrique, spécialement la tension aux nœuds<sup>[30]</sup>.

Le compensateur statique de puissance réactive SVC est le premier dispositif FACTS apparu, dans les années 1970, pour répondre à des besoins de stabilisation de tension rendue fortement variable du fait de charges industrielles très fluctuantes telles les laminoirs et les fours à arc. Les SVC, FACTS de première génération, ils utilisent des thyristors classiques, commandables uniquement à l'amorçage<sup>[30]</sup>.

La structure de base de ce contrôleur est l'association des dispositifs TCR et TSC en parallèle, connectés au réseau à travers un transformateur de couplage (figure II.6).

- TCR (Thyristor Controlled Reactor): c'est une réactance en série avec un gradateur, sa valeur est continuellement variable selon l'angle d'amorçage des thyristors.



- TSC (Thyristor Switched Capacitor): des capacités commandées par thyristors fonctionnant en pleine onde.

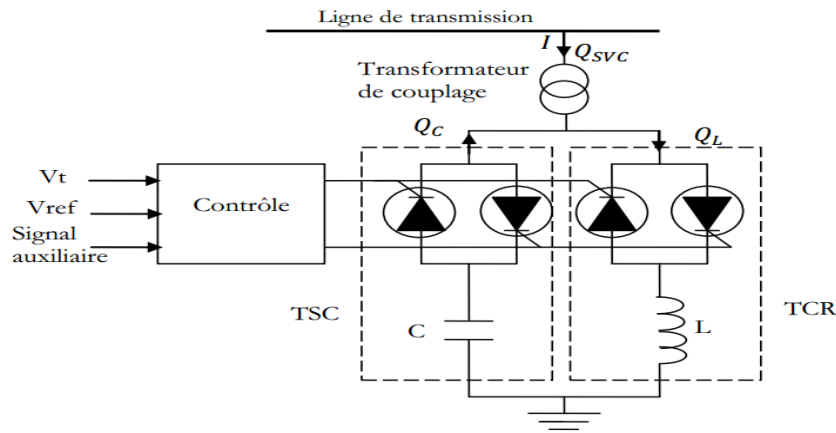


Figure II.6. Structure du SVC.

### II.2.2.2. STATCOM (Compensateur statique synchrone)

IEEE définit le STATCOM (Compensateur statique synchrone) comme un générateur synchrone. Sa fonction est celle d'un compensateur parallèle de l'énergie réactive dont le courant capacitif ou inductif généré peut être contrôlé séparément de la tension du réseau.

Le compensateur statique synchrone STATCOM, autrefois appelé compensateur statique de puissance réactive avancée fait partie de la deuxième génération des FACTS. Il correspond à l'équivalent statique exact de la machine synchrone classique fonctionnant en compensateur, mais sans inertie. Il est principalement utilisé pour la compensation dynamique des réseaux afin de faciliter la tenue de tension, d'accroître la stabilité en régime transitoire et d'amortir les oscillations de puissance (figure II.7<sup>[30][31]</sup>).

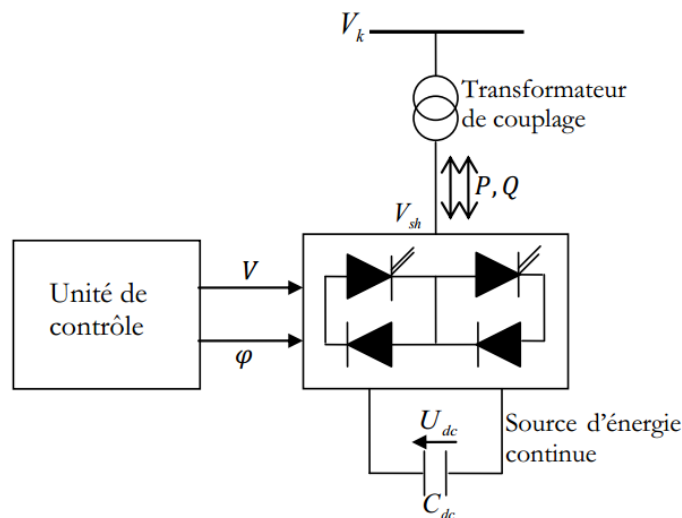


Figure II.7. Structure du STATCOM.

II.2.3. Compensateur série parallèle (hybride)

Les compensateurs FACTS précédemment cités (série ou parallèle), permettent d’agir uniquement sur un des trois paramètres déterminant la puissance transmise dans une ligne (tension, impédance et angle). Par combinaison des deux types de dispositif, il est possible d’obtenir des dispositifs hybrides capables de contrôler simultanément les différentes variables précitées<sup>[29] [31]</sup>.

II.2.3.1. UPFC (Variateur de charge universel)

Le contrôleur de transit de puissance unifié UPFC (Variateur de charge universel) est formé de deux convertisseurs de tension reliés par une liaison à courant continu formée par un condensateur. Il s’agit en fait de la combinaison d’un STATCOM et d’un SSSC. L’IEEE définit l’UPFC comme combinaison entre un STATCOM et un SSSC couplés par une liaison à courant continu, permettant un écoulement bidirectionnel de la puissance active entre la sortie du SSSC et celle du STATCOM. L’UPFC permet le contrôle de la tension, de l’impédance, et de l’angle ou d’écoulement de la puissance active et réactive de la ligne (figure II.8<sup>[3]</sup>).

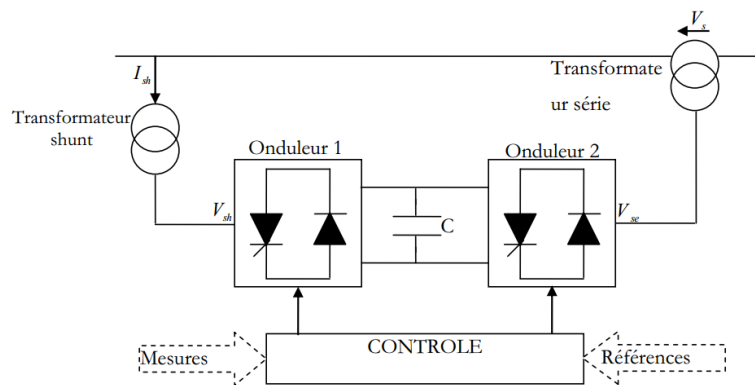


Figure II.8. Structure de l’UPFC.

II.2.3.2. IPFC (Contrôleur de flux de puissance d’interligne)

L’IPFC est proposé en 1998 par Gyugyi, Sen et Schuder, qui espéraient ainsi compenser un certain nombre de lignes de transmission d’une sous-station. Sous sa forme générale, l’IPFC utilise des convertisseurs DC-DC placés en série avec la ligne à compenser. En d’autres termes, l’IPFC comporte un certain nombre de SSSC (figure II.9).

Le contrôleur de transit de puissance entre ligne IPFC est utilisé dans le cas d’un système de lignes multiples reliées à un même poste.

L’IPFC est formé de plusieurs SSSC, chacun d’eux fournissant une compensation série à une ligne différente. Du côté continu, tous les convertisseurs sont reliés entre eux via des disjoncteurs<sup>[30]</sup>.

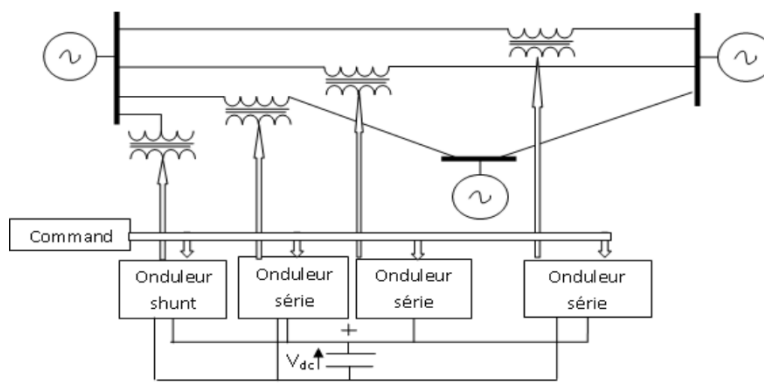


Figure II.9. Schéma de principe IPFC.

### II.3. Synthèse

Les différents dispositifs FACTS présentés dans ce chapitre possèdent tous leurs propres caractéristiques tant en régime permanent qu'en régime transitoire. Chaque type de dispositif sera donc utilisé pour répondre à des objectifs bien définis. Des considérations économiques entreront également dans le choix du type d'installation à utiliser. Le tableau suivant synthétise les principaux avantages techniques des différentes technologies de FACTS. Le nombre « \* » est proportionnel à l'efficacité du dispositif<sup>[31]</sup>.

Tableau III.1. Application des FACTS à la résolution des problèmes dans le réseau

	Contrôle de charge	Contrôle de tension	Stabilité transitoire	Amplitudes des oscillations
SVC	*	***	*	**
STATCOM	*	***	*	**
TCSC	***	*	***	**
SSSC	***	*	***	**
UPFC	***	***	***	***
IPFC	***	***	***	***

## **II.4. Amélioration de la qualité d'énergie par DVR**

### **Introduction**

Les systèmes d'alimentation actuels sont des réseaux complexes comprenant de grandes parties telles que la production, le transport et la distribution d'énergie électrique. Le souci majeur des consommateurs se résume à la qualité d'énergie et à sa proximité.

Les problèmes de qualité d'énergie sont issus d'un nombre étendu de perturbations dans les systèmes d'alimentation avec une large gamme de tranches de temps telles que les variations de longues et courtes durées et d'autres perturbations. Leurs conséquences peuvent s'étendre à des défauts techniques des appareils électriques sensibles. Ainsi, en termes économiques, ils présentent des pertes financières dues à l'arrêt de production au niveau de l'industrie.

Dans notre travail, nous nous sommes particulièrement intéressés aux perturbations en tension provoquées principalement par des pannes électriques ou par l'amorçage des grandes charges qui exigent au démarrage un appel du courant très important. Pour compenser ces perturbations, on utilise un DVR basé sur le principe d'un convertisseur de source de tension<sup>[32]</sup>.

### **II.4.1. Structure d'un DVR**

Lorsque le dispositif de compensation inséré en série est construit à base d'éléments passifs commutés, son action principale réside dans la modification de l'impédance des lignes. Ainsi, sur des lignes fortement inductives, une compensation de la chute de tension peut être réalisée par un fonctionnement capacitif. Avec un dispositif basé sur un onduleur, en plus de la fonction évoquée précédemment, la tension injectée en série sur la ligne pourra immuniser la charge des perturbations de type harmonique de tension, creux de tension... Ce fonctionnement est alors appelé DVR. À mesure que la compensation devient importante, le stockage d'énergie dans la partie continue du convertisseur doit être élevé. Entre autres cas, quand on souhaite pouvoir injecter de la puissance active, on devrait envisager l'utilisation d'un système d'alimentation auxiliaire au niveau de la tension du bus continu<sup>[35][36]</sup>.

### **II.4.2. Technologie et fonctionnement du DVR**

Les principaux éléments constituant un DVR sont représentés (figure **II.10**). Ils consistent en un onduleur de tension triphasé contrôlé par une commande MLI et alimenté par une source de tension continue. Ce système est couplé au réseau à travers un filtre de tension de deuxième ordre et un transformateur de couplage dont le secondaire est inséré en série au réseau alimentant la charge électrique à protéger<sup>[35][33]</sup>.

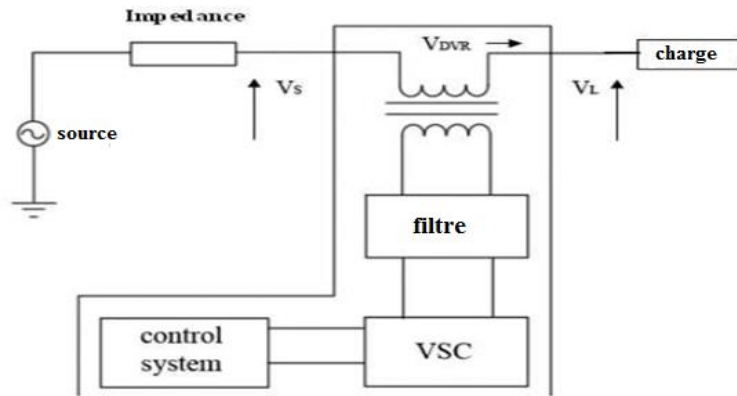


Figure II.10. Schéma équivalent de DVR.

En cours de fonctionnement, le DVR permet d'injecter, en série au réseau, une tension fidèlement opposée à la perturbation enregistrée dans ce dernier. La détection, l'identification et la génération de cette tension est obtenue grâce à un dispositif de détection associé à une commande pilotant l'onduleur qui reproduit la perturbation à compenser [35] [33].

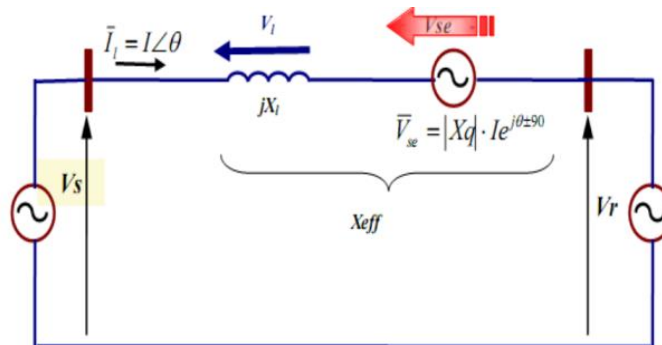


Figure II.11. Schéma équivalent d'une ligne électrique en présence d'un DVR.

Dans la compensation série, en considérant le schéma équivalent de la (Fig. II.10), le courant dans la ligne est donné par l'équation suivante :

$$\bar{I}_l = \bar{I}_{se} = \frac{\bar{V}_s - \bar{V}_r - \bar{V}_{se}}{jX_l} \quad (II.2)$$

Dans l'hypothèse d'une ligne sans perte, la puissance injectée dans cette dernière par le DVR est :

$$S_{DVR} = (\bar{V}_s - \bar{V}_r) * \bar{I}_{se}^* = \frac{|\bar{V}_s - \bar{V}_r|^2 - (\bar{V}_s - \bar{V}_r) * \bar{V}_{se}}{jX_l} = P_{DVR} + jQ_{DVR} \quad (II.3)$$

D'où l'on peut tirer les formules des puissances active et réactive injectées par le DVR:

$$P_{DVR} = \frac{V_{se}(V_r \sin(\theta_r - \alpha) - V_s \sin(\theta_s - \alpha))}{X_l} \quad (II.4)$$

$$Q_{DVR} = \frac{-V_s(V_s - V_{se} \cos(\theta_s - \alpha)) + (V_r - V_{se} \cos(\theta_r - \alpha)) - 2V_s V_r \cos(\theta_s - \theta_r)}{X_l} \quad (II.5)$$

$V_s, V_r$  et  $V_{se}$  : modules des tensions  $\overline{V_s}, \overline{V_r}$  et  $\overline{V_{se}}$  respectivement.

$\theta_s, \theta_r$  et  $\alpha$  : phases des tensions  $\overline{V_s}, \overline{V_r}$  et  $\overline{V_{se}}$  respectivement.

Pour que ce dispositif n'échange aucune puissance active avec le réseau, il doit satisfaire la condition :

$$P_{DVR} = 0 \quad \Leftrightarrow \quad V_{se}(V_r \sin(\theta_r - \alpha) - V_s \sin(\theta_s - \alpha)) = 0 \quad (II.6)$$

### II.4.3. Diagramme vectorielle de DVR

Un certain nombre de facteurs peut limiter la compensation des anomalies de tension, y compris l'estimation de puissance active de DVR, les conditions de charge et les types de défaut. La stratégie de commande devrait être capable de compenser n'importe quelle perturbation de tension. La figure II.11 montre un diagramme vectoriel pour compenser les défauts en tension. Au début, le vecteur de tension de charge  $V_r$  est le même que le vecteur  $V_s$ , et est supposé pour être 1.0 p.u. si la tension perturbée, le vecteur réel de la tension de source  $V_s$  est déplacé à  $V_s$  défaut. Pour reconstituer le vecteur de tension de charge  $V_r$ , un vecteur de tension injecté  $V_{se}$  est fourni par le DVR<sup>[32][34]</sup>.

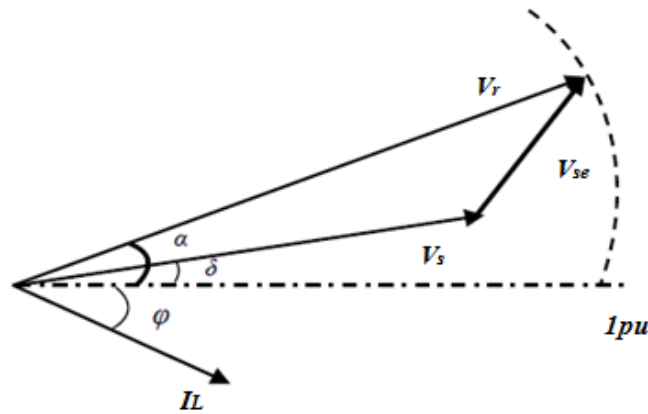


Figure II.12. Diagramme vectoriel de la compensation par DVR.

**III.4.4. Effet du DVR sur une ligne électrique**

Le diagramme vectoriel des tensions de la ligne de transport, lorsque  $|\overline{V_s}| = |\overline{V_r}| = V$  et  $V_{se}$  en quadrature avec le courant de la ligne est donné par la figure **II.12**, sur laquelle on constate que l'angle de phase du courant de la ligne est  $\delta/2$  ; l'expression du courant sera :

$$I_l = \frac{[V \sin(\delta) + V_{se} \cos(\frac{\delta}{2})] + j[V + V \cos(\delta) + V_{se} \sin(\delta/2)]}{X_l} \tag{II.7}$$

D'où l'on peut exprimer la puissance transportée par cette ligne par les équations suivantes :

$$P_s = \frac{V^2}{X_l} \sin(\delta) + \frac{V * V_{se} \cos(\delta/2)}{X_l} \tag{II.8}$$

$$Q_s = \frac{V^2}{X_l} (1 - \cos(\delta)) - \frac{V * V_{se} \sin(\delta/2)}{X_l} \tag{II.9}$$

En comparant ces équations avec celles d'une ligne sans compensation on trouve que les puissances active et réactive transmises sont augmentées par les termes  $\frac{V * V_{se} \cos(\delta/2)}{X_l}$  et  $\frac{V * V_{se} \sin(\delta/2)}{X_l}$  ; ces puissances additionnelles sont en fonction de la tension injectée du DVR [29].

**Conclusion**

Au cours de ce chapitre, ont été présentés quelques types des systèmes FACTS. Concernant la modélisation et l'intégration de ces dispositifs de compensation dynamique dans les réseaux électriques, il est convaincant que l'intégration de cette nouvelle technologie (FACTS) dans la structure des réseaux électriques permet le réglage des tensions, le contrôle du transit de la puissance active et réactive, ce qui met à portée de main une meilleure gestion de l'énergie et une amélioration des indices de qualité de l'énergie électrique.

Les équipements à base d'électronique de puissance, y compris leurs commandes appropriées, offrent des solutions efficaces à ce problème. Grâce aux avancées récentes dans la technologie des IGBT/GTO, le temps de réaction des dispositifs FACTS est réduit à quelques millisecondes.

En choisissant d'étudier le DVR, nous projetons l'exploration des pistes d'amélioration de la qualité d'énergie en maintenant continuellement la tension stable aux bornes des charges sensibles ou de sources additionnelles au réseau.

Au prochain chapitre, il sera question d'une étude concernant la commande par la méthode heuristique, dite de « *logique floue* ».

# Chapitre III

## Notions sur la logique floue



### III.1. Historique

La formule d'« *ensemble flou* » apparut pour la première fois en 1965 lorsque le professeur Lotfi A. ZADEH, de l'université américaine de Berkeley, à l'occasion de la publication un article intitulé « *Ensembles flous* » (Fuzzy sets). Réalisant depuis de nombreuses avancées théoriques majeures dans le domaine, il réussit rapidement à entraîner dans son sillage nombre d'autres chercheurs en développant des travaux théoriques.

En 1975, apparaît, à Londres, l'application pionnière de la logique floue sur la conduite d'un moteur à vapeur par M. MAMDANI de Londres. En 1978, la société danoise F-L-SMIDTH, fait apparaître la première application industrielle de la logique floue sur le contrôle d'un four à ciment.

À la fin des années 1980, au Japon, la logique floue devient applicative sur le plan théorique, inaugurant ainsi un véritable boum. Les produits électroménager grand public (machines à laver, appareils photographiques, caméscopes) estampillés « *Fuzzy Logic* » ne se comptent plus. L'innovation gagne aussitôt l'industrie. Traitement des eaux, grues portuaires, métros, systèmes de ventilation et de climatisation sont révolutionnés. L'essor de la conquête se poursuit et fait irruption dans des domaines singulièrement différents, tel le diagnostic médical ou encore la finance.

À partir de 1990, c'est en Allemagne que des applications massives apparaissent tandis qu'aux USA elles restent à moindre échelle. En France, enfin, la logique floue devient aujourd'hui une réalité <sup>[1][ancienne note 16]</sup>.

### III.2. Introduction

Le réglage classique des systèmes repose essentiellement sur le dimensionnement des éléments de réglage à partir de la modélisation du système global, mais il se trouve que ceci n'est pas toujours facile à réaliser et face à des systèmes complexes on est souvent contraint à supposer des hypothèses simplificatrices. C'est là où réside le principal avantage de réglage par logique floue, en fait ce type de réglage ne se nécessite d'établir aucun modèle du système à régler. Le principe de la logique floue est basé sur la pensée humaine ou le raisonnement est fondé sur la combinaison des expériences antérieurement acquises et les informations observées dans son environnement. La logique floue est donc basée sur un raisonnement empirique utilisant plusieurs moyens de déduction telles que l'expérience, l'analogie et l'intuition <sup>[2][ancienne note 17]</sup>.

La logique floue permet de convertir les grandeurs d'entrées et de sorties qui agissent sur le système à régler, de telle sorte que ces dernières soient des valeurs nettes sous forme de signaux. Trois phases de traitement ont lieu dans un régulateur flou :

- **Fuzzification** : la valeur d'entrée nette est convertie en terme linguistique floue ;
- **Inférence** : les ensembles flous sont reliés et comparés avec les différentes règles ;
- **Défuzzification** : l'ensemble flou de sorti est converti en valeur de sortie nette.

### III.3. Avantages et intérêts de la logique floue

#### III.3.1. Intérêts

En termes d'origine, la logique floue est née d'un certain nombre de constatations :

- La connaissance que possède l'être humain dans une situation quelconque est généralement imparfaite ;
- Plutôt que de modéliser le système, il est souvent intéressant de modéliser le comportement d'un opérateur humain face au système ;
- À mesure que la complexité d'un système augmente, se réduisent les affirmations précises sur son comportement.

#### III.3.2. Avantages

- Inutilité d'une modélisation mathématique rigoureuse du processus ;
- Possibilité d'implémenter des connaissances (linguistiques) de l'opérateur de processus ;
- Maîtrise du système à régler avec un comportement complexe (fortement non linéaire et difficile à modéliser) ;
- Employabilité pour les processus rapides (grâce aux processeurs dédiés) ;
- Réduction du temps de développement et de maintenance ;
- Simplicité de définition et de conception.

### III.4. Bases de la logique floue

#### III.4.1. L'ensemble flou

La notion d'« ensemble flou » a été proposée (**Zadeh, 1965**) en introduisant un caractère graduel de l'appartenance d'un élément à un ensemble donné. Cela permet une meilleure représentation des termes et des connaissances vagues que nous, êtres humains, manipulons au quotidien. Mathématiquement, un ensemble flou  $A$  d'un univers de discours  $U$ , est caractérisé par une fonction d'appartenance, notée  $\mu_A$ , à valeur dans l'intervalle  $[0,1]$  et qui associe à chaque élément  $x$  de  $U$  un degré d'appartenance  $\mu_A(x)$  indiquant le niveau d'appartenance de  $x$  à  $A$  <sup>[3 ancienne note 18]</sup>.

$$\forall x \in U = \begin{cases} \mu_A(x) = 0 & \text{si } x \notin A \\ \mu_A(x) = 1 & \text{si } x \in A \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

Exemple: la variable linguistique 'vitesse' avec trois termes linguistiques : petite, moyenne, grande, (figure **III.1**).

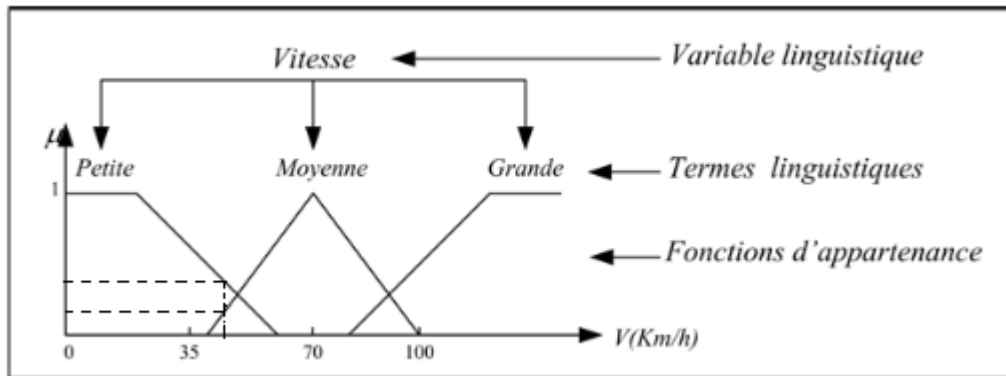


Figure III.1. Variable linguistique.

a) En logique booléenne, le degré d'appartenance  $\mu$  ne peut prendre que deux valeurs (0 ou 1). Dans ce cas la vitesse peut être :

- Petite :  $\mu_{petite} = 1, \mu_{moyenne} = 0, \mu_{grande} = 0$
- Moyenne :  $\mu_{petite} = 0, \mu_{moyenne} = 1, \mu_{grande} = 0$
- Grande :  $\mu_{petite} = 0, \mu_{moyenne} = 0, \mu_{grande} = 1$

La vitesse ne peut pas prendre deux qualificatifs à la fois.

b) En logique floue, le degré d'appartenance devient une fonction susceptible de prendre une valeur réelle intermédiaire comprise entre 0 et 1 inclus. Dans ce cas, pour le petit qualificatif, la vitesse peut à la fois être considérée comme réduite (petite) avec un degré d'appartenance de 0.3 et comme moyenne avec un degré d'appartenance de 0.1. Pour  $V=40 \text{ km/h}$  :  $\mu_{petite}(V) = 0.3, \mu_{moyenne}(V) = 0.1, \mu_{grande}(V) = 0$ .

### III.4.2. Variable linguistique

L'ensemble des références d'un langage naturel s'appelle « univers du discours ». S'agissant d'un mot, son univers de discours est l'ensemble des termes évocateurs du même concept mais à différents degrés. Ainsi peut-il être fini ou infini. Une variable linguistique représente un état dans le système à régler ou une variable de réglage dans un contrôleur flou. Sa valeur est définie dans les termes linguistiques qui peuvent être des mots ou des phrases d'un langage naturel ou artificiel<sup>[17]</sup>. Chaque variable linguistique est caractérisée par un ensemble tel que :

(x, T(x), U, G, M)

Où :

- x est le nom de la variable, T(x) est l'ensemble des valeurs linguistiques que peut prendre x ;
- U est l'univers du discours associé avec les valeurs linguistiques de x ;
- G est la règle syntaxique pour générer les valeurs linguistiques de x ;

☞ M est la règle sémantique pour associer un sens à chaque valeur linguistique.

Par exemple,  $x = \text{erreur}$  (écart entre deux tensions (mesuré, référence)) peut être définie avec un ensemble de termes :  $T(x) = \{\text{Négative Grande, Négative Moyenne, Proche de Zéro, Positive Moyenne, Positive Grande}\}$  qui forment son univers de discours  $U = [-10V, 10V]$ , le terme «Négative» représente une valeur linguistique qui peut être interprété par une erreur de  $-5$  à  $0$  V.

### III.4.3. Fonction d'appartenance

Généralement, chaque sous-ensemble flou peut-être représenté, dans ce cas, par sa fonction d'appartenance. Si l'ensemble de référence est un ensemble fini, les valeurs d'appartenance sont des valeurs discrètes définies dans  $[0, 1]$ . Si l'ensemble de référence est infini, on peut représenter ces valeurs comme des fonctions d'appartenance continues à valeur dans  $[0, 1]$ . Pour conclure, la forme de fonction d'appartenance dépend de l'application, peut-être monotone, triangulaire et trapézoïdale, ou en forme de cloche comme le montre la figure III.2.

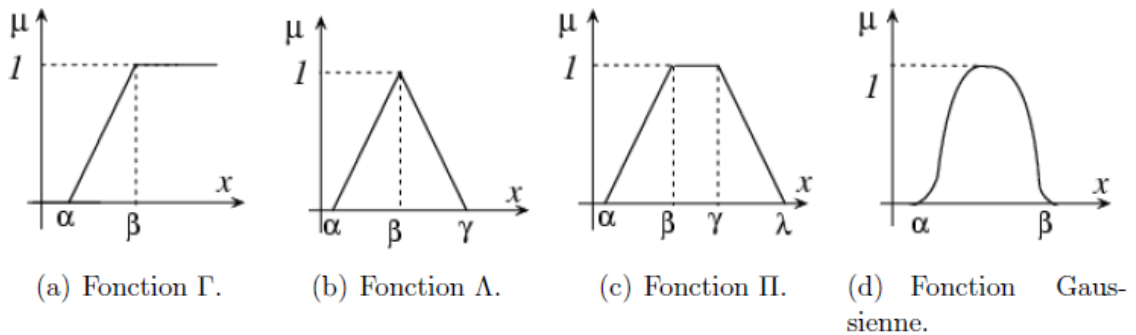


Figure III.2. Quelques différentes formes de fonctions d'appartenance.

Les définitions mathématiques de ces fonctions d'appartenance sont :

$$\Gamma : U \rightarrow [0,1] \quad \Gamma(x; \alpha, \beta) \begin{cases} 0 & x < \alpha \\ (x - \alpha) / (\beta - \alpha) & \alpha < x < \beta \\ 1 & x > \beta \end{cases} \quad (III.2)$$

$$\Lambda : U \rightarrow [0,1] \quad \Lambda(x; \alpha, \beta) \begin{cases} 0 & x < \alpha \\ (x - \alpha) / (\beta - \alpha) & \alpha < x < \beta \\ (x - \gamma) / (\beta - \alpha) & \beta < x < \gamma \\ 1 & x > \gamma \end{cases} \quad (III.3)$$

$$\Pi : U \rightarrow [0,1] \quad \Lambda(x ; \alpha, \beta) \begin{cases} 0 & x < \alpha \\ (x-\alpha) / (\beta - \alpha) & \alpha < x < \beta \\ (x-\lambda) / (\beta - \alpha) & \gamma < x < \\ 1 & x > \gamma \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

**III.4.4. Operateurs de la logique floue**

Permettant d’écrire des combinaisons logiques entre notions floues, ces opérateurs peuvent faire des calculs sur des degrés de la vérité, comme pour la théorie classique des ensembles. Sont ainsi définis réunion, intersection, complément d’ensembles flous<sup>[18]</sup>. On prend par exemple :

- ⊕ **A** : ensemble flou des valeurs de la tension qui sont petites ;
- ⊕ **B** : ensemble flou des valeurs de la tension qui sont moyennes.

**III.4.4.1. La réunion**

L’ensemble des valeurs petites OU moyennes est un ensemble flou de fonctions d’appartenance :

$$\mu(x) = \max (\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad \forall x \in U \quad (\text{III.5})$$

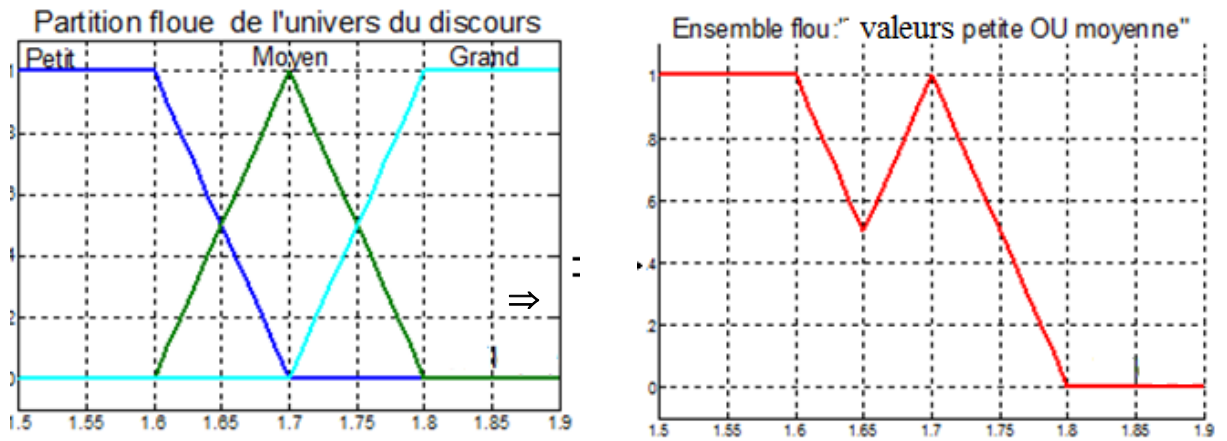


Figure III.3. Fonction d'appartenance d'un ensemble flou (petite ou moyenne).

III.4.4.2. L'intersection

L'ensemble des valeurs petites ET moyennes est un ensemble flou de fonctions d'appartenance :

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad \forall x \in U \tag{III.6}$$

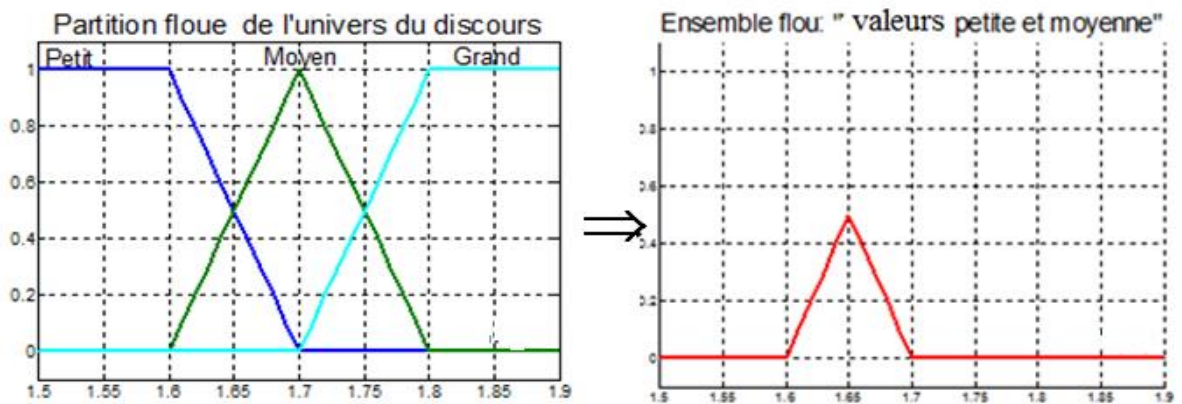


Figure III.4. Fonction d'appartenance d'un ensemble flou (petite et moyenne).

III.4.4.3. Le complément

L'ensemble des valeurs NON petites est un ensemble flou de fonction d'appartenance :

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad \forall x \in U \tag{III.7}$$

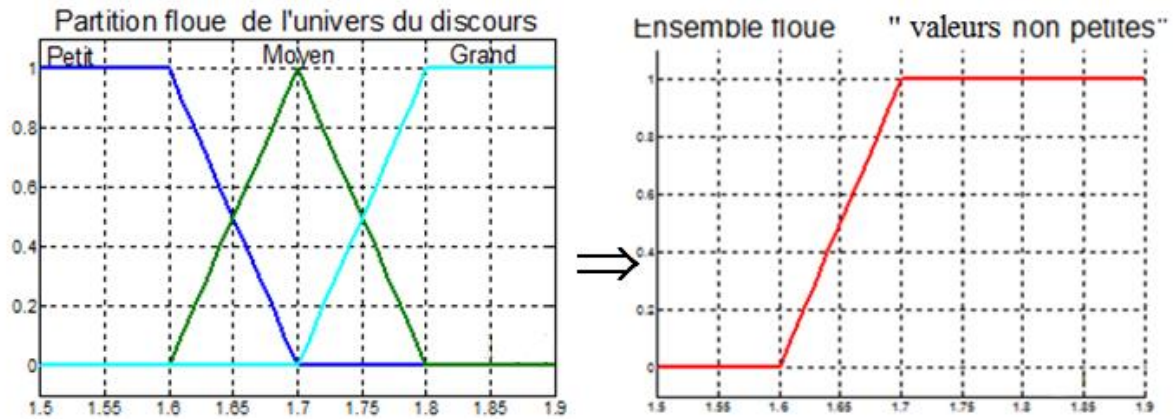


Figure III.5 .Fonction d'appartenance d'un ensemble flou (non petite).

III.4.5. Base de règle

Les systèmes à logique floue utilisent une expertise exprimée sous forme d'une base de règle du type: Si....Alors...

Si (X est A) Alors (Y est B)

La variable floue X appartient à la classe floue A avec un degré de validité  $\mu(x_0)$ .

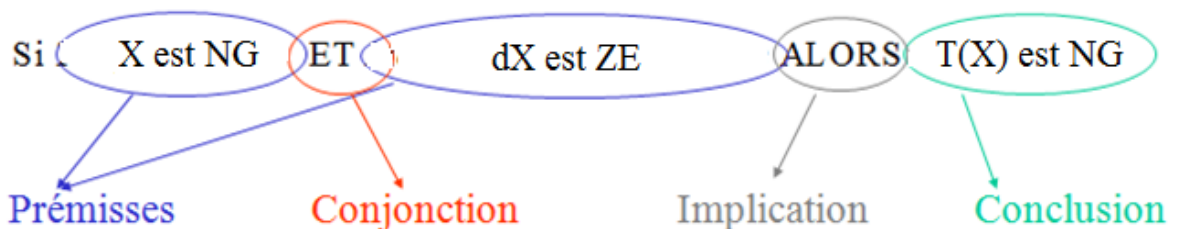
La variable floue Y appartient à la classe floue B à un degré qui dépend du degré de validité  $\mu(x_0)$  de la prémisse. Citons un exemple sur un contrôleur de tension :

$$V_{cons} - V_{mes} = X \tag{III.8}$$

Avec X = erreur

dX = dérivée d'erreur

T(x) : est l'ensemble des valeurs linguistiques que peut prendre x.



III.4.6. Structure interne d'un système floue

D'une manière classique, le fonctionnement interne d'un système floue repose sur la structure présentée par la figure III.6 qui inclut les quatre blocs suivants<sup>[18]</sup> :

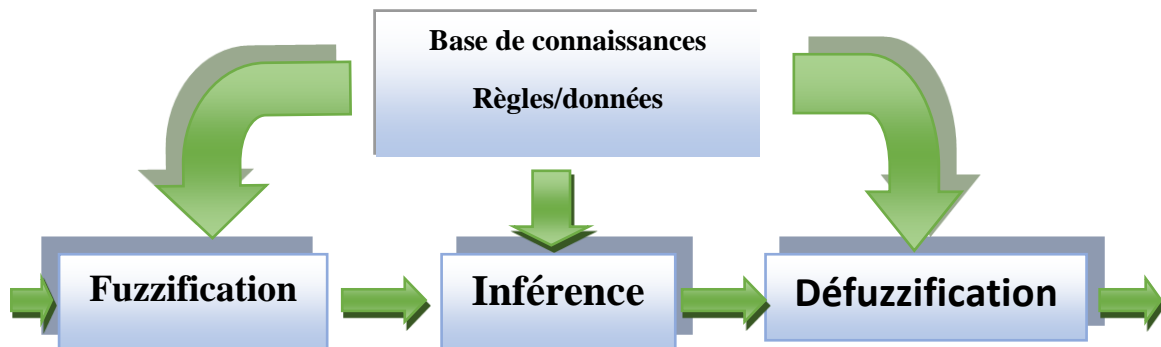


Figure III.6. Structure interne d'un système flou.

- base de connaissances ;
- fuzzification des variables d'entrée, avec éventuellement un prétraitement de l'information ;
- inférence à partir d'une base de connaissance ;
- défuzzification, avec éventuellement un post-traitement de l'information.

III.4.6.1. La fuzzification

La fuzzification consiste à calculer, pour chaque valeur d'entrée numérique, les degrés d'appartenance aux ensembles flous associés et prédéfinis dans la base de données du système flou. Ce bloc réalise la transformation des entrées numériques à des informations symboliques floues utilisables par le mécanisme d'inférence<sup>[18]</sup>. À cet effet, deux méthodes de fuzzification coexistent :

- Représentation des valeurs floues par un sous-ensemble flou AX<sub>i</sub> défini par :

$$\mu_{AX_i}(X_i) = \begin{cases} 1 & \text{si } X=X' \\ \text{Et décroît quand } X \text{ s'éloigne de } X' \end{cases} \quad \text{(III.9)}$$

- Représentation des valeurs floues par un singleton A défini par :

$$\mu_{AX_i}(X) = \begin{cases} 1 & \text{si } X= X' \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad \text{III.10)}$$

Où X' est une valeur numérique d'entrée. C'est un cas particulier du premier pour simplifier les calculs<sup>[22]</sup>.



### III.4.6.2 La base de connaissance

La base de connaissance comprend une connaissance du domaine d'application et les buts du contrôle prévu, elle se compose de :

#### III.4.6.2.1 Base de données

- Discrétisation/normalisation des univers de discours ;
- Partition floue des espaces d'entrée et de sortie ;
- Choix de fonctions d'appartenance.

#### III.4.6.2.2 Base de règles

- Choix des variables d'état du processus (entrée) et des variables de contrôle (sortie) ;
- Source et dérivation des règles de contrôle flou ;
- Types de règle de contrôle flou ;
- Consistance, interaction et complétude des règles.

### III.4.6.3 L'inférence

Le mécanisme d'inférence consiste, d'une part, à calculer le degré de vérité des différentes règles du système et, d'autre part, à associer à chacune de ces règles une valeur de sortie. Cette dernière dépend de la partie de la conclusion des règles qui peut prendre plusieurs formes. Il peut s'agir d'une proposition floue.

### III.4.6.4 Défuzzification

À la fin de l'inférence, l'ensemble flou de sortie est déterminé sans pour autant être utilisé directement pour donner une information précise à l'opérateur ou commander un actionneur. Il est nécessaire de passer d'un « monde flou » au « monde réel », c'est la Défuzzification<sup>[16]</sup>.

### III.4.7. Régulateur flou

Après avoir énoncé les concepts de base et les termes linguistiques utilisés en logique floue, il faut maintenant présenter la structure d'un contrôleur flou. En général, celui-ci est un système qui associe à tout vecteur d'entrée  $X=[x_1, x_2, \dots, x_n]$  un vecteur de sortie  $Y=[y_1, y_2, \dots, y_n]$  tel que  $Y=F(X)$  où  $F(X)$  est souvent une fonction non linéaire. Le schéma de base d'un contrôleur flou repose sur la structure d'un régulateur classique à la différence de la forme incrémentale. Cette dernière donne en sortie, non pas la grandeur de commande à appliquer au processus, mais plutôt l'incrément de cette grandeur.

Un régulateur flou peut être présenté selon maintes façons, mais en général la présentation se scinde en trois parties :

- la fuzzification qui permet de passer des valeurs réelles vers des valeurs linguistiques ;

- ➔ le cœur du régulateur représenté par les règles reliant les entrées et les sorties ;
- ➔ et enfin, à partir des ensembles flous d'entrée, l'inférence et la défuzzification permettent de déterminer la valeur réelle de sortie comme l'illustre la Figure III.7.

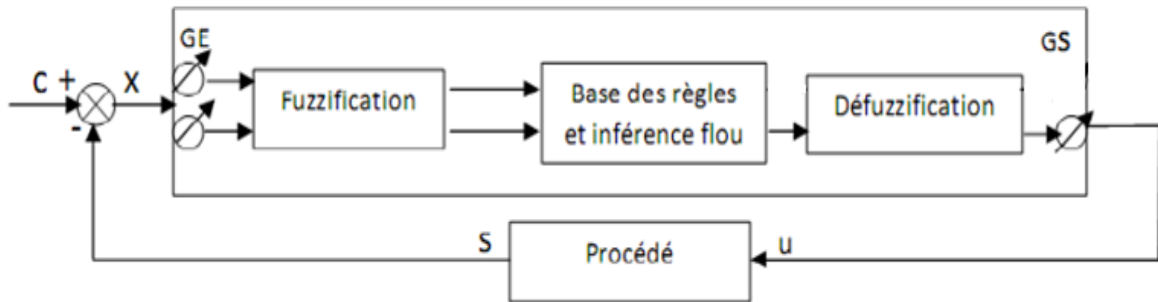


Figure III.7. Schéma d'une boucle de régulation à contrôleur flou.

### III.4.7.1. Fuzzification des entrées

La fuzzification consiste à attribuer un degré d'appartenance à chaque valeur d'entrée et le passage des grandeurs physiques (erreur, variation de l'erreur) aux variables linguistiques. Ces dernières sont définies par leurs valeurs linguistiques. Généralement, les fonctions d'appartenance qui représentent les valeurs linguistiques sont définies en forme triangulaire, trapézoïdale ou en forme de cloche. Il n'y a pas de règles précises pour la définition des fonctions d'appartenance ; ainsi peut-on introduire pour une variable linguistique trois, cinq ou sept valeurs linguistiques suivant la résolution qu'on souhaite. La désignation standard des ensembles flous est montrée dans le tableau III.1 suivant<sup>[17]</sup> :

Tableau III.1 Désignation standard des ensembles flous.

NG	Négatif Grand
NM	<b>Négatif Moyen</b>
NP	<b>Négatif Petit</b>
EZ	<b>Environ Zéro</b>
PP	<b>Positif Petit</b>
PM	<b>Positif Moyen</b>
PG	<b>Positif Grand</b>

**III.4.7.2. Inférence floue**

Les inférences lient les grandeurs mesurées et les variables de sortie par des règles linguistiques. Ces règles se combinent en utilisant les connections ET et OU. Supposons que le régulateur flou ait deux entrées convenablement transformées en variables linguistiques  $x$  et  $y$  et une sortie  $z$ , et que l'on a défini  $n$  règles linguistiques comme suit :

$$\text{Si } x = A1 \text{ ET } y = B1, \text{ Alors } z = C11 \text{ OU}$$

$$\text{Si } x = A1 \text{ ET } y = B2, \text{ Alors } z = C12 \text{ OU}$$

$$\text{Si } x = Ai \text{ ET } y = Bj, \text{ Alors } z = Cij \text{ OU}$$

.....

$$\text{Si } x = An \text{ ET } y = Bn, \text{ Alors } z = Cnn$$

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

**Tableau III.2.** Matrice d'inférence.

Z		X				
		A1	A2	.....	Ai...	An
y	B1	C11	C21	.....	Ci1	Cn1
	B2	C12	C22	.....	Ci2	Cn2
	.	.....				
	.	.....				
	.	C1j	C2j	.....	Cij	Cnj
	.	.....				
	Bi	C1n	C2n	.....	Cin	Cnn
	Bn					

Il y a plusieurs sortes d'inférence floue. Elles se différencient essentiellement par la manière dont elles vont être réalisées et les opérateurs flous utilisés dans les règles d'inférence. Ci-après sont présentées trois méthodes très usuelles d'inférence.

- Méthode max-prod ;
- Méthode min-max ;
- Méthode somme-prod.

**III.4.7.3. Défuzzification**

À cette étape se fait le retour aux grandeurs de sortie réelles. Il s'agit de calculer, à partir des degrés d'appartenance à tous les ensembles flous de la variable de sortie, l'abscisse qui correspond à la valeur de cette sortie. Différentes méthodes sont utilisées<sup>[21]</sup> :

- Méthode de centre de gravité :

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

$$dU_n = \frac{\int \tilde{x} \mu_R(x) dx}{\int \mu_R(x) dx} \tag{III.11}$$

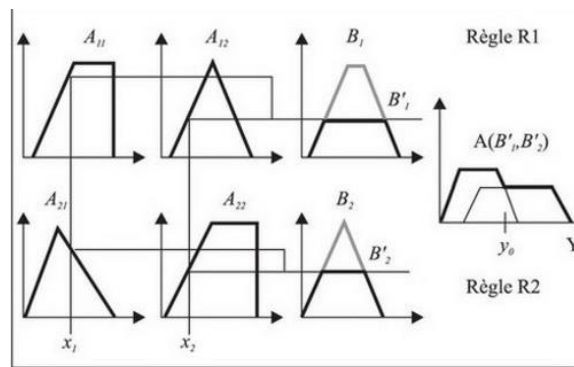


Figure III.8 : Défuzzification par la méthode du centre gravité.

À partir de ce plan, on constate que plus la fonction d'appartenance résultante est compliquée, plus le processus de défuzzification s'avère long et coûteux en temps de calcul.

- Méthode par valeur maximum

Cette méthode est beaucoup plus simple. La valeur de sortie est choisie comme l'abscisse de la valeur maximale de la fonction d'appartenance.

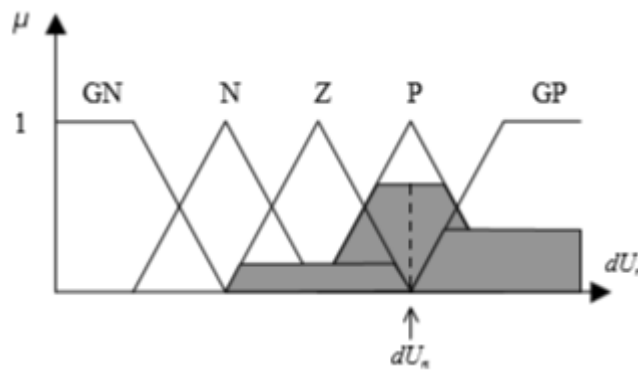


Figure III.9. Défuzzification par valeur maximum.

⇒ Méthode des hauteurs pondérées :

Elle correspond à la méthode du centre de gravité quand les fonctions d'appartenance ne se recouvrent pas.

$$dU_n = \frac{\sum X \mu_{Ri}(x)}{\sum \mu_{Ri}(x)} \tag{III.12}$$

Cette méthode est surtout utilisée dans le cas où les fonctions d'appartenance de la variable de sortie sont des singletons.

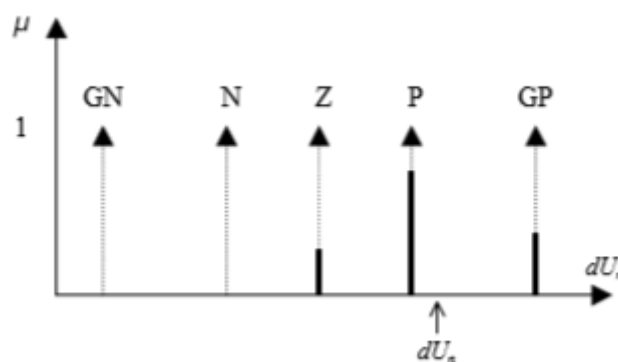


Figure III.10. Défuzzification par la méthode des hauteurs pondérées.

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

III.5. Application de contrôleur flou sur le DVR

On voit bien que tout ce que l'on a à faire, c'est de trouver la variation de la commande à appliquer à chaque instant en fonction de l'erreur et de sa variation. L'utilisation d'un système flou va nous permettre de ne pas nous soucier des coefficients  $K_p$  et  $K_i$  qui seront automatiquement déterminés en fonction des réglages que l'on aura fait sur notre système flou<sup>[19]</sup>.

Formulation que l'on utilisera pour concevoir notre système flou. Ainsi, on a :

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u \tag{III.13}$$

$$\Delta u = K_p \cdot \Delta e + K_i \cdot e \tag{III.14}$$

$$e = c - y \tag{III.15}$$

$$\Delta e = e(k) - e(k-1) \tag{III.16}$$

Avec :

- ⊕  $u(k)$  : la commande à l'instant  $k$
- ⊕  $\Delta u$  : la variation de la commande
- ⊕  $e$  : l'erreur ( $e(k)$ , l'erreur à l'instant  $k$ )
- ⊕  $\Delta e$  : la variation de l'erreur ( $e(k) - e(k-1)$ )
- ⊕  $c$  : la consigne à respecter (tension, courant...)
- ⊕  $y$  : la mesure de la réponse du système à la consigne donnée

III.5.1. Fuzzification

On considère que chaque variable de mesure (l'erreur et son ensemble flou notés  $\{NG, NP, ZE, PP, PG\}$  est défini sur l'ensemble des réels. De plus, on a admis cinq actions possibles pour la variation de la sortie de commande déterminés par les sous-ensembles flous  $\{NG, NP, ZE, PP, PG\}$  sur l'univers de discours  $[e, \Delta U]$ , avec :

NG : Négative Grande, NP : Négative Petite, ZE : zéro, PP : positif petit, PG : positif grand. La figure (III.11) représente l'allure de ces différents sous-ensembles flous<sup>[20]</sup>.

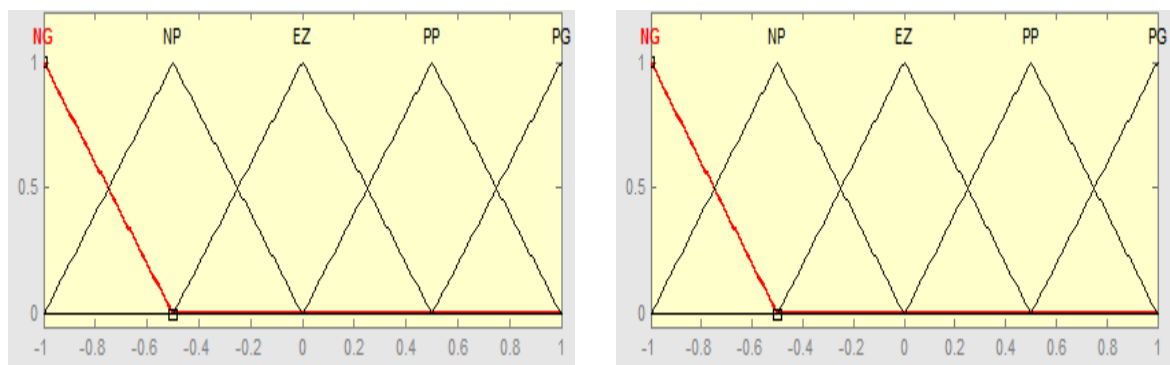


Figure III. 11. Fonction d'appartenance de l'entrée 'e' fonction d'appartenance de l'entrée 'de'.

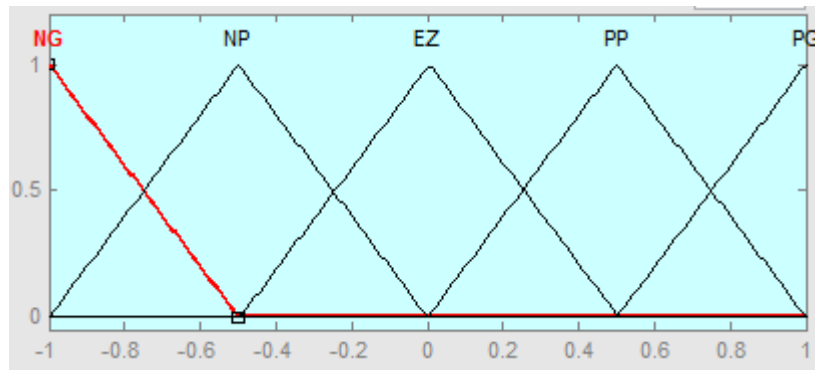


Figure III.12. Fonction d'appartenance de sortie 'dU'.

III.5.2. Base de règle

Le nombre de règles tirées à partir du plan de phase apparaît dans le tableau suivant :

Tableau III.3. Calcul de la variation de sortie 'dU' par la méthode de Mamdani.

	NG	NP	ZE	PP	PG
NG	NG	NG	NP	NP	ZE
NP	NP	NP	NP	ZE	PP
ZE	NP	NP	ZE	PP	PP
PP	NP	ZE	PP	PP	PG
PG	ZE	PP	PP	PG	PG

Quant à la méthode de défuzzification, nous avons choisi la méthode du centre de gravité.

Conclusion

Ce chapitre a donné lieu à la présentation des bases nécessaires à la compréhension des méthodes à base de logique floue, afin de l'utiliser pour commander le DVR, en vue d'une meilleure restitution dans le réseau. Préalablement, nous avons détaillé l'essentiel des principes de la logique floue tout en mettant l'accent sur le régulateur PI flou.

Le dernier chapitre sera consacré à la modélisation et à la simulation de quelques réseaux perturbés dans un environnement MATALB /Simulink. Il y sera sujet des différents essais, de ses états de fonctionnement avec/sans DVR, mais également avec un régulateur PI flou.

**1 - F. CHVRIE, F. GUELY,** « La logique floue » Cahier technique N° 191, Schneider Electric CT 199(e) édition mars 1998.

**2 - HAMOUDI F.** « Commande robuste d'un filtre actif shunt à quatre fils », Mémoire de magister en électrotechnique, université de Bejaia, 2008.

**3 - GUENOUNOU O.,** « Méthodologie de conception de contrôleurs intelligents par l'approche génétique-application à un bioprocédé », Thèse de doctorat en systèmes automatiques, université de Toulouse, promotion 2009.



# Chapitre IV

## Modélisation et simulation

## Introduction

Dans ce chapitre, on traitera le cas du contrôle de la tension aux bornes d'une charge et d'une source éolienne à l'aide d'un DVR commandé en tension. L'intérêt de cette commande, comparée aux autres types, réside dans la simplicité des équations utilisées pour l'identification puisqu'elles n'utilisent pas de PLL, d'où une sensibilité moindre aux perturbations affectant la tension d'un réseau. De plus, cette méthode permet la compensation simultanée de plusieurs perturbations.

Enfin, nous allons étudier le comportement du DVR par simulations numériques effectuées à l'aide du logiciel *Matlab*, vis-à-vis de diverses perturbations enregistrées dans un réseau MT couplé à une source décentralisée (éolienne), alimentant une charge sensible.

### IV.1. présentation du système à simuler

Nous avons utilisé un réseau triphasé classique moyenne tension composé d'une source sinusoïdale (variable en amplitude), ce réseau est couplé avec une source de production décentralisée (éolienne), d'une puissance 275 KVA et d'une tension de 480V au primaire de transformateur, paramétrées comme suit :

- Paramètres statorique :

$$[R_s, L_s] = [0.016, 0.06] \text{ (pu)}.$$

- Paramètres rotorique :

$$[R_r, L_r] = [0.015, 0.06] \text{ (pu)}.$$

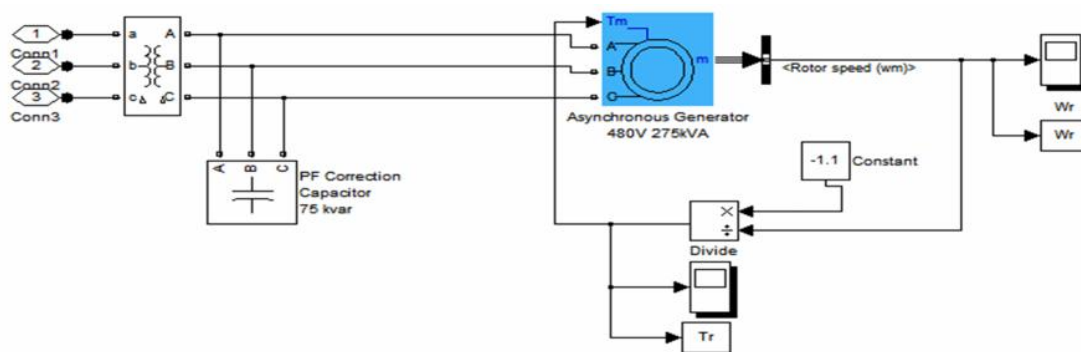


Figure IV.1 Schéma bloc de l'éolienne.

Pour le bloc d'éolienne, nous avons utilisé une génératrice asynchrone sur matlab simulink, comme montre cette figure suivante :

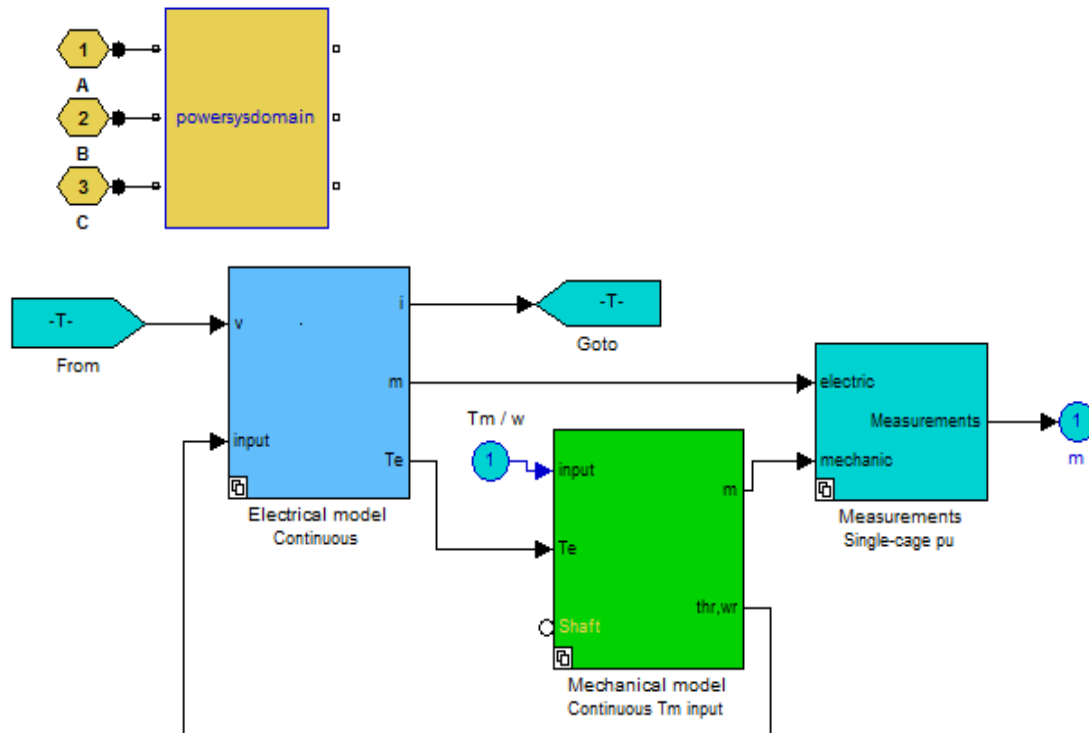


Figure IV.2 constitution de l'éolienne (MATLAB).

Et nous avons utilisés trois lignes et trois charges comme illustré sur la figure IV-3 paramétrées comme suite :

La source : 30kV 50 HZ.

Les lignes : on dispose de deux lignes de longueur de 15km auxquelles les charges sont connectées, et une ligne principale de 20km de longueur, les paramètres sont les suivants :

1.  $[r_0, r_1] = [0.03864 \ 0.025]$  Ohm/km.
2.  $[L_0, L_1] = [4.1264 \ e \ -12 \ 0.3183e \ -3]$  H/km.
3.  $[C_0, C_1] = [7.75 \ e \ -12 \ 8, \ 94 \ e \ -12]$  F/km.

Les charges :

Les valeurs de la puissance active et réactive sont 1.5MW, 0.538MVAR, pour la charge (1), et 1MW, 0.538MVAR pour la charge (2), (3).

Dans notre cas de simulation, nous nous intéressons à la réaction du DVR au moment de la perturbation de la tension du réseau, et les perturbations affectent sur la ligne sont :

- ➡ Creux de tension ;
- ➡ Surtension.

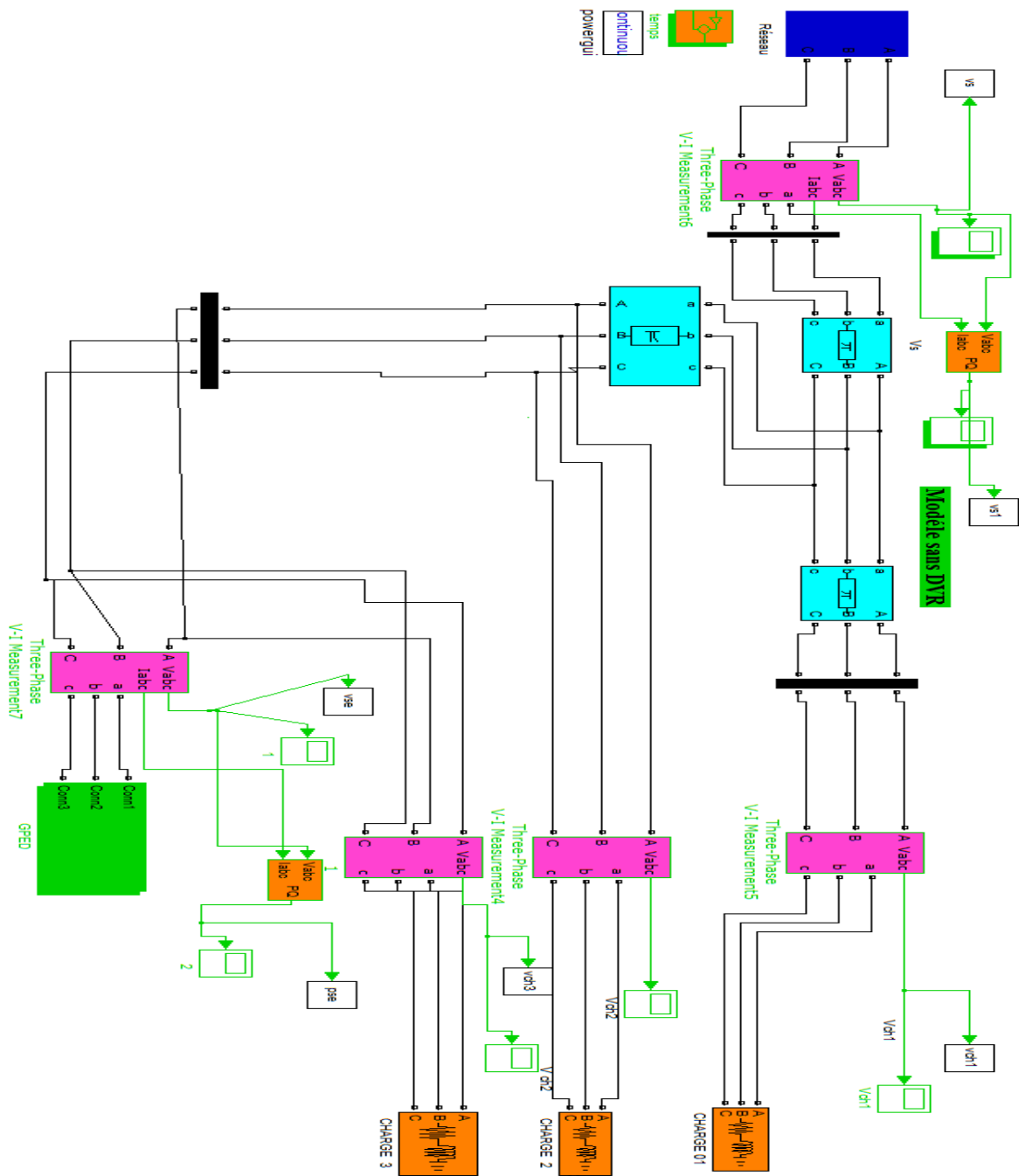


Figure IV.3 schéma bloc d'un réseau soumis à une perturbation.

### IV.2. Représentation et principe de fonctionnement

Dans le but d'atténuation des perturbations étudiées précédemment (surtension, creux de tension), on insère un DVR en amont de la source de production décentralisée et la charge perturbée comme indique la figure suivante :

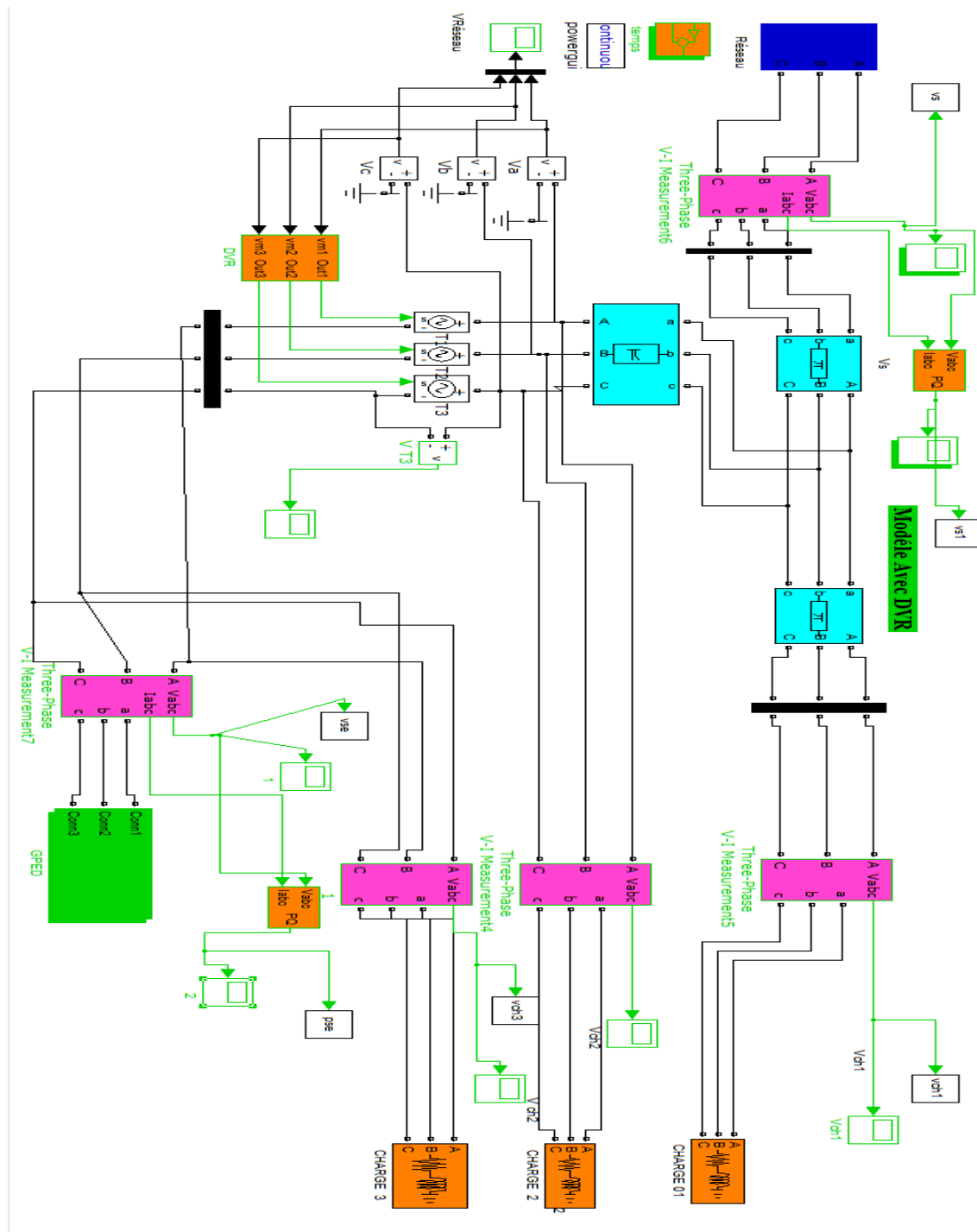


Figure IV.4. Schéma bloc d'un réseau en présence de DVR.

IV.2.1. Stratégie de contrôle de DVR

La tension injectée par le DVR  $V_{inj}$  en série au réseau, commandé en tension, dépendra du type de perturbation à compenser afin d’obtenir la tension désirée aux bornes de la charge à protéger (figure IV.5).

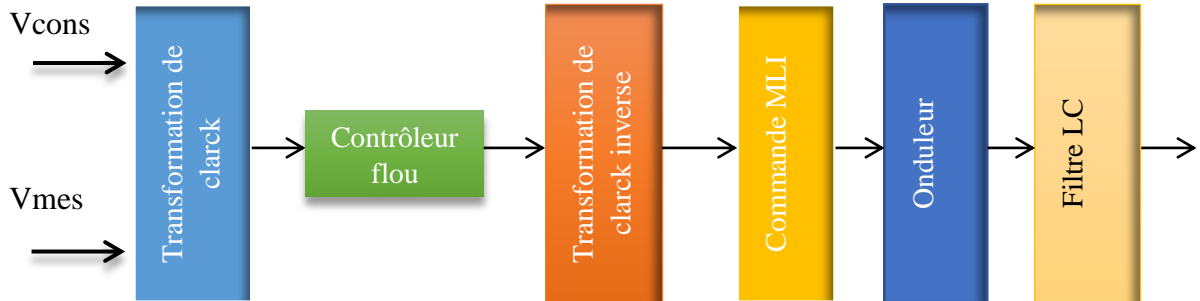


Figure IV.5. Schéma synoptique de commande de DVR.

Le but visé de cette stratégie de commande est l’énergie mise en jeu par le DVR pour assurer la compensation. La plupart de ces méthodes utilisent comme entrée au système de commande la différence entre la tension de référence et la tension mesurée, et ce en passant par les transformations de Clark et/ou de Park. L’utilisation de la transformation de Clark est, en principe, délicate dans le cas de systèmes perturbés. Ainsi, cette contrainte affecte de manière conséquente l’algorithme de commande et par conséquent, la précision des grandeurs de sortie de l’onduleur et, particulièrement, dans le cas d’un déséquilibre.

IV.3. Modélisation de système à étudier

Notre étude traite le système modélisé, entièrement, sous matlab/simulink.

IV.3.1. modélisation de DVR

Nous mesurons les tensions de chaque phase du réseau qui vont être transformées en  $V_\alpha$ ,  $V_\beta$ . Et  $V_0$  à l’aide de la transformé de Clark.

$$\text{On a } [T] = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \tag{IV.1}$$

$$[T]^{-1} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1/2 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 & 1/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 & 1/2 \end{bmatrix} \tag{IV.2}$$

$$[V_{\alpha\beta 0}] = [T] * [V_{abc}] \tag{IV.3}$$

On aura

$$\left. \begin{aligned} V_\alpha &= 2/3 (u [1] * 1 - u [2]* 1/2 - u [3]*1/2) \\ V_\beta &= 2/3 (u [1]*0 + u [2]*\sqrt{3} /2 - u [3]*\sqrt{3} /2) \\ V_0 &= 2/3 (u [1]*1/2 + u [2]*1/2 +u [3]*1/2) \end{aligned} \right\} \quad (IV.4)$$

Les valeurs calculées de  $V_\alpha, V_\beta, V_0$  vont être comparées à une valeur de consigne transformée à l'aide de la transformation de Clark.

$$\begin{bmatrix} V_{er\alpha} \\ V_{er\beta} \\ V_{er0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{ref\alpha} \\ V_{ref\beta} \\ V_{ref0} \end{bmatrix} \quad (IV.5)$$

Les valeurs résultantes passées par un contrôleur flou et ces derniers vont transformée à l'aide de transformation inverse de clark,

$$[U_{abc}] = [T]^{-1} * [U_{cm\alpha\beta 0}] \quad (IV.6)$$

On aura

$$\left. \begin{aligned} U_a &= \sqrt{3}/2 U_{cm\alpha} + \sqrt{(3/8)} U_{cm\beta} \\ U_b &= -\sqrt{(3/8)} U_{cm\alpha} + 3/\sqrt{8} U_{cm\beta} + \sqrt{(3/8)} U_{cm0} \\ U_c &= -\sqrt{(3/8)} U_{cm\alpha} - 3/\sqrt{8} U_{cm\beta} + \sqrt{(3/8)} U_{cm0} \end{aligned} \right\} \quad (IV.7)$$

Elle nous permet d'avoir une modulatrice à transmettre à une commande MLI pour avoir des tensions générées par un onduleur qui nous fournit une tension filtrée par un filtre LC.

$$\begin{bmatrix} V_{inja} \\ V_{injb} \\ V_{inj c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \quad (IV.8)$$

La tension à la sortie du DVR est nulle s'il n'y a pas de perturbation car les tensions mesurées sont égales aux tensions de consigne en phase et en amplitude.

A l'instant de défaut, les variations subies par les tensions mesurées amèneront le DVR a injecté une tension adéquate en amplitude et en phase pour compenser la perturbation.

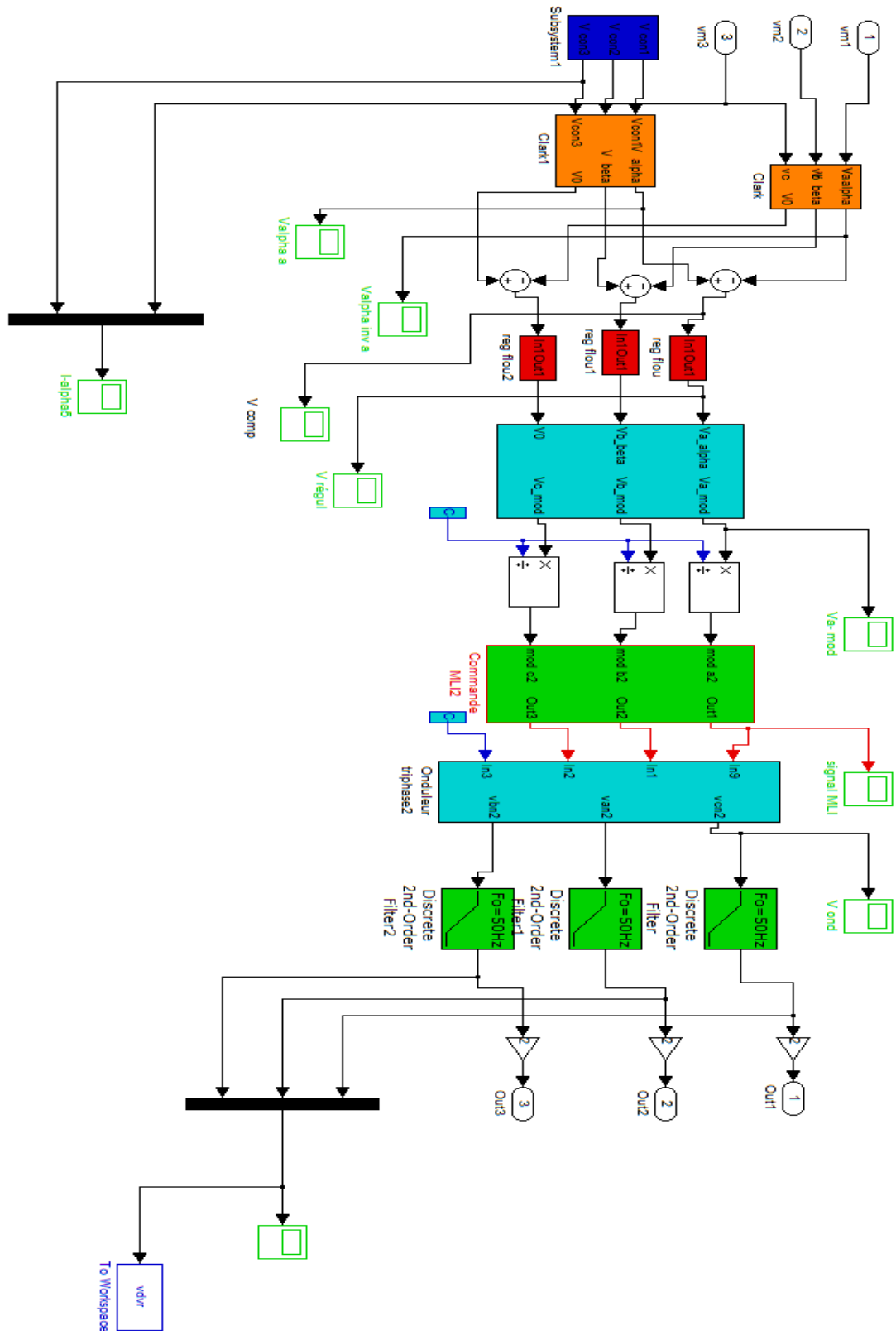


Figure IV.6. Schéma bloc de DVR.



**IV.3.1.1. bloc de contrôleur flou**

Les écarts entre composantes des tensions de référence,  $V_{ref}(\alpha, \beta, 0)$  et celles des tensions mesurées,  $V_m(\alpha, \beta, 0)$  sont corrigés par des régulateurs de type **PI-Flou**.

Les grandeurs de sortie des trois régulateurs sont transformées à l'aide de la transformation inverse de Clark, en trois grandeurs instantanées qui constituent les trois tensions modulatrices,  $V_{mod}(1, 2, 3)$ , du dispositif de commande MLI de l'onduleur du simulateur hors temps réel.

**IV.3.1.2. Onduleur**

L'onduleur représente l'une des parties réelles du modèle de simulation hybride, par conséquent, il n'y a aucune modélisation à effectuer pour ce cas. Par contre, dans le cas de la simulation hors temps réel, le modèle de l'onduleur est de type moyen généralisé.

**IV.4. Les étapes de la simulation**

1. Simulation du Modèle Sans DVR et avec perturbations (Surtension, creux de tension) ;
2. Simulation du Modèle Avec DVR en régime perturbé.

**IV.5. Simulations et interprétations des résultats**

Afin de discuter pertinemment les résultats des simulations de l'ensemble constitué par le réseau, le dispositif FACTS série DVR et la charge sensible, et la source décentralisée (éolienne), nous allons présenter nos résultats des simulations effectuées sous *Matlab/Simulink* en deux (02) étapes : la première étape concerne la simulation d'un réseau en présence d'un creux de tension de 20% d'amplitude connectée au point de raccordement. La deuxième étape concerne la simulation avec une surtension de 20% d'amplitude connectée au PCC.

Les paramètres de simulations sont identiques dans tout le travail tel que:

- La tension composée est de 30kv ;
- La fréquence est de 50Hz ;
- La durée de défaut est 0.2s.

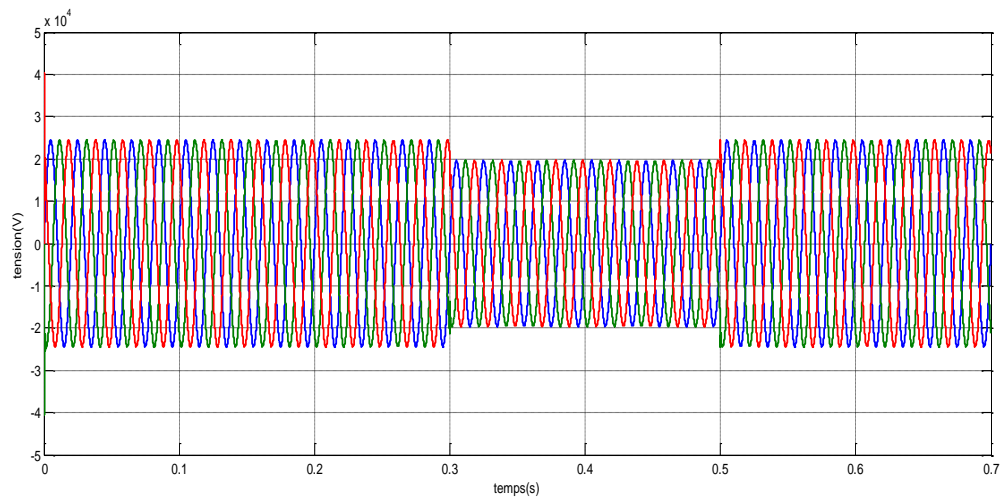
Dans ce travail, on applique des différentes perturbations en tension sur un système triphasé.

**IV.5.1. Creux de tension**

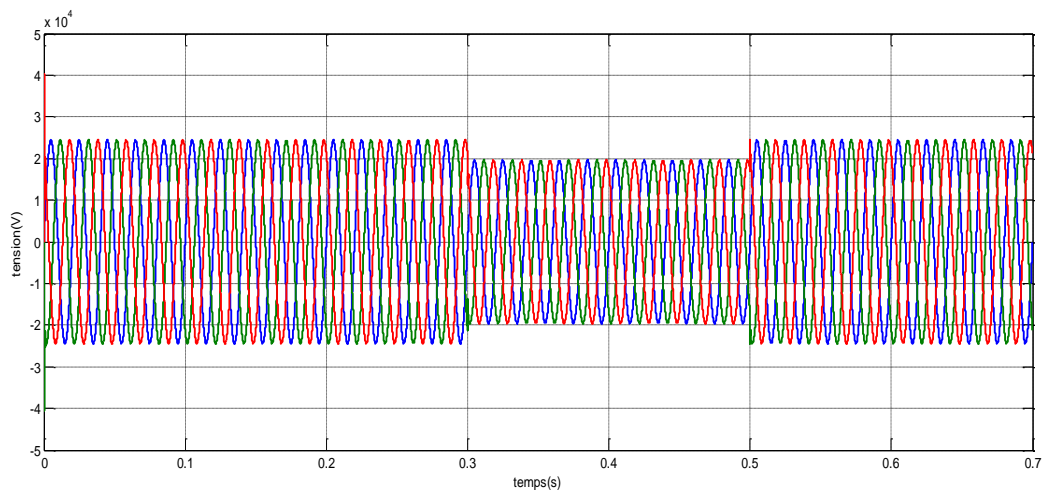
D'après la simulation, on aura les résultats suivants :

**a. Tension**

Sans le DVR



**Figure.IV.7.a** Tension au niveau de la source.



**Figure IV.7.b** Tension au niveau de la charge 3 et GPED

A la présence de DVR

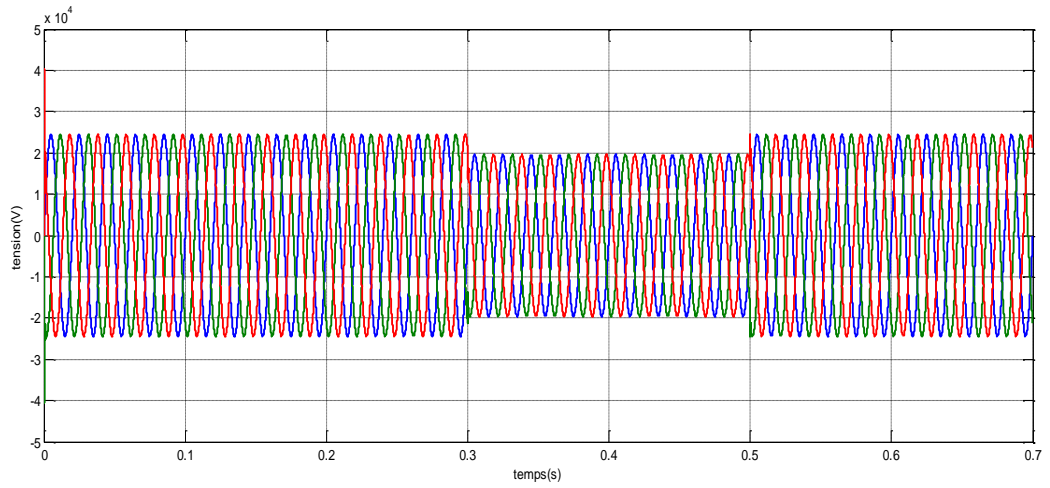


Figure IV.8.a. Tension au niveau de la source.

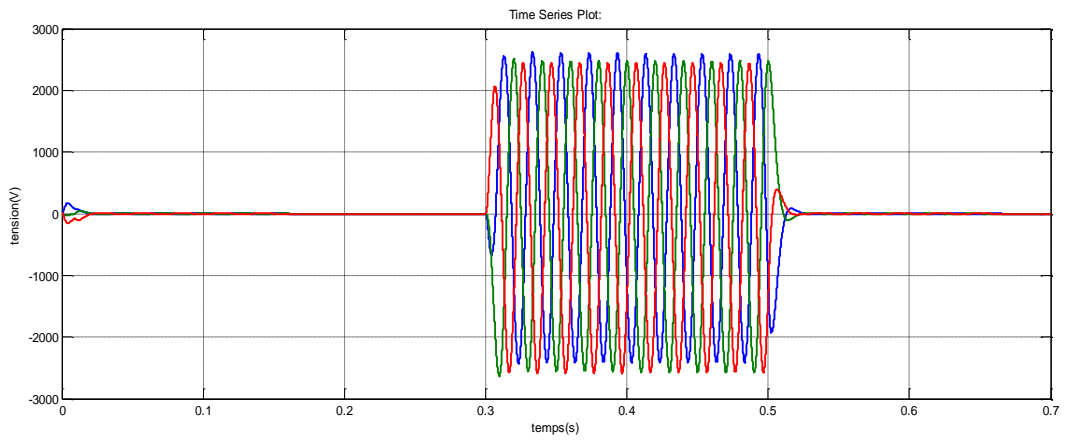


Figure IV.8.b Tension injecté par DVR

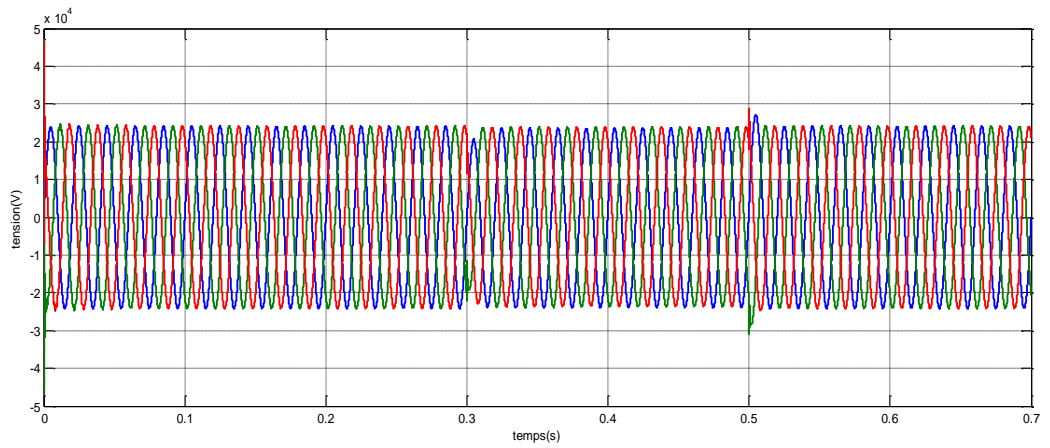
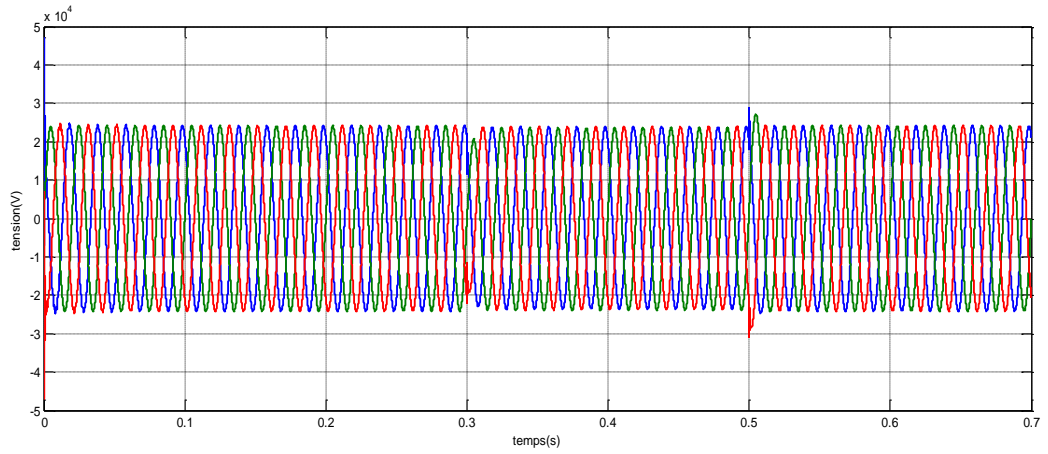


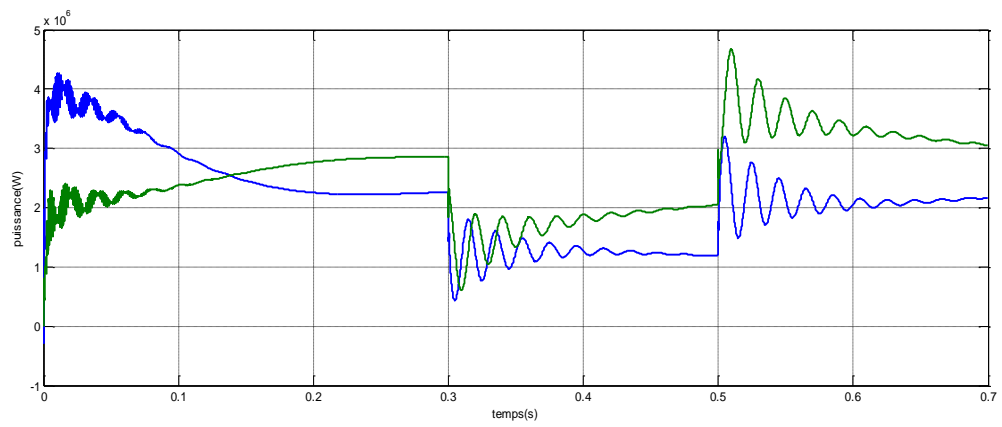
Figure IV.8.c Tension au niveau de GPED



**Figure.IV.8.d** Tension au niveau de la charge sensible

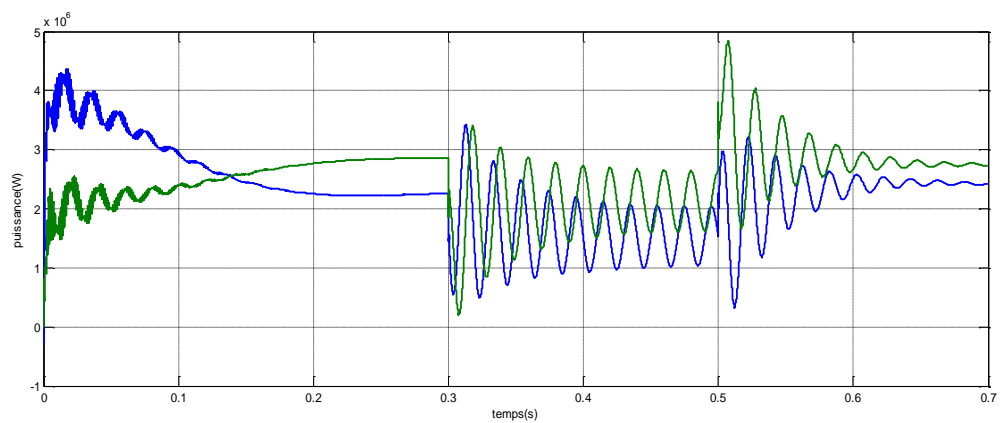
**b. Puissance active et réactive**

Sans DVR



**Figure IV.9.a** Puissances active et réactive de la source

Avec DVR



**Figure IV.9.b** Puissances active et réactive de la source.

Sans DVR

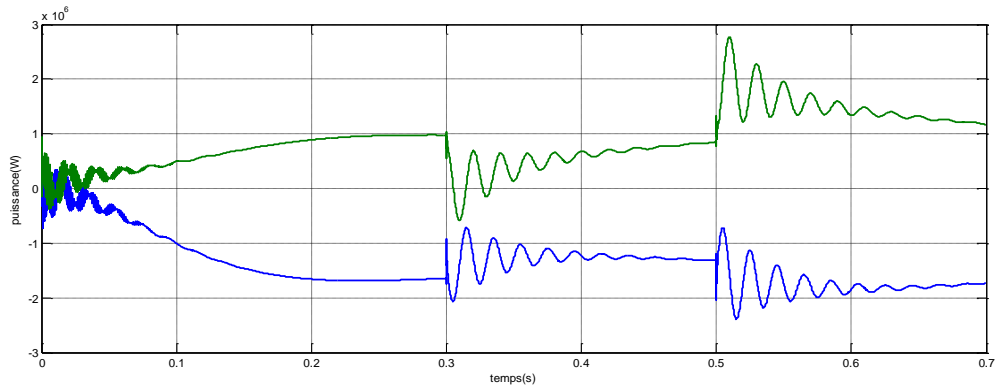


Figure IV.9.c Puissances active et réactive de GPED.

Avec DVR

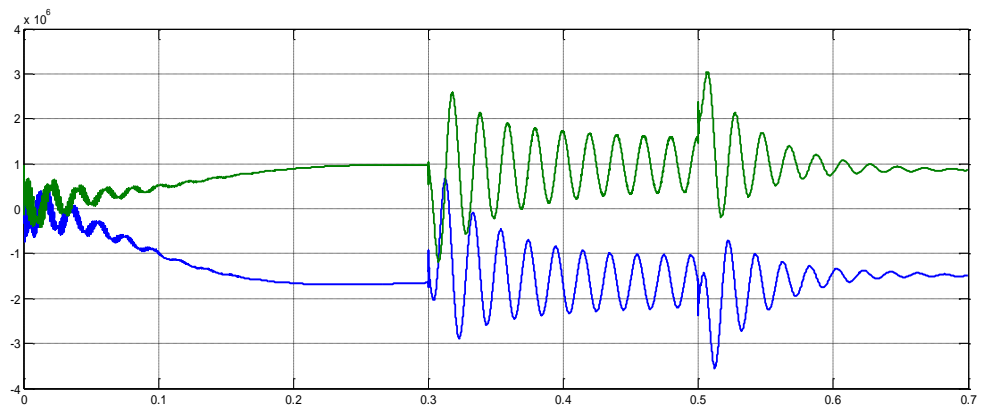


Figure IV.9.d Puissances active et réactive de GPED.

Avec la couleur : verte : la puissance active, Bleu : la puissance réactive.

### c. Vitesse d'éolienne ( $W_r$ )

Sans DVR

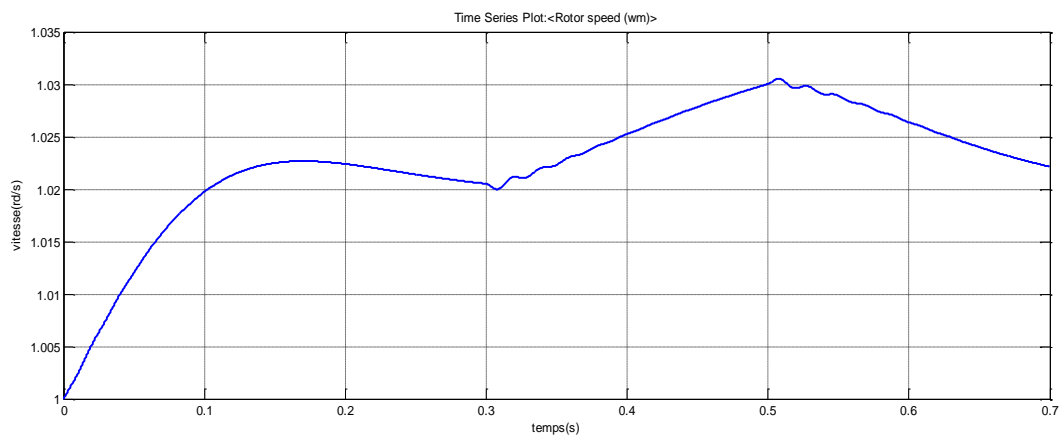


Figure IV.10.a Vitesse de l'éolienne.

Avec DVR

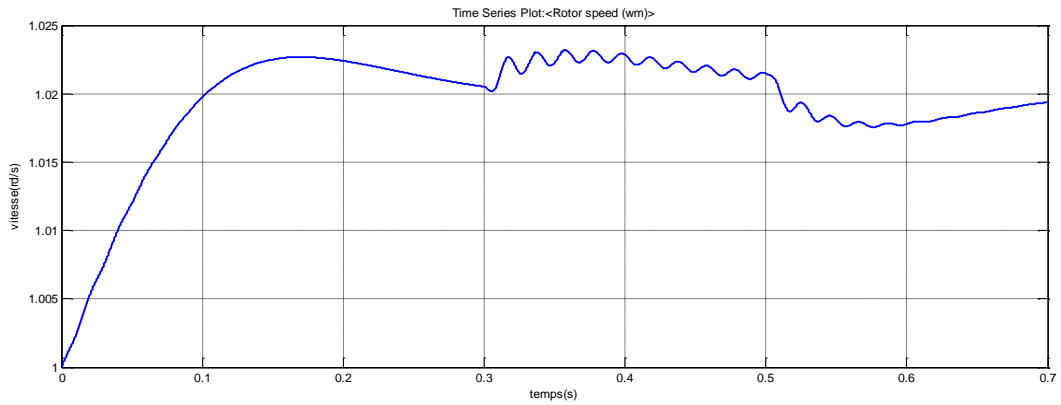


Figure IV.10.b Vitesse de l'éolienne.

**d. Le couple résistant ( $T_r$ )**

Sans DVR

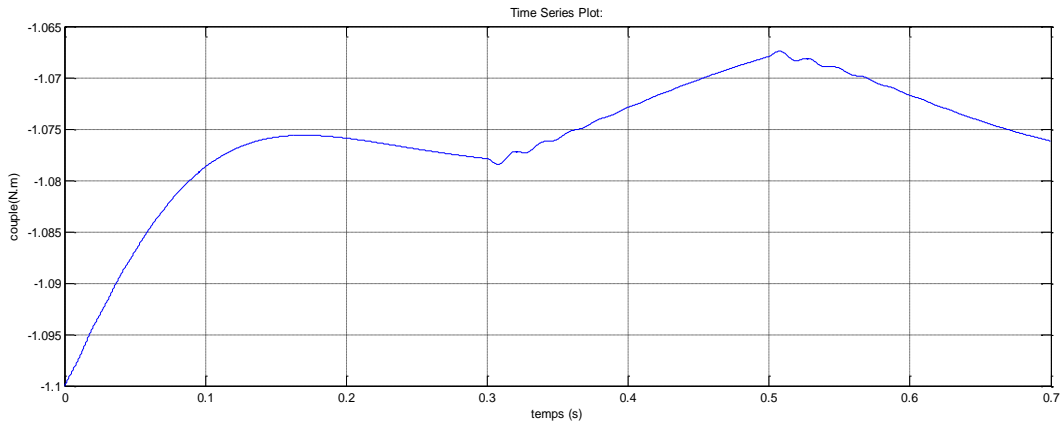


Figure IV.11.a Couple résistant de l'éolienne.

Avec DVR

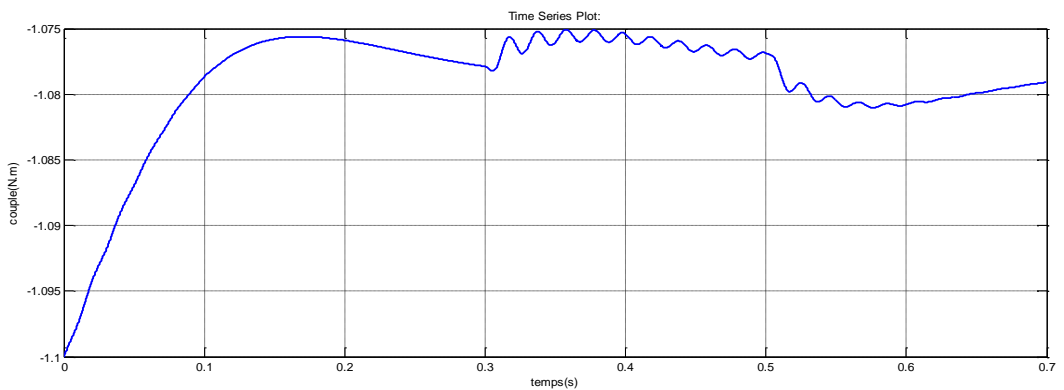
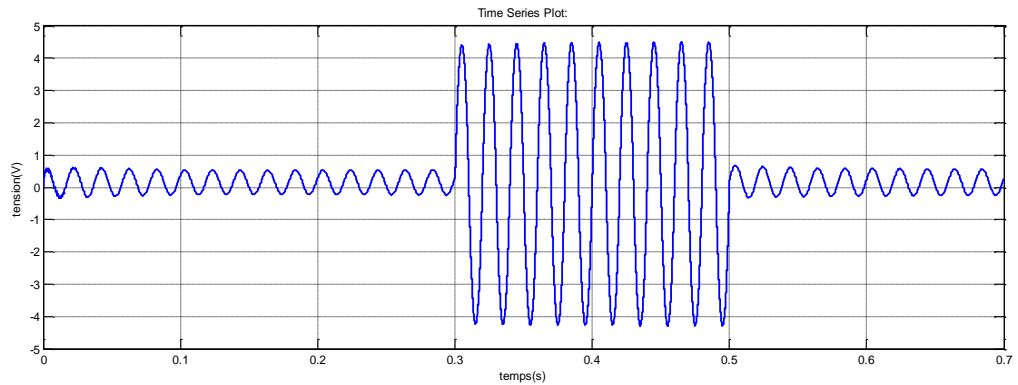


Figure IV.11.b Couple résistant de l'éolienne.

**e. Le signal de commande d'un régulateur flou**



**Figure IV.12.** Signal de commande à la sortie de régulateur flou.

**IV.5.1.1. Interprétation des résultats**

Pour le creux de tension imposé au réseau de distribution simulé, nous avons analysé le schéma de montage précédemment représenté de chaque type, les puissances active et réactive au niveau de la source triphasée, la charge sensible triphasée et à la sortie du GPED. De même, nous avons analysée la vitesse et le couple résistant du GPED, et cela en absence comme en présence du DVR

**a) Cas d'un creux de tension en absence du DVR**

Dans ce cas on a remarqué aussi la propagation de la perturbation sur la GPED et la charge sensible triphasée on a :

- Diminution de la tension avec 20% de la tension nominale du réseau de distribution ;
- Diminution de la tension avec 20% au niveau de la GPED et les charge triphasée ;
- Diminution de la puissance active et réactive de la GPED ;
- Augmentations de la vitesse d'éolienne et le couple d'éolienne.

**b) cas d'un creux de tension en présence du DVR**

Le but de l'implantation d'un DVR en aval d'éolienne et en amont de la charge (3) est pour la stabilisation de la tension et en compensant toute sorte le creux de tension pouvant nuire au GPED et à la charge triphasée. Ceci est rendu possible grâce au DVR qui injecte une tension manquante ou compensatrice au réseau reliant en série la charge sensible et la source éolienne.

Et on a remarqué aussi la stabilisation de la puissance active et réactive à la borne de la GPED, la charge triphasée (3), la vitesse et le couple résistant d'éolienne.

**IV.5.2. Surtension**

Dans le bloc de source programmable, on impose l'amplitude de 1.2, c.-à-d. En programme une élévation de 20% de la tension nominale pendant 0.2s.

Les résultats obtenus sont les suivants :

a. Tension

Sans DVR

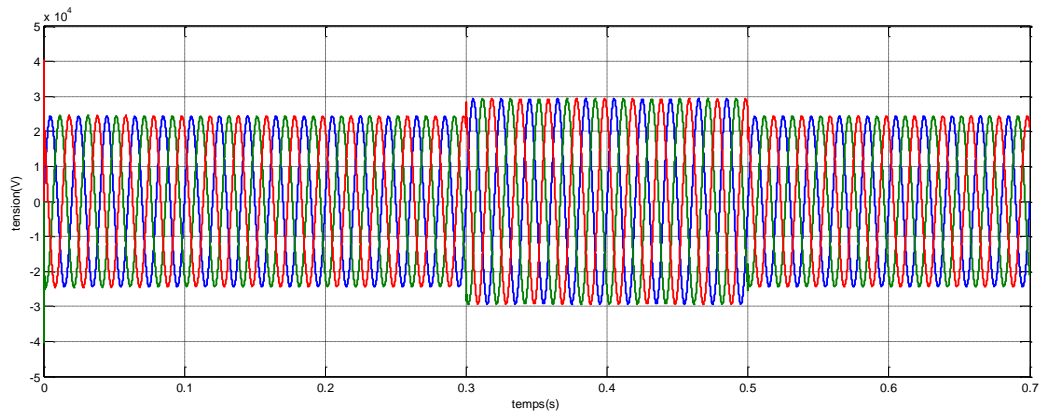


Figure IV.13.a. Tension au niveau de la source.

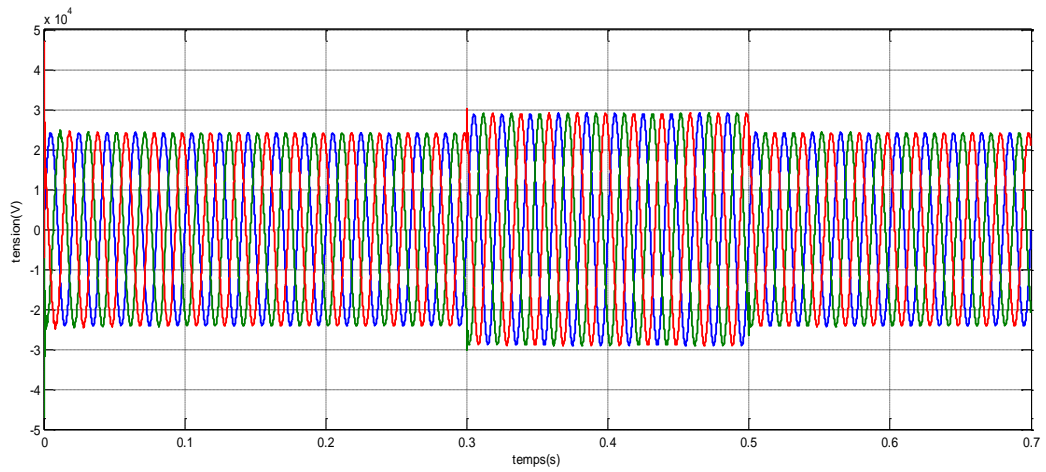


Figure. IV.13.b. Tension au niveau de la charge 3 et GPED.

A la présence de DVR

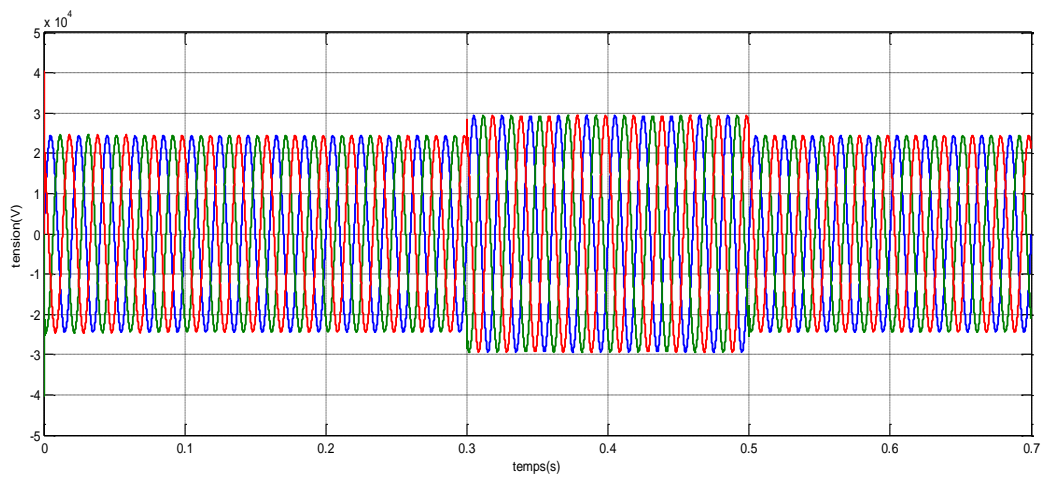


Figure IV.14.a. Tension au niveau de la source.



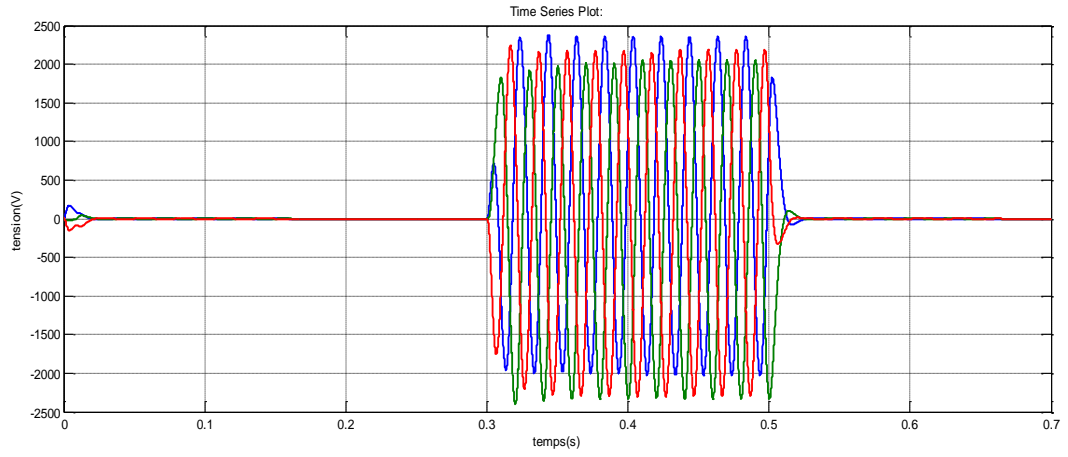


Figure IV.14.b . Tension injecté par DVR.

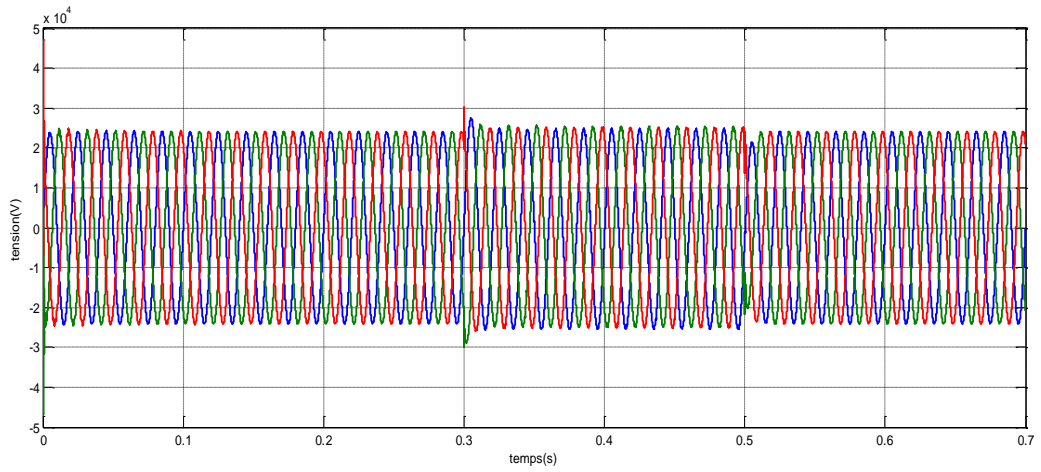


Figure IV.14.c. Tension au niveau de GPED.

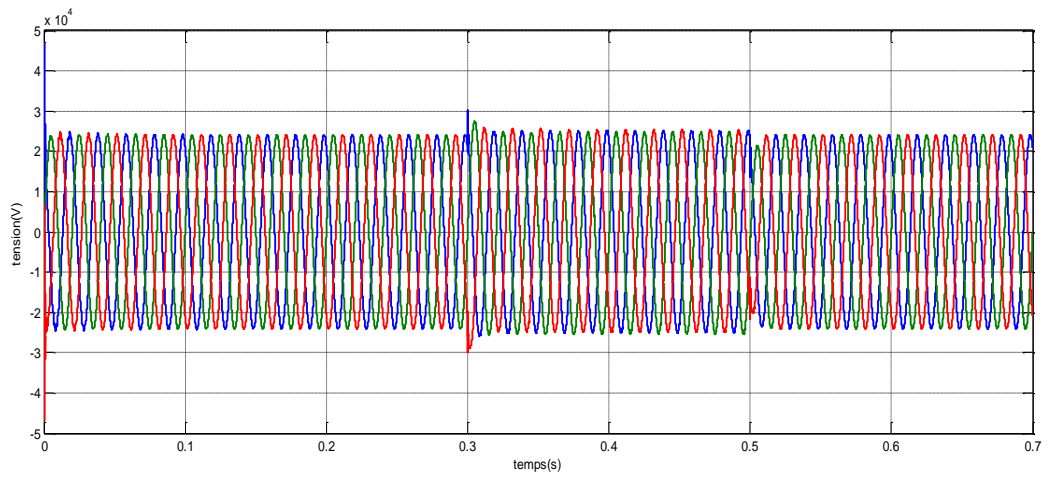


Figure.IV.14.d Tension au niveau de la charge sensible.

b. Puissances active et réactive

Sans le DVR

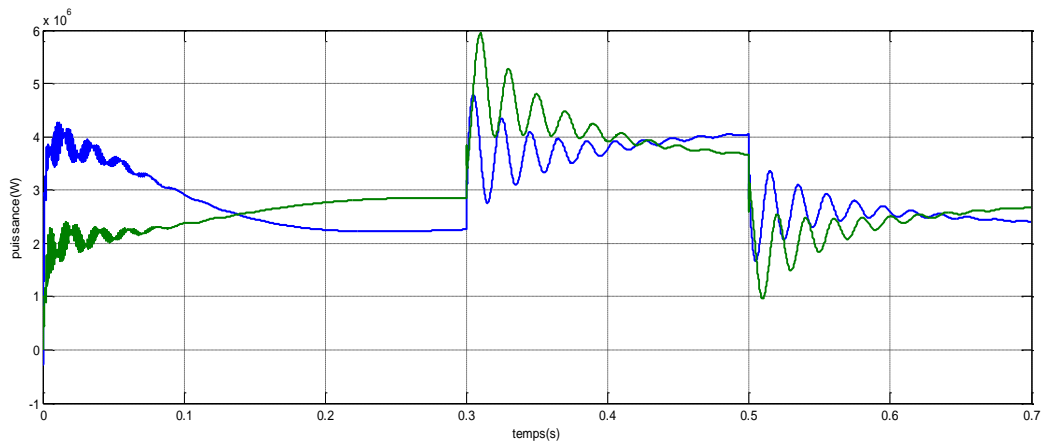


Figure IV.15.a Puissances active et réactive de la source.

Avec DVR

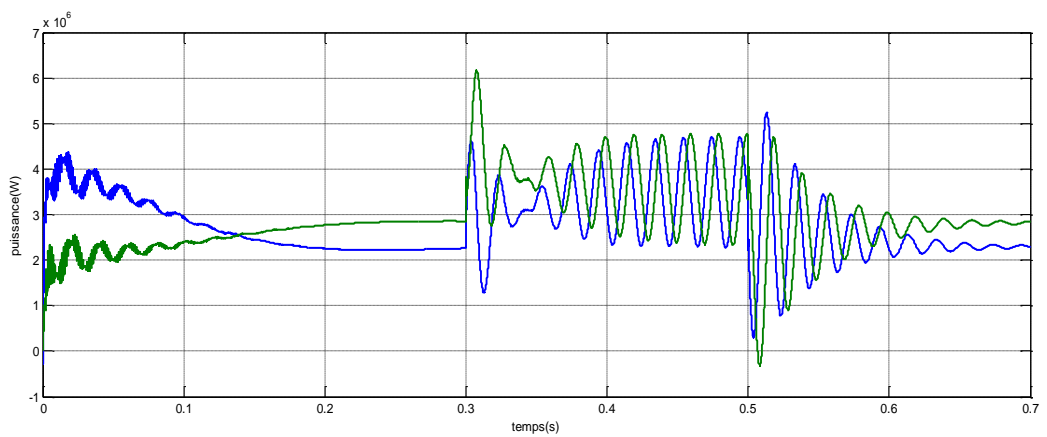


Figure IV.15.b. Puissances active et réactive de la source.

Sans DVR

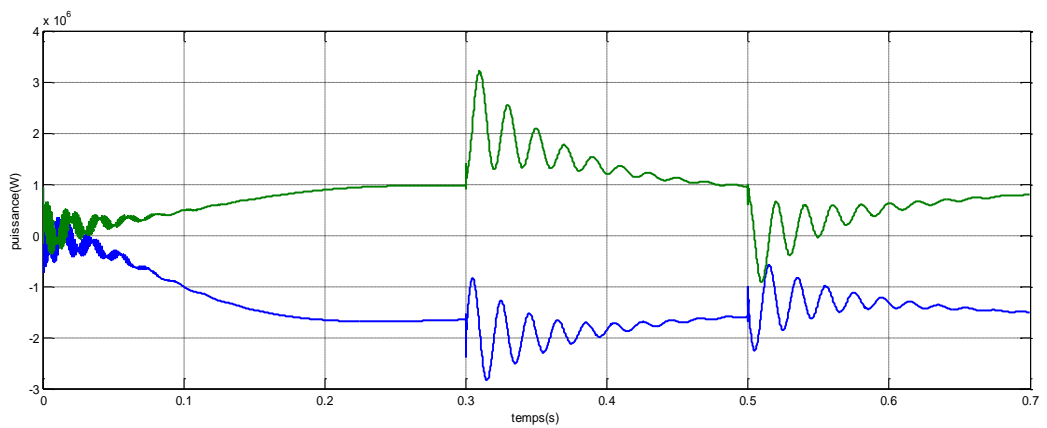
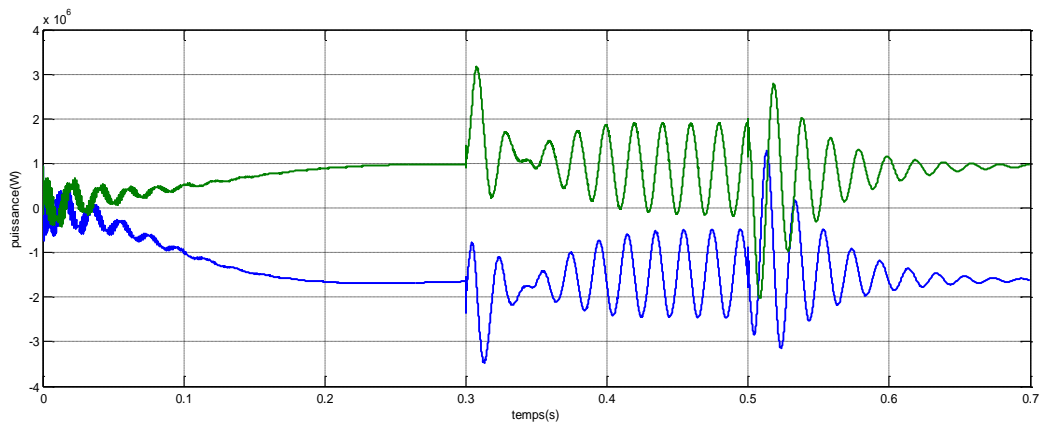


Figure IV.15.c. Puissances active et réactive de GPED.

Avec DVR

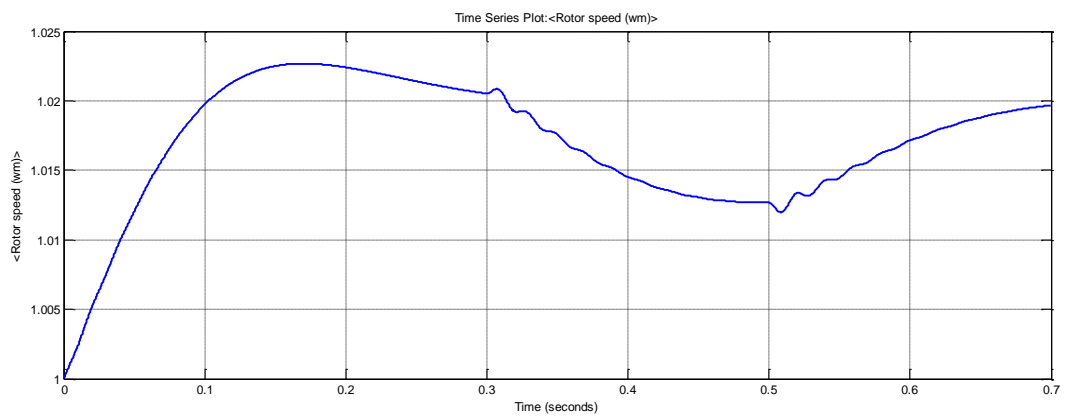


**Figure IV.15.d.** Puissances active et réactive de GPED.

Avec la couleur : verte : la puissance active, Bleu : la puissance réactive.

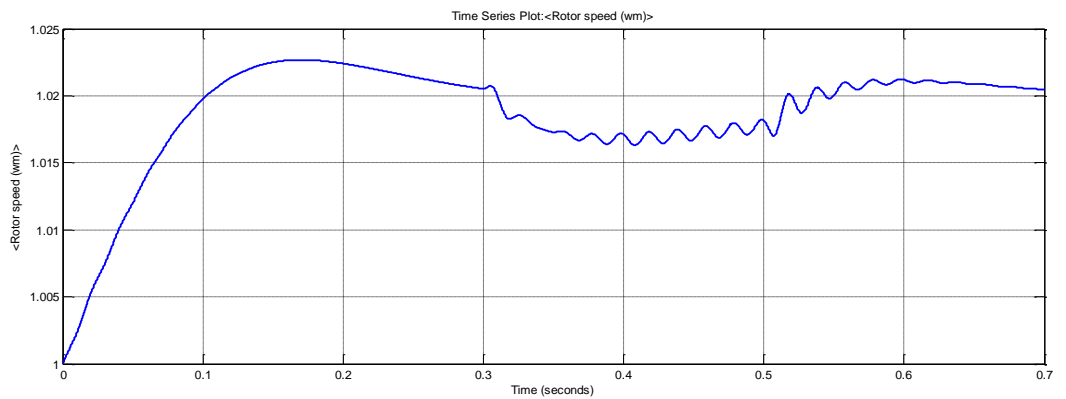
**c. Vitesse d'éolienne (V)**

Sans DVR



**Figure IV.16.a.** Vitesse de l'éolienne.

Avec DVR



**Figure IV.16.b.** Vitesse de l'éolienne.

d. Le couple résistant ( $T_r$ )

Sans DVR

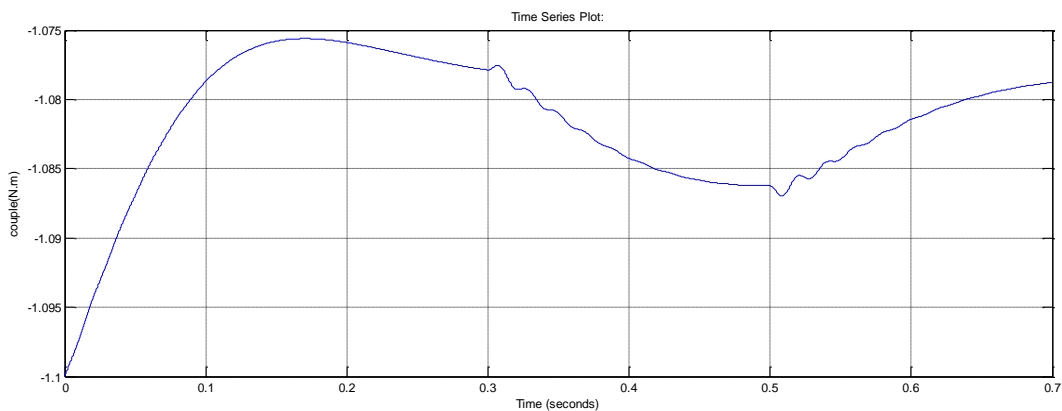


Figure IV.17.a. Couple résistant de l'éolienne.

Avec DVR

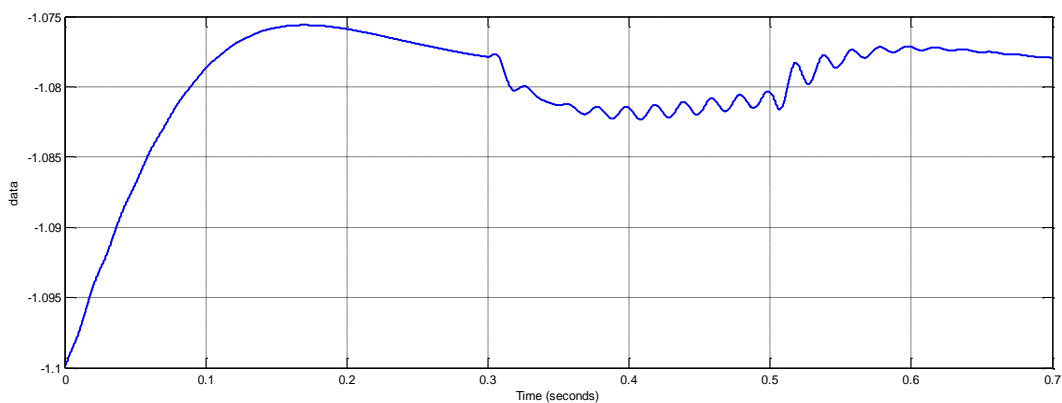


Figure IV.17.b. Couple résistant de l'éolienne.

e. Le signal de commande d'un régulateur flou

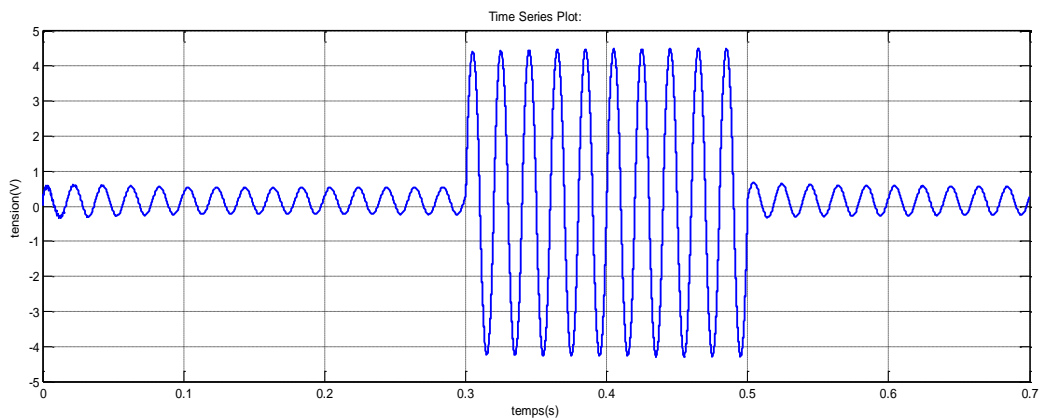


Figure IV.18. Signal de commande à la sortie de régulateur flou.

### IV.5.2.1. Interprétation des résultats

Nous avons analysé les tensions, les puissances active et réactive au niveau de la source triphasée, la charge sensible et à la source éolienne, que nous avons simulé précédemment. Aussi on a analysé la vitesse et le couple résistant de la GPED, et cela en absence et en présence du DVR.

#### a) Cas de surtension en absence d'un DVR

À partir de notre comparaison entre les allures du régime normal (sans surtension) et les allures du régime anormal (avec surtension) on a remarqué les points suivants :

- Augmentations de la tension avec 20% de la tension nominale du réseau de distribution ;
- Augmentations de la tension avec 20% au niveau de la GPED et les charge triphasées ;
- Augmentations de la puissance active et réactive au niveau de la GPED ;
- Diminution de la vitesse et le couple d'éolienne.

#### b) Cas de surtension en présence d'un DVR

Planté en aval d'éolienne et en amont de la charge (3), le DVR a pour but de stabiliser la tension et compenser toute sorte de perturbation de tension nuisible au GPED autant qu'à la charge sensible triphasée. Les résultats de simulation ont démontré la réaction positive du DVR, il arrive à maintenir la tension invariable aux bornes du GPED et la charge triphasée (3) connectée à la sortie d'éolienne. En présence du DVR toujours, on remarque aussi la stabilisation de la puissance active et réactive de la vitesse et du couple résistant d'éolienne au niveau de la GPED.

### Conclusion

Le gros de ce chapitre a porté sur la simulation du DVR avec le réseau. Les résultats de la simulation ont démontré que le DVR est apte à compenser les différentes perturbations.

Le DVR est d'une excellente capacité d'exécution à protéger les charges sensibles. Il est parfaitement en mesure de traiter différents types de perturbations et de durée de défaut grave, voire au-delà de ces problèmes. Pour corriger n'importe quelle sorte d'anomalie dans la tension d'alimentation, il y parvient en injectant le composant approprié de tension dans la tension d'alimentation pour maintenir la tension de charge constante à la valeur nominale.

Il est aussi à remarquer que le DVR a la possibilité de stabiliser les puissances active et réactive, la vitesse et le couple résistant au niveau d'une source décentralisé éolienne.

# Conclusion générale

### Conclusion générale

L'augmentation des transits de puissance dans les réseaux d'énergie électrique ainsi que les contraintes environnementales ont conduit à l'introduction des dispositifs FACTS (Flexible AC Transmission Systems) pour l'amélioration de l'exploitation des réseaux. Ces dispositifs sont capables de remplir diverses fonctions, tels que le maintien de la tension, du contrôle des flux de puissance, l'amélioration de la stabilité du réseau, l'augmentation de la puissance transmissible maximale, etc. De plus, grâce à la promptitude de leur réponse, ils firent tôt de prouver leur efficacité d'outils d'amortissement des oscillations électromécaniques à très basses fréquences. Cette nouvelle fonction des dispositifs FACTS est d'autant plus importante que l'interconnexion des réseaux mondiaux gagne en amplitude. Autrement dit, ils sont plus sensibles aux oscillations électromécaniques inter-régions. Cependant, le recours à de nombreux dispositifs FACTS dans un réseau nécessite d'étudier attentivement les éventuels problèmes d'interaction de régulation des dispositifs FACTS entre eux, mais aussi avec les autres éléments du réseau.

Le travail effectué dans ce mémoire a pour objet les applications relatives à l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique dans les réseaux de distributions via un compensateur connecté en série avec le réseau. Il s'agit d'un DVR muni d'une commande à base de la logique floue.

L'insertion du DVR sous environnement *Matlab/Simulink* a livré des résultats de simulations démontrant clairement l'efficacité de ce type de dispositif et de la méthode de logique floue à compenser toutes les perturbations, à savoir les creux de tension et les surtensions.

Au bout de cette étude, à titre de conclusion, nous pouvons affirmer que le dispositif (DVR) est très bénéfique pour les réseaux électriques. Il est tout à la fois flexible sur le plan du transit de la puissance qu'en matière de stabilité de tension basée sur le régulateur flou de type **PI** qui représente l'élément constitutif de base de ce dispositif.

# Références bibliographiques



### Bibliographie

- [1] **LASN L.** « Électrotechnique », DUUNOD 2008.
- [2] **THOMAS J, ALEXANDER K, MOUHAMED R, DIRK W.** « Amélioration de la qualité de l'énergie électrique par correction instantané de la tension », ABB technique de haute tension SA, Zurich, 4/1998.
- [3] **LAROUCI B, BENASLA L, TAHRI A, RAHLI M.** « Amélioration de l'influence des variations paramétrique sur les performances de l'UPFC » université de science et de la technologie Oran Algérie, novembre 2012.
- [4] **ESPEL P.** « Analyse de la qualité de l'énergie électrique : mesure du Flicker » laboratoire national de métrologie et d'essais, France, 2009.
- [5] **SEKHANE H.** « Optimisation de la puissance réactive et le contrôle de la tension à travers l'incorporation des dispositifs FACTS », Mémoire de magister, ingénieur d'état en électrotechnique, université de constantine1, promotion 2013.
- [6] **ETXEBERRIA-OTADUI I.** « Evaluation of Different Strategies for Series Voltage Sag Compensation », pp 1797-1802 0-7803-7262-X/02/\$10.00 2002 IEEE.
- [7] **MAMMERI O.** « Différentes méthodes de calcul de la puissance réactive dans un nœud à charge non linéaire en présence d'un système de compensation de l'énergie », Mémoire de Magister en électrotechnique, Université Hadj Lakhder, Batna, 2011-2012.
- [8] **PHIPPS J.K, NELSON J.P, SEN P.K.** «Power Quality and Harmonic Distortion on Distribution Systems», IEEE Transaction on Industrial Application, Vol. 30, N°02, pp. 476-454, March/April 1994.
- [9] **HAMOUDI F.** « **Commande Robuste d'un Filtre Actif Shunt à quatre fils** », Mémoire magister d'ingénieur Électrotechnique, Université de Bejaia, promotion 2008.
- [10] **KALE M, OZDEMIR E.** « An Adaptive Hysteresis Band Current Controller for Shunt Active Power Filter », Electric Power System Research 73, pp. 113-119, 2005.
- [11] **ECRIS L. François C, Lionel P.** « Compatibilité électromagnétique, sous-titre : Problématique des perturbations conduites sous basses fréquences », Un Cours DEA Complet.
- [12] **ALIBI A.** « Contrôle des Réseaux Electriques par les Systèmes FACTS: (Flexible AC Transmission Systems) », Mémoire de Magister, Université Hadj Lakhder de Batna, 2009.
- [13] **LAKDJA F.** « Contrôle des transits de puissance par dispositif FACTS », Mémoire de Magister en commande des processus, Oran, 2005.
- [14] **HAMRI R.** « Contrôle des Puissances Réactives et des Tensions par les Dispositifs FACTS dans un Réseau Electrique », Mémoire de Magister, Ecole Normale Supérieure de L'Enseignement Technologique d'Oran, 2008-2009.
- [15] **FERRACCI Ph.** « La qualité de l'énergie électrique », Cahier technique n°199, Schneider Electric, édition octobre 2001.
- [16] **CHVRIE F, GUELY F.** « La Logique floue » Cahier technique n° 191, Schneider Electric CT 199(e), mars 1998.
- [17] **HAMOUDI F.** « Commande robuste d'un filtre actif shunt à quatre fils », mémoire de magister en électrotechnique, université de Bejaia, 2008.
- [18] **GUENOUNOU O.** « Méthodologie de conception de contrôleurs intelligents par l'approche génétique-application à un bioprocédé », thèse de doctorat en systèmes automatiques, université de Toulouse, promotion 2009.
- [19] **SYLVIE G.** « Contrôle flou : de l'interpolation numérique au codage de l'expertise », habilitation à diriger des recherches en électrotechnique, université de Savoie, promotion décembre 2001.

- [20] **BAGHLI L.** « Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la Logique floue, des réseaux neurones et des algorithmes génétiques », Thèse de doctorat en Génie électrique, université Henri Poincaré, Nancy-I, promotion 1999.
- [21] **DJAABOUB S.** « Logique floue et SMA, aide de la décision floue dans les systèmes multi-agents », Mémoire magister en informatique, Universitaire Mentouri, Constantine 2009.
- [22] **HAMADOU T.** « Commande par logique floue d'un moteur asynchrone double étoile », Mémoire de Master, Université de Bejaia, 2013.
- [23] **AOUZELLAG N-L.** « Contribution à l'Amélioration de la Flexibilité dans les Réseaux Electriques liée à l'Intégration des Générateurs Eoliens », Thèse de doctorat de l'université A.MIRA, Bejaia, 03 Novembre 2011.
- [24] **TALBI A, BENOUDJIT A.** « Le système FACTS » article sur énergie renouvelable et réseaux université de Batna-Algérie, 2009/2010.
- [25] **PASSELERGUE J-C.** « Interactions des dispositifs FACTS dans les grands réseaux électriques », Thèse doctorat de l'institut national polytechnique de Grenoble, 26 novembre 1998.
- [26] **HAMADOU Z.** « Optimisation des paramètres d'un FACTS shunt pour l'amélioration de la stabilité transitoire d'un système électrique », Mémoire magistère de l'université de Sétif 26 juin 2012.
- [27] **BENABID R.** « Optimisation Multi objectif de la Synthèse des FACTS par les Particules en Essaim pour le Contrôle de la Stabilité de Tension des Réseaux Electriques », Mémoire de magister de l'université Amar Telidji, Laghouat, 4 septembre 2007.
- [28] **SEKHANE H.** « L'optimisation de la puissance réactive et le contrôle de tension à travers de l'incorporation des dispositifs FACTS », Mémoire de magister de Constantine 1-Algérie, 2013.
- [29] **HAIMOUR R.** « Contrôle des puissances réactives et des tensions par les dispositifs FACTS dans un réseau électrique », Mémoire Magister ; université Oran, 2008/2009.
- [30] **ABIDI A.** « Flexible AC Transmission systèmes », mémoire Magister ; université de Batna, Juin 2009.
- [31] **MURATE J. P.** « Contrôle de tension Electronique de puissance FACTS », Thèse de Doctorat ; France ; septembre 2006.
- [32] **TANADJAOUI N, BENACHAIBA C, ABDELKHALEK O.** « Compensation des perturbations en tension des réseaux de distribution, DVR (Dynamic Voltage Restorer) multifonctions », Quatrième Conférence sur le Génie Electrique, le 03-04 Novembre 2010, Université de Bechar, Algérie.
- [33] **EZOJI H, SHEIKHOESLAMI A, TABASI M, SAEEDNIA M.** « Simulation of Dynamic Voltage Restorer Using Hysteresis Voltage Control », Computer Engineering Department, Babol University of Technology Shariati Street, Babol, Iran, 2009.
- [34] **JENA A- K, MOHAPATRA B, PRADHAN K.** « Modeling and Simulation of a Dynamic Voltage Restorer », Department of Electrical Engineering National Institute of Technology Rourkela, Odisha -769008.
- [35] **ZIANE-KHODJA A, M. ADLI A et ALKAMA R.** « Apport d'un DVR dans la production d'énergie distribuée », Laboratoire de Génie Electrique de Bejaia – Algérie ; 2012
- [36] **ZIANE-KHODJA A.** « Les systèmes de l'électronique de puissance dédiés aux réseaux d'énergie électrique : impacts sur la qualité et la répartition de l'énergie », Thèse doctorat de l'université A. Mira de Bejaia-Algérie, 2013.

**Liste des figures****Chapitre I : Les Généralités sur les perturbations et moyens d'atténuation**

<b>Figure I.1</b>	Exemple de perturbations du réseau basse tension (BT)
<b>Figure I.2</b>	Creux et coupure de tension
<b>Figure I.3</b>	Exemple de surtension
<b>Figure I.4</b>	Déséquilibre d'amplitude
<b>Figure I.5</b>	Exemple de fluctuation de la tension
<b>Figure I.6</b>	Variation de la fréquence
<b>Figure I.7</b>	Onde déformée et sa décomposition
<b>Figure I.8</b>	Filtre actif shunt
<b>Figure I.9</b>	Filtre actif série
<b>Figure I.10</b>	Combinaison des filtres actifs série-shunt
<b>Figure I.11</b>	Filtre actif série avec filtre passif parallèle
<b>Figure I.12</b>	Filtre hybride composé d'un filtre actif shunt et un filtre passif parallèle
<b>Figure I.13</b>	Filtre actif et passif en parallèle avec la charge
<b>Figure I.14</b>	Schéma de raccordements parallèles (shunts)
<b>Figure I.15</b>	Schéma de raccordement série

**Chapitre II : Notions sur les dispositifs FACTS**

<b>Figure II.1</b>	Ligne de transport à courant alternatif
<b>Figure II.2</b>	Schéma de principe d'un TCSC
<b>Figure II.3</b>	Schéma de principe d'un SSSC.
<b>Figure II.4.</b>	Représentation de Fresnel des modes de compensation du SSSC
<b>Figure II.5</b>	Schéma de la structure d'un DVR
<b>Figure II.6</b>	Structure du SVC
<b>Figure II.7</b>	Structure du STATCOM
<b>Figure II.8</b>	Structure de l'UPFC
<b>Figure II.9</b>	Schéma de principe IPFC
<b>Figure II.10</b>	Schéma équivalent de DVR.
<b>Figure II.11</b>	Schéma équivalent d'une ligne électrique en présence d'un DVR
<b>Figure II.12</b>	Diagramme vectoriel de la compensation de DVR.

### Chapitre III : Notions sur la logique floue

<b>Figure III.1</b>	Variable linguistique.
<b>Figure III.2</b>	Quelques différentes formes de fonction d'appartenance.
<b>Figure III.3</b>	Fonction d'appartenance d'un ensemble flou (petite ou moyenne).
<b>Figure III.4</b>	Fonction d'appartenance d'un ensemble flou (petite et moyenne).
<b>Figure III.5</b>	Fonction d'appartenance d'un ensemble flou (non petite).
<b>Figure III.6</b>	Structure interne d'un système floue
<b>Figure III.7</b>	Schéma d'une boucle de régulation à contrôleur flou
<b>Figure III.8</b>	Défuzzification par la méthode centre gravité.
<b>Figure III.9</b>	Défuzzification par valeur maximum.
<b>Figure III.10</b>	Défuzzification par la méthode des hauteurs pondérées
<b>Figure III.11</b>	Fonction d'appartenance de l'entrée 'e' fonction d'appartenance de l'entrée 'de'
<b>Figure III.12</b>	Fonction d'appartenance de sortie 'dU'

### Chapitre IV : Modélisation et simulation

<b>Figure IV.1</b>	Schéma bloc de l'éolienne
<b>Figure IV.2</b>	Constitution de l'éolienne (sous <i>MATLAB</i> )
<b>Figure IV.3</b>	Schéma bloc d'un réseau soumis à une perturbation.
<b>Figure IV.4</b>	Schéma bloc d'un réseau en présence de DVR
<b>Figure IV.5</b>	Schéma synoptique de commande de DVR
<b>Figure IV.6</b>	schéma bloc de DVR.
<b>Figure IV.7.a</b>	Tension au niveau de la source
<b>Figure IV.7.b</b>	Tension au niveau de charge 3 et GPED
<b>Figure IV.8.a</b>	La tension au niveau la source
<b>Figure IV.8.b</b>	Tension injecté par DVR
<b>Figure IV.8.c</b>	Tension au niveau de GPED
<b>Figure IV.8.d</b>	Tension au niveau de la charge sensible
<b>Figure IV.9.a</b>	Puissance active et réactive à la source
<b>Figure IV.9.b</b>	Puissance active et réactive à la source.
<b>Figure IV.9.c</b>	Puissance active et réactive de GPED.
<b>Figure IV.9.d</b>	Puissance active et réactive de GPED.
<b>Figure IV.10.a</b>	Vitesse d'éolienne
<b>Figure IV.10.b</b>	Vitesse d'éolienne
<b>Figure IV.11.a</b>	Couple résistant
<b>Figure IV.11.b</b>	Couple résistant
<b>Figure IV.12</b>	Signal de commande à la sortie de régulateur flou.
<b>Figure IV.13.a</b>	Tension au niveau de la source
<b>Figure IV.13.b</b>	Tension au niveau de la charge 3 et GPED
<b>Figure IV.14.a</b>	Tension au niveau la source
<b>Figure IV.14.b</b>	Tension injecté par DVR
<b>Figure IV.14.c</b>	Tension au niveau de GPED
<b>Figure IV.14.d</b>	Tension au niveau de la charge sensible
<b>Figure IV.15.a</b>	Puissance active et réactive à la source

## Listes des figures et tableaux

<b>Figure IV.15.b</b>	Puissance active et réactive à la source
<b>Figure IV.15.c</b>	Puissance active et réactive de GPED.
<b>Figure IV.15.d</b>	Puissance active et réactive de GPED.
<b>Figure IV.16.a</b>	Vitesse d'éolienne
<b>Figure IV.16.b</b>	Vitesse d'éolienne
<b>Figure IV.17.a</b>	Couple résistant.
<b>Figure IV.17.b</b>	Couple résistant.
<b>Figure IV.18</b>	Signal de commande à la sortie de régulateur flou.

### Liste des tableaux

<b>Tableau I.1</b>	Récapitulatif des différentes topologies sur les harmoniques.
<b>Tableau I.2</b>	Récapitulatif des différentes topologies de filtres actifs.
<b>Tableau I.3</b>	Récapitulatif des différents types des FACTS
<b>Tableau II.1</b>	Application des FACTS à la résolution des problèmes dans le réseau électrique
<b>Tableau III.1</b>	Désignation standard des ensembles flous
<b>Tableau III.2</b>	Matrice d'inférence
<b>Tableau III.3</b>	Calcul de la variation de sortie 'dU' par la méthode Mamdani

### **Index glossémique**

**FA** (Filtre Actif)

**FAP** (Filtre Actif Parallèle)

**FAS** (Filtre actif série)

**UPQC** (Unified Power Quality Conditionner, ou Combinaison hybride active et passive)

**FACTS** (Flexible Alternative Current Transmission Systems, ou système de transmission Flexible à courant alternatif)

**EPRI** (Electric Power Research Institute, ou Institut pour la recherche sur la tension électrique)

**GTO** (Gate Turn-Off Thyristor, ou Thyristors à Ouverture par Gâchette)

**IGBT** (Transistor bipolaire à grille isolée)

**TCSC** (Thyristor Controlled Series Capacitor, ou compensateur série contrôlé par Thyristor)

**SSSC** (Static Synchrone Séries Compensator, ou compensateur série synchrone statique)

**DVR** (Dynamic Voltage Restorer, ou restaurateur dynamique de tension)

**VSC** (Voltage Source Converter,)

**SVC** (Static Var Compensator, ou Compensateur statique de l'énergie réactive)

**TCR** (thyristor controlled reactor)

**TSC** (thyristor swithed capacitor)

**STATCOM** (Static Synchronous Compensator, ou compensateur Synchrone statique)

**UPFC** (Unified Power Flow Controller, ou Variateur de charge universel)

**IPFC** (Interline Power Flow Controller, ou Contrôleur de flux de puissance d'interligne)

**PCC** (Point d'accouplement commun)

**GPDE** (Groupe Production décentralisé d'énergie)

**MLI** (Modulation de largeur d'impulsion)

**Résumé :** L'électronique de puissance a donné naissance à de nombreuses nouvelles applications, offrant aux clients un confort, une flexibilité et une bonne efficacité. Mais, sa prolifération au cours de la dernière décennie est devenue préoccupante et se trouve à l'origine de plusieurs défauts. Ces derniers se manifestent sous forme de différentes perturbations affectant, un ou plusieurs, paramètres suivants : la fréquence du système, l'amplitude des trois tensions aux points de raccordement, la forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde et enfin la symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leur déphasage relatif. En outre, les tensions perturbatrices dans un réseau électrique sont principalement les surtensions, les creux de tension, les harmoniques et les tensions déséquilibrées. Ces deux dernières sont généralement causées par la circulation des courants harmoniques et/ou déséquilibrés pouvant ainsi causer plusieurs effets néfastes. Le passage de ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peut entraîner des tensions harmoniques aux points de raccordement et alors polluer les consommateurs alimentés par le même réseau électrique. Parmi les effets que peut causer les tensions harmoniques, nous citons: l'échauffement, l'interférence avec les réseaux de télécommunication, les défauts de fonctionnement de certains équipements électriques ainsi que le risque d'excitation de résonance. Quant aux surtensions, ils sont à l'origine de deux types de phénomènes: le premier est dit aléatoire, comme la foudre ou les courts-circuits accidentels, le deuxième est dit intrinsèque et il est dû au fonctionnement d'appareils à charge fluctuante ou à la mise en service d'appareils appelant un courant élevé au démarrage. Les creux de tension sont susceptibles de perturber et dégrader le fonctionnement de certaines installations et pouvant ainsi aller jusqu'à la destruction totale de certains équipements. Mon projet de fin d'étude met en œuvre une approche simple et facile pour contourner, en même temps et à la fois, tous les effets néfastes mentionnés auparavant via l'utilisation et l'implantation d'un compensateur FACTS série appelé DVR. La technique utilisée dans ce projet est sans doute la plus facile à utiliser, la plus flexible, la plus efficace et la plus rentable. Elle a montré une bonne efficacité, un bon fonctionnement et elle a donné de bon résultat pour corriger toutes les perturbations qui peuvent survenir un réseau électrique.

**Abstract:** The electronic power given birth to many new applications, providing customers with comfort, flexibility and good efficiency. But its growth during the past decade has become alarming and is the origin of several defects. These are manifested as different disturbances, one or more, the following parameters: the system frequency, the amplitude voltages of the three connection points, the waveform should be as close as possible to a sine wave and finally the symmetry of the three-phase system, one characterized by equality of modules of the three voltages and their relative phase. In addition, interference voltages in an electrical network are mainly surges, sags, harmonics and unbalanced voltages. These last two are usually caused by the flow of harmonic currents and / or unbalanced and may cause several adverse effects. The portion of the harmonic currents in the electric impedance of the network can cause harmonic voltages at the connection points and pollute then consumers fed by the same electric network. Among the effects that can cause harmonic voltages, we include: heating, interference with telecommunication networks, malfunctions of certain electrical equipment as well as the risk of resonance excitation. As for the surge, they are the source of two types of phenomena: the first is referred to as random as lightning or accidental short circuits, the second is called intrinsic and it is due to the operation of devices or fluctuating load to the development of devices calling a high starting current service. Voltage dips are likely to disrupt and degrade the operation of certain facilities and can thus go up to the total destruction of some equipment. My final project study implements a simple and easy approach to get around the same time and at the same time, all the adverse effects mentioned above through the use and implementation of a series compensator called FACTS DVR. The technique used in this project is probably the easiest to use, more flexible, more efficient and more profitable. She showed a good efficiency, functioning and in particular good results to correct any interference that may occur an electrical network