

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur

Et de la Recherche Scientifique

Université Abderrahmane Mira de Bejaïa

Faculté : Technologie

Département : Génie Electrique

En vue de l'obtention du diplôme Master en Electrotechnique  
Option : Réseaux Electriques

### *Thème*

*Implantation d'un Régulateur Flou  
pour atténuer les Perturbations dans  
les Réseaux Electriques*

Proposé et dirigé par :

- ❖ *M<sup>r</sup>: M.ADLI*
- ❖ *M<sup>r</sup>: A.ZIANE-KHODJA*

Étudié par :

*ABDI Lyes*

Promotion: 2013/2014

## *Remerciements*

*Avant tout, Je remercie **ALLAH** le tout puissant de m' avoir donné force, courage et santé pour atteindre mon but et accomplir mon travail*

*Je voudrais remercier mes proches en commençant tout d'abord par ma **mère** et mon **père**, mes **sœurs**, mes **neveux**, mes **nièces** et mes **beaux frères** pour leur encouragement et leurs aides tout au long de ces années d'études.*

*J'adresse mes vifs remerciements à mes deux encadreur **M' M. Adli** et **M' A. Ziane-Khodja** pour avoir accepté de m'encadrer, pour leurs remarques constructives, de leurs disponibilités et leurs orientations avec professionnalisme et gentillesse.*

*Mes remerciements vont également aux **membres de jury** qui m'ont fait l'honneur d'accepter et m'aider à améliorer ce travail.*

*Une révérence particulière aux **enseignants** qui m'ont initié.*

*Dédicaces*

*Je tiens à dédier ce modeste travail à:*

*A ma mère et mon père*

*A mes sœurs*

*A mes neveux et nièces*

*Mes beaux-frères*

*A mes ami(e)s*

*Sans oublier notre cher et regretté ami Riad*

*A toute la famille ABDI*

*Et à toute la promotion 2013/2014.*

*Table des matières*

*Remerciements*.....I  
*Dédicaces* ..... II  
*Table des matières* .....III  
*Liste des Figures*..... VII  
*Liste des Tableaux*.....XI  
*Liste des symboles*..... X  
*Liste des abréviations* ..... XI  
*Introduction générale*..... 1

**CHAPITRE I**

**I.1. Introduction** ..... 3  
**I.2. Etude des principales perturbations et leurs origines** ..... 3  
    **I.2.1**Qualité de l'énergie électrique..... 3  
    **I.2.2**Les perturbations électriques et leurs origines ..... 3  
        **I.2.2.1** Creux et coupure de tension ..... 3  
        **I.2.2.2** Les surtensions..... 4  
        **I.2.2.3** Fluctuations de tension..... 4  
        **I.2.2.4** Déséquilibre du système triphasé de tension..... 5  
        **I.2.2.5** Variations de la fréquence ..... 5  
        **I.2.2.6** Harmoniques et Inter-harmoniques ..... 6  
    **I.2.3**Les perturbations harmoniques ..... 6  
        **I.2.3.1** Propagation des harmoniques ..... 7  
        **I.2.3.2** Principales sources d'harmoniques ..... 8  
        **I.2.3.3** Caractérisations des harmoniques ..... 8  
    **I.2.4**Normalisation..... 9  
**I.3. Conséquences des perturbations**..... 11  
    **I.3.1**Sur les harmoniques ..... 11  
        **I.3.1.1** Effets instantanés ..... 12

## *Table des matières*

---

I.3.1.2	Effets à termes.....	12
I.3.2	Sur les creux de tension.....	12
I.3.3	Sur les surtensions .....	13
I.3.4	Sur les déséquilibres de tension.....	13
I.4.	Moyens d'atténuation .....	13
I.4.1	Dépollution traditionnelle .....	13
I.4.1.1	Dépollution de courants perturbateurs .....	13
I.4.1.2	Dépollution de tensions perturbatrices.....	15
I.4.2	Dépollution moderne .....	15
I.4.2.1	Filtres actifs : on distingue.....	15
I.4.2.2	Systèmes flexibles de transmission en courant alternatif des (FACTS) .....	18
I.5.	Conclusion.....	20

## CHAPITRE II

II.1.	Introduction .....	21
II.2.	Exploitation des réseaux électriques.....	21
II.2.1.	Chute de tension .....	21
II.2.2.	La puissance transmise d'une ligne électrique .....	22
II.2.3.	Régulation de la tension.....	22
II.3.	Compensation par les dispositifs FACTS .....	23
II.3.1.	C'est quoi un FACTS ? .....	23
II.3.2.	Apports et Avantages des FACTS .....	23
II.3.3.	Compensation d'une ligne électrique avec les dispositifs FACTS .....	23
II.3.3.1.	Compensation shunt .....	23
II.3.3.2.	Compensation série.....	25
II.4.	Structure des principaux dispositifs FACTS.....	26
II.4.1.	Compensateurs shunts .....	26
II.4.1.1.	Compensateurs shunts à base de thyristors (SVC).....	26
II.4.1.2.	Compensateurs shunts à base thyristors GTO (StatCom).....	27
II.4.1.3.	Comparaison des différents dispositifs shunt .....	28
II.4.2.	Compensateurs série .....	28
II.4.2.1	Compensateurs série à base de thyristors (TCSC).....	28

## *Table des matières*

---

II.4.2.2	Compensateurs série à base thyristors GTO (SSSC) .....	29
II.4.2.3	Comparaison des différents dispositifs série .....	29
II.4.3.	Compensateurs hybrides .....	30
II.4.3.1	Compensateurs hybrides à base thyristors .....	30
II.4.3.2	Compensateurs hybrides à base de thyristors GTO.....	30
II.4.4.	Synthèse.....	32
II.5.	Compensation d'une ligne électrique par DVR.....	33
II.5.1.	Description .....	33
II.5.2.	Principe de fonctionnement.....	33
II.5.3.	Effet du DVR sur une ligne électrique .....	36
II.6.	Conclusion.....	36

### CHAPITRE III

III.1.	Historique.....	38
III.2.	Introduction .....	38
III.3.	Avantages et Intérêts d'un Régulateur Flou.....	38
III.3.1.	Avantages .....	38
III.3.2.	Intérêts.....	39
III.4.	Rappels des principes de la logique floue.....	39
III.4.1.	Ensemble flou .....	39
III.4.2.	Variables linguistiques .....	40
III.4.3.	Représentation des fonctions d'appartenance .....	41
III.4.3.2.	Fonction trapézoïdale.....	41
III.4.3.3.	Fonction sinusoïdale .....	42
III.4.3.4.	Fonction gaussienne.....	42
III.4.4.	Operateurs de la logique floue.....	42
III.4.4.3.	Union : .....	42
III.4.4.4.	Intersection : .....	42
III.4.5.	Raisonnement en logique floue.....	42
III.4.6.	Structure générale d'un contrôleur flou.....	43
III.4.6.1.	Stratégie de fuzzification.....	43
III.4.6.2.	Base de données .....	43
III.4.6.3.	Base de règles .....	43

## *Table des matières*

---

III.4.6.4. Logique de prise de décision .....	44
III.4.6.5. Stratégie de defuzzification.....	44
III.4.7. Régulateur flou .....	44
III.4.7.1. La fuzzification des entées .....	44
III.4.7.2. Base des règles et inférence floue .....	45
III.4.7.3. La défuzzification .....	46
III.5. application d'un régulateur flou pour le DVR .....	46
III.6. conclusion.....	48

### CHAPITRE IV

IV.1 Introduction .....	49
IV.2 Présentation du système à simuler.....	49
IV.3 Technologie et principe de fonctionnement .....	50
IV.4 Stratégie de contrôle du DVR .....	50
IV.5 Modélisation du système à étudier.....	53
IV.5.1 Bloc d'identification du courant de référence (BICR).....	53
IV.5.2 Bloc de transformation des courants mesurés (BTCM) .....	54
IV.5.3 Bloc de régulation.....	54
IV.5.4 Onduleur .....	54
IV.6 Simulations et interprétations des résultats.....	54
IV.6.1 Compensation d'un creux de tension triphasé .....	55
IV.6.2 Compensation des surtensions triphasées .....	57
IV.6.3 Compensation d'un déséquilibre des tensions triphasées.....	58
IV.6.4 Compensation d'une variation de fréquence .....	60
IV.6.5 Compensation de plusieurs types de perturbations .....	61
IV.7 Conclusion.....	62
Conclusion générale .....	63
Références Bibliographiques .....	XII

**Liste des Figures**

Figures	Titre
Figure I-1	Creux et coupure de tension
Figure I-2	Surtension
Figure I-3	Fluctuation de tension
Figure I-4	Déséquilibre du système triphasé des tensions
Figure I-5	Variation de fréquence
Figure I-6	Courbe du courant en présence d'harmoniques
Figure I-7-a	Courant absorbé par un redresseur non-commandé
Figure I-7-b	Modélisation d'une charge non-linéaire
Figure I-7-c	Exemple division des harmoniques
Figure I-8-a	Schéma de principe de Steinmetz
Figure I-8-b	Schéma de principe d'un filtre passif résonant
Figure I-8-c	Schéma de principe d'un filtre passif passe haut
Figure I-9-a	Schéma de principe d'un filtre actif shunt
Figure I-9-b	Schéma de principe d'un filtre actif série
Figure I-9-c	Schéma de principe d'un filtre actif combinaison série/shunt
Figure I-10-a	Schéma de principe d'un filtre hybride
Figure I-10-b	Schéma de principe d'un filtre hybride
Figure I-10-c	Schéma de principe d'un filtre hybride
Figure II-1-a	Schéma équivalent d'une ligne électrique simple
Figure II-1-b	Diagramme de Fresnel des tensions d'une ligne non-compensée
Figure II-2-a	Ligne de transmission électrique avec un compensateur shunt idéal
Figure II-2-b	Diagramme des tensions et courant d'un compensateur shunt
Figure II-2-c	Variation de P et Q en fonction de $\delta$ en présence d'un compensateur shunt idéal
Figure II-3-a	Ligne de transmission électrique avec un compensateur série idéal
Figure II-3-b	Diagramme de Fresnel des tensions et courants d'un compensateur série

## *Liste des figures*

Figure II-3-c	Variation de P et Q en fonction de $\delta$ pour différentes valeurs de K en présence d'un compensateur série idéal
Figure II-4-a	Schéma équivalent d'un SVC
Figure II-4-b	Schéma équivalent d'un StatCom
Figure II-5-a	Schéma équivalent d'un TCSC
Figure II-5-b	Schéma équivalent d'un SSSC
Figure II-6-a	Schéma équivalent d'un TCPAR
Figure II-6-b	Schéma équivalent d'un UPFC
Figure II-6-c	Schéma équivalent d'un IPFC
Figure II-7-a	Structure de base d'un SSSC couplé au réseau
Figure II-7-b	SSSC (Static Synchronous Serie Compensator)
Figure II-7-c	Schéma équivalent d'un SSSC connecté à un réseau simple
Figure II-7-d	Diagramme de phase des différents modes de fonctionnement du SSSC
Figure II-7-e	Caractéristique statique du SSSC
Figure III-1-a	Représentation des tailles d'un groupe d'individus par logique classique
Figure III-1-b	Représentation des tailles d'un groupe d'individus par logique floue
Figure III-2-a	Représentation d'un terme linguistique
Figure III-2-b	Différent types des fonctions d'appartenance
Figure III-3-a	Structure générale d'un système basé sur la commande floue
Figure III-3-b	Structure d'un bloc d'une boucle de régulation à contrôleur flou
Figure III-4-a	Fuzzification continue avec sept fonction d'appartenance
Figure III-4-b	La défuzzification par les différentes méthodes
Figure III-5-a	Fonction d'appartenance de l'entrée 'e'
Figure III-5-b	Fonction d'appartenance de l'entrée 'de'
Figure III-5-c	Fonction d'appartenance de la sortie 'dU'
Figure IV-1	Schéma du réseau équipé d'un dispositif FACTS série-DVR-
Figure IV-2	Schéma équivalent du système à étudié
Figure IV-3	Schéma de l'algorithme du DVR utilisé
Figure IV-4	Bloc diagramme de l'algorithme de commande de l'onduleur
Figure IV-5-a	Tension aux bornes de la source perturbée (creux de tension)
Figure IV-5-b	Tension aux bornes de la charge sensible au creux de tension
Figure IV-5-c	Tension injectée par le DVR pour la compensation d'un creux de tension
Figure IV-6-a	Tension aux bornes de la source perturbée (surtension)
Figure IV-6-b	Tension aux bornes de la charge sensible aux surtensions
Figure IV-6-c	Tension injectée par le DVR pour la compensation de surtension
Figure IV-7-a	Tension aux bornes de la source perturbée (variation de fréquence)
Figure IV-7-b	Tension aux bornes de la charge sensible aux variations de fréquences
Figure IV-7-c	Tension injectée par le DVR pour la compensation des variations de fréquence
Figure IV-8-a	Tension aux bornes de la source perturbée (déséquilibre de phase)
Figure IV-8-b	Tension aux bornes de la charge sensible au déséquilibre
Figure IV-8-c	Tension injectée par le DVR pour la compensation du déséquilibre
Figure IV-9-a	Tension aux bornes de la source perturbée (plusieurs perturbations)
Figure IV-9-b	Tension aux bornes de la charge sensible a plusieurs types de perturbations

***Liste des Tableaux***

Tableau I-1	Limites de CIE 61000-2-3 pour les émissions des courants harmoniques
Tableau I-2	Limites de CIE 61000-2-4 pour le taux de distorsion harmoniques en tensions et en courants
Tableau I-3	Organigramme des dispositifs FACTS
Tableau II-1	Valeurs normalisées de la norme EN50160 en tension et en fréquence
Tableau II-2	Application des FACTS à la résolution des problèmes dans les réseaux électriques
Tableau III-1	Exemple de calcul de la variation de commande $\Delta U$
Tableau III-2	La table de décision du régulateur appliquée au DVR
Tableau IV-1	Paramètres de la source générant un creux de tension
Tableau IV-2	Paramètres de la source générant de surtensions
Tableau IV-3	Paramètres de la source générant des variations de fréquence
Tableau IV-4	Paramètres de la source en causant un déséquilibre de phase
Tableau IV-5	Paramètres de la source de plusieurs perturbations

### Liste des symboles

A : Ampère ;  
C : Capacité ;  
D : Puissance déformante ;  
e : Erreur ;  
f : Fréquence ;  
F<sub>p</sub> : Facteur de puissance ;  
Hz : Hertz ;  
I<sub>eff</sub> : Courant efficace ;  
k : Facteur de compensation ;  
L : Inductance de la ligne ;  
n : Rang de l'harmoniques ;  
P : Puissance active ;  
P<sub>tr</sub> : Puissance transmise ;  
Q : Puissance réactive ;  
R : Résistance de la ligne ;  
S : Puissance apparente ;  
U : Tension composée ;  
U<sub>dc</sub> : Tension continue ;  
V : Volt ;  
V<sub>s</sub> : Tension de la source ;  
V<sub>r</sub> : tension du récepteur ;  
V<sub>se</sub>, I<sub>se</sub>, X<sub>se</sub> : Tension, courant et réactance du compensateur série respectivement ;  
V<sub>sh</sub>, I<sub>sh</sub>, X<sub>sh</sub> : Tension, courant et réactance du compensateur shunt respectivement ;  
X : Réactance de la ligne ;  
X<sub>TCSC</sub> : Réactance du TCSC ;  
Y : Admittance capacitive ;  
Z : Impédance de la ligne ;  
 $\alpha$  : Angle d'amorçage ;  
 $\beta$  : Argument de l'impédance de la ligne ;  
 $\Delta U$  : Chute de tension ;  
 $\Delta t$  : Variation de temps ;  
 $\omega$  : Pulsation du courant ;  
 $\omega_n$  : Pulsation du courant harmonique ;  
 $\varphi$  : Déphasage tension-courant ;  
 $\delta$  : Angle de transport ;  
 $\Delta U_T$  : Chute de tension transversale ;  
 $\Delta U_L$  : Chute de tension longitudinale.

## Liste des abréviations

AC : Tension alternatif ;  
B.T : Basse tension ;  
CEI : Commission Electrotechnique International ;  
DC : tension continue ;  
DVR : Dynamic Voltage Resistor ;  
FACTS : Flexible Alternating Current Transmission Systems ;  
F.A.P : Filtre Actif Parallèle ;  
F.A.S : Filtre Actif Série ;  
H.T : Haute tension ;  
HTA : Haute tension classe A ;  
HTB : Haute tension classe B ;  
IAS : Industriel Application Society ;  
IEEE : Institue of Electrical and Electronics Engineers ;  
IGBT : Insulated Gate Bipolar Thyristor ;  
IGCT : Insulated Gate Commutated Thyristor ;  
IPFC : Interline Power Flow Controller ;  
GTO : Gate Turn-Off thyristor ;  
MLI : Modulation Larger Impulsion ;  
M.T : Moyenne tension ;  
PCC : point de raccordement commun avec la charge ;  
PES : Power Engineering Society ;  
PLL : Phase Looched Loop ;  
SCC-22 : Standard Coordinating Commitie and Power Quality ;  
SSSC : Static Synchronous Serie Compensator ;  
StatCom : Static Compensator ;  
SVC : Static Voltage Compensator ;  
THD<sub>h</sub> : Taux de distorsion harmoniques individuel ;  
THD<sub>T</sub> : taux de distorsion harmoniques global ;  
THT : Très haute tension ;  
TCPAR : Thyristor Controlled Phase Angle Regulator ;  
TCR : Thyristor Controlled reactor ;  
TSC : Thyristor Switched Capacitor ;  
TCSC : Thyristor Controlled Serie Capacitor ;  
UPFC : Unified power Flow Controller ;  
UPQC : Unified Power Quality Conditionner ;

# **INTRODUCTION GENERALE**

### Introduction générale

La consommation de l'énergie électrique est en hausse progressive et cette tendance s'accroît avec l'industrialisation et la croissance de la population. De plus, on vit aujourd'hui dans l'ère de l'électronique et de l'informatique et toutes ces charges sont sensibles aux perturbations qui surviennent sur leurs alimentations. On se retrouve devant des consommateurs qui deviennent de plus en plus exigeants, en voulant plus d'énergie et une meilleure qualité. Les entreprises de production de l'énergie électrique doivent donc répondre à cette demande, à travers les réseaux maillés et interconnectés afin de prouver une fiabilité dans leurs services et atteindre l'égalité « production = consommation » à chaque instant [1]. Jusqu'à un passé récent, la qualité de l'énergie électrique n'était pas encore sérieusement affectée ; ainsi, seule la continuité de service représentait le souci majeur des partenaires « producteurs – distributeurs – consommateurs », de ce fait, le potentiel de la qualité de l'énergie électrique ne sera pas exploité.

Aujourd'hui, il est certain que la plupart des récepteurs dans l'industrie, tertiaires et domestiques sont des charges déformantes (non linéaires) ; la qualité de l'énergie électrique se trouve incontestablement soumise à une dégradation.

Jusqu'à la fin des années 80, les seuls moyens permettant de remplir ces fonctions étaient des dispositifs électromécaniques tels que : les transformateurs avec régulateurs en charge, les groupes électrogènes, les bobines d'inductances et les condensateurs commutés avec disjoncteur pour le maintien de la tension et la gestion du réactif. Toutefois, des problèmes d'usure et leurs temps de réponse très longs, ne permettent pas de les actionner plus de quelques fois par jour ; ils sont, par conséquent, difficilement utilisables pour un contrôle continu du flux de puissance.

Le développement rapide des composants de l'électronique de puissance a été d'un apport considérable dans l'amélioration des conditions de fonctionnement des réseaux électriques en améliorant nettement les performances et le contrôle de leurs paramètres par l'introduction de ces nouvelles topologies à base des composants de l'électronique de puissance très avancés (GTO et IGBT) connus sous l'acronyme FACTS « Flexible Alternative Current Transmission Systems ». De cette combinaison entre les convertisseurs statiques et leurs algorithmes adéquats de commande, sont conçus les différents types de compensateurs FACTS (série, shunt et hybrides) utilisés dans le domaine de la qualité de l'énergie électrique dans les réseaux de distribution. L'apport de cette technologie FACTS pour les compagnies d'électricité est d'ouvrir de nouvelles perspectives pour le contrôle du flux de puissance dans les réseaux et d'augmenter la capacité de transfert des lignes existantes semblables à des extensions de ces dernières. Ces apports, résultent de l'habileté de ces dispositifs FACTS de contrôler les paramètres qui gouvernent sur l'opération de transport (Impédance, Tension et Angle de transport).

La nouvelle génération de dispositifs FACTS est constituée principalement par des convertisseurs de tension (ou de courant) à base d'interrupteurs statiques modernes commandés à l'ouverture et à la fermeture, liés à des condensateurs comme source de tension continue. Ces convertisseurs selon leurs modes de connexion sont distingués en compensateur série, shunt et hybrides tels que : SSSC (DVR), StatCom, UPFC et IPFC respectivement.

## Introduction Générale

---

L'objectif de ce travail est d'utiliser les fonctions offertes par le DVR dans la qualité de l'énergie électrique (compensation des perturbations survenant dans un réseau électrique) commandé par la méthode heuristique, déjà imposée dans plusieurs domaines tels que la médecine, le traitement de signal, robotique, ...etc, dite logique floue.

Afin de bien atteindre les objectifs de ce mémoire, nous le subdivisons en quatre (04) chapitres :

- Le premier chapitre, sera consacré à la présentation des différents types de perturbations, leurs origines, conséquences sur les équipements et machines industrielles ainsi que les moyens d'atténuation tels que : la dépollution traditionnelle et moderne.
- Dans le deuxième chapitre, nous traiterons la compensation par les nouvelles topologies des compensateurs basées sur les composants de l'électronique de puissance dits « FACTS ».
- Le troisième chapitre sera dédié à la régulation par logique floue dans lequel, on présentera une introduction de la logique floue puis son application pour la régulation de la tension d'une charge par un DVR.
- Le dernier chapitre constitue la modélisation du DVR et simulation sous l'environnement Matlab/Simulink.
- Une conclusion générale clôturera ce mémoire.

# CHAPITRE I

## I.1. Introduction

L'objectif fondamental des réseaux électriques est de fournir aux clients (industriels ou particuliers) de l'énergie électrique avec une parfaite continuité, sous une forme de tension sinusoïdale, avec des valeurs d'amplitude et de fréquence préétablies. Cependant, cet objectif semble idéal et n'est jamais facile à assurer car le réseau électrique aujourd'hui est appelé à fonctionner sous un environnement de plus en plus agressif et, par conséquent, il doit faire face à de nombreux types de perturbations qui peuvent être d'origine interne comme l'évolution et la complexité du réseau et des charges qui lui sont connectées ou externe liée aux phénomènes de changements climatiques.

Afin d'éviter le dysfonctionnement voire la destruction des éléments du réseau électrique ou des récepteurs, il est indispensable de comprendre l'origine des perturbations et chercher les solutions adéquates pour les atténuer.

Nous débuterons ce chapitre par un exposé d'un état d'art des perturbations affectant la qualité de l'énergie électrique et leurs origines ; dans la deuxième partie, nous traiterons les conséquences de ces perturbations et les normes en vigueur. Enfin, nous discuterons les solutions envisagées pour pallier à ces problèmes.

## I.2. Etude des principales perturbations et leurs origines

### I.2.1 Qualité de l'énergie électrique

La qualité de l'énergie électrique est étroitement liée à la qualité de tension laquelle est caractérisée par les paramètres suivants :

- Forme d'onde parfaitement sinusoïdale : absence de distorsions, pics et de creux ;
- Equilibre et symétrie parfaite des tensions en amplitudes et en phases ;
- Valeur efficace dans les limites tolérées ;
- Stabilité de la fréquence ;
- Facteur de puissance dans les limites tolérées [2].

### I.2.2 Les perturbations électriques et leurs origines

Les perturbations électriques affectant l'un des paramètres cités précédemment peuvent se manifester par : un creux ou coupure de tension, une surtension, une fluctuation de tension, un déséquilibre du système triphasé de tension, une variation de la fréquence et présence d'harmoniques et inter-harmoniques.

#### I.2.2.1 Creux et coupure de tension

Un creux de tension est une diminution brutale de la tension à une valeur située entre 10% et 90% de la tension nominale pendant une durée allant de 10 ms à une minute, il est caractérisé par sa profondeur  $\Delta U$  et sa durée  $\Delta t$ . Par ailleurs, on peut noter :

- Une coupure brève n'est qu'un cas particulier de creux de tension, sa profondeur est supérieure à 90% et sa durée entre une minute et trois minutes ;
- Une coupure longue est de durée supérieure à 3 minutes. La figure I-1 montre un creux et une coupure de tension. [3]

Les creux de tensions peuvent être la conséquence du démarrage de gros moteurs ou l'enclenchement de condensateurs mais la majorité d'entre eux est due aux défauts d'isolement et les courts-circuits qui apparaissent sur le réseau de transport (HTB) ou les réseaux de distribution (BT ou HTA).

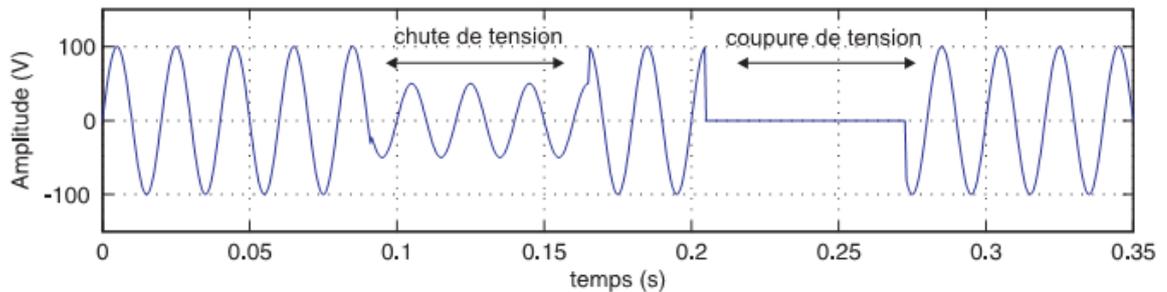


Figure I-1- Creux et coupure de tension

### I.2.2.2 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-2. Elles peuvent apparaître :

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

Les surtensions peuvent être, principalement, d'origines externes (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) [3].

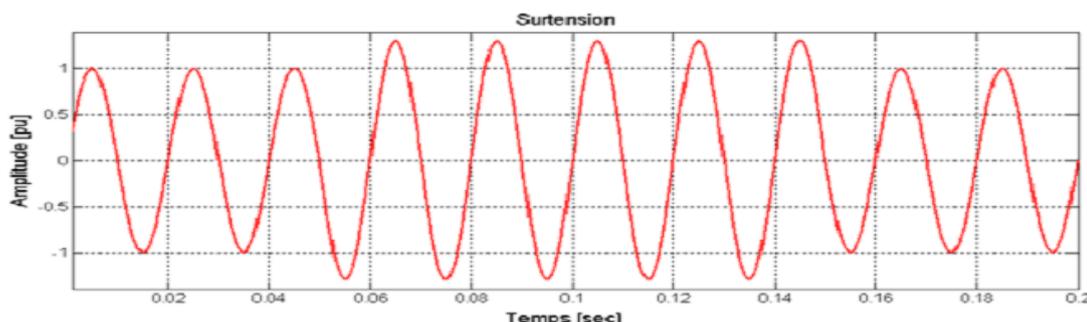


Figure I-2- Exemple de surtension

### I.2.2.3 Fluctuations de tension

Les fluctuations de tension sont des variations en basse fréquence de la valeur efficace de la tension comme le montre la figure I-3. Ces variations sont généralement inférieures à 10% de la valeur nominale sur un intervalle de temps de quelques centièmes de seconde, elles peuvent être périodiques ou aléatoires. Elles sont provoquées généralement par la variation rapide de la puissance absorbée ou produite telles que : les soudeuses, fours-à-arc, éoliennes,...etc [4].

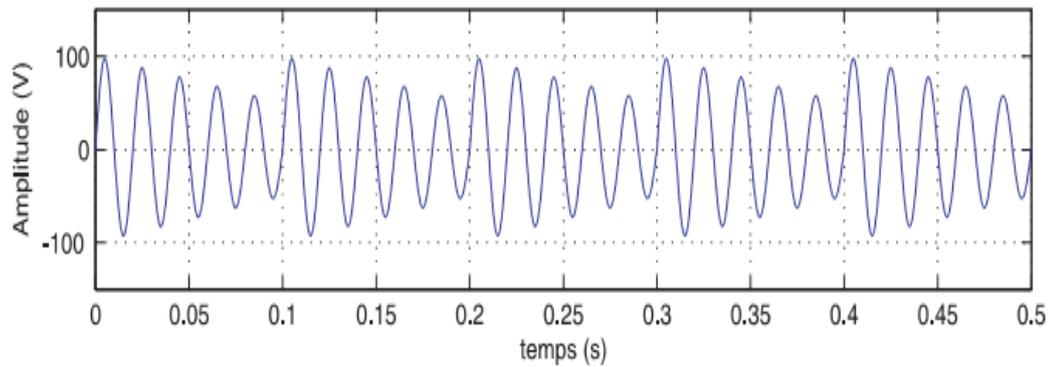


Figure I-3- Exemple de fluctuation de la tension

### I.2.2.4 Déséquilibre du système triphasé de tension

On dit qu'il y a un déséquilibre dans un réseau électrique lorsqu'on enregistre, en régime permanent, une inégalité en amplitude et /ou ne sont pas déphasées les unes par rapport aux autres de  $\pm 120^\circ$  comme le montre la figure I-4.

Le déséquilibre du système triphasé de tension est essentiellement dû aux charges monophasées ou déséquilibrées, des courts-circuits monophasés ou biphasés, ils se manifestent par des perturbations dans les machines tournantes, échauffements...etc [3].

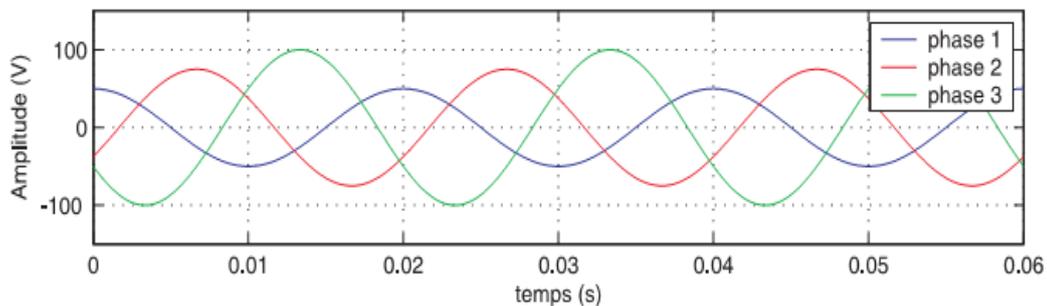


Figure I-4- Déséquilibre d'amplitude et de phase

### I.2.2.5 Variations de la fréquence

Une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur le réseau des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome figure I-5. Au niveau des réseaux de distribution et de transport, cette variation de fréquence est très rare et ne se présente que lors des circonstances exceptionnelles, comme le cas de certains défauts graves sur le réseau. Dans les conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence doit être comprise dans l'intervalle  $50 \text{ Hz} \pm 1\%$  [2].

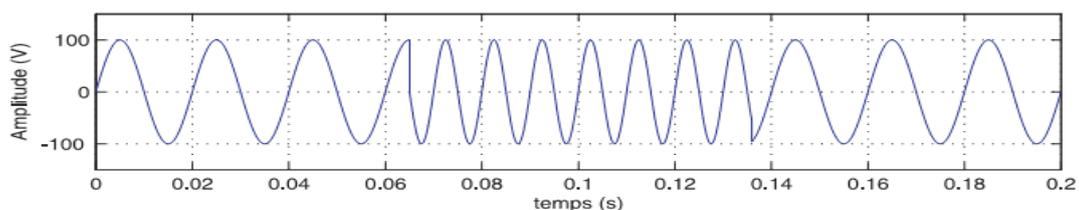


Figure I-5- Variations de la fréquence

### I.2.2.6 Harmoniques et Inter-harmoniques

#### 1. Les harmoniques

Ils découlent d'une superposition sur l'onde fondamentale à 50 Hz ou 60Hz d'ondes également sinusoïdales, mais de fréquences multiples entières de celle du fondamentale. La figure I-6 montre la superposition de l'harmonique d'ordre 3 sur un courant fondamental de fréquence 50 Hz.

La principale source de la présence des harmoniques dans le réseau électrique est l'utilisation d'équipements de l'électronique de puissance à base des thyristors [5].

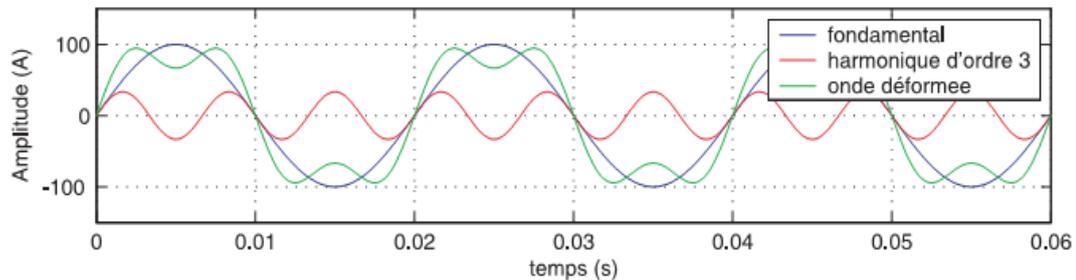


Figure I-6- Onde déformée et sa décomposition

#### 2. Les inter-harmoniques

Sont superposés à l'onde fondamentale, mais ne sont pas des multiples entières de la fréquence fondamentale du réseau. Leurs origines principales sont les convertisseurs de fréquences, variateurs de vitesse. Généralement, ils apparaissent dans le cas du phénomène transitoire ou de l'émission des fréquences de tél-commande (175Hz et 188Hz). [5]

### I.2.3 Les perturbations harmoniques

Cette famille de perturbations est à l'origine une conséquence des systèmes d'électronique de puissance dans les équipements industriels (redresseurs, variateurs de vitesse,...etc), dans la transmission et la compensation d'énergie (HDVC, StatCom,...etc) et même dans nos besoins domestiques.

En effet, la grande majorité des charges est connectée au réseau de distribution à travers ces systèmes. Ces charges sont connues sous le nom de charges non linéaires, absorbant des courants non sinusoïdaux. La figure I-7-a montre l'allure du courant absorbé par une charge non linéaire (redresseur non-commandé) [5].

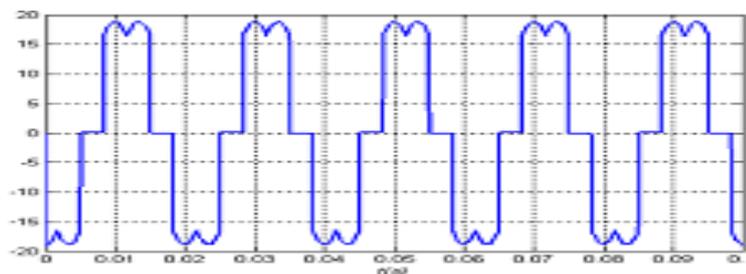
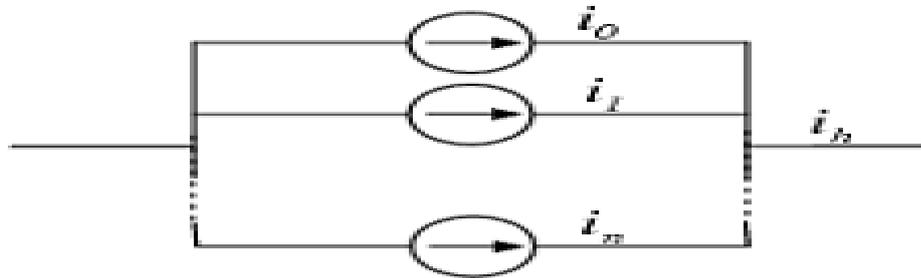


Figure I-7-a Courant absorbé par un redresseur non commandé

La décomposition en série de Fourier du courant absorbé par une charge non linéaire, peut modéliser cette dernière comme l'addition de plusieurs sources de courants mises en parallèle comme l'illustre la figure I-7-b.

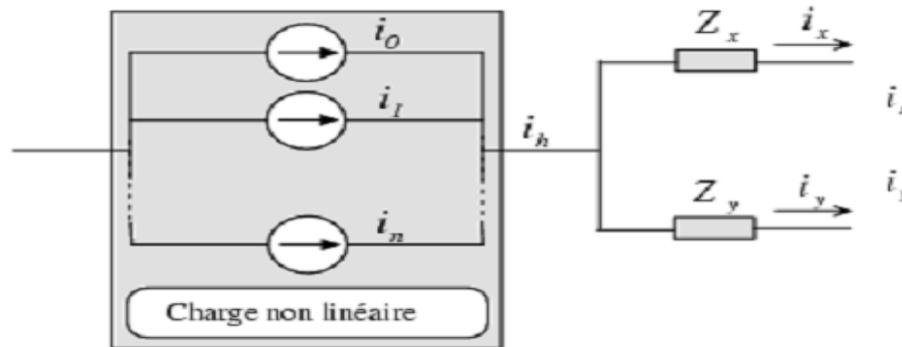


**Figure I-7-b Modélisation d'une charge non linéaire**

$$I_h(t) = i_0(t) + i_1(t) + i_2(t) + \dots + i_n(t) = I_0 + I_1 \cos(\omega_1 t + \phi_1) + I_2 \cos(\omega_2 t + \phi_2) + \dots + I_n \cos(\omega_n t + \phi_n) \dots \dots \dots (I-1)$$

**I.2.3.1 Propagation des harmoniques**

Les harmoniques sont dans la plupart des cas d'origine de courant, mais ces harmoniques, une fois injectés par les charges non linéaires, se propagent à travers le réseau suivant la loi du diviseur de courant comme illustré sur la figure I-7-c.



**Figure I-7-c Exemple de divisions des harmoniques.**

$$i_x = \frac{Z_y}{Z_x + Z_y} i_h \dots \dots \dots (I-2)$$

et

$$i_y = \frac{Z_x}{Z_x + Z_y} i_h \dots \dots \dots (I-3)$$

Sachant que le courant et la tension sont couplés à travers la notion d'impédance, alors, il se trouve que la tension est affectée à son tour par les distorsions harmoniques plus au moins sévères selon l'impédance du réseau.

$$V_h = z i_h \Leftrightarrow i_h = \frac{V_h}{z} \dots \dots \dots (I-4)$$

$V_h$ : Tensions harmoniques;  $i_h$ : courant harmonique ;  $z$  : charge polluante.

### I.2.3.2 Principales sources d'harmoniques

Les principales sources d'harmoniques sont les dispositifs contenant des éléments qui commutent (convertisseurs statiques) et les dispositifs à caractéristiques tension-courant non linéaires (fours-à-arc, inductance saturée, transformateur, machine tournante,...etc).

#### 1. Convertisseurs statiques

Les convertisseurs statiques sont les sources d'harmoniques les plus gênantes du fait du nombre et de la puissance des dispositifs installés.

- a. **Les redresseurs monophasés et triphasés** génèrent des harmoniques qui dépendent sensiblement de la commande adoptée. Un redresseur commandé en pleine onde de  $p$  pulsations engendre, du côté continu, des harmoniques de rangs  $n$  ( $n=1,2,\dots$ ), et du côté alternatif, des harmoniques de rangs  $n \pm 1$ .
  - b. **Les cycloconvertisseurs** utilisés pour régler la vitesse des moteurs à courant alternatif, ils génèrent des spectres complexes, généralement riches en fréquence et dépendent de leurs structures et leurs commandes.
  - c. **Les gradateurs** utilisés dans les entraînements de faible puissance, les systèmes d'éclairages, de chauffage et les systèmes de conduite des réseaux [2].
- #### 2. Dispositifs à caractéristique tension-courant non linéaire

- a. **Fours-à-arc** sont connectés directement au réseau de transmission, généralement sans recours à un filtrage adéquat. Leurs impédances varient de manière aléatoire et de surcroît, elles sont particulièrement asymétriques. Par ailleurs ils génèrent des harmoniques de toutes les fréquences.
- b. **Les inductances saturées** de telles inductances ont leurs impédances fonction de l'amplitude du courant qui les traverse et de ce fait, provoquent par contre-réaction des déformations notables de ce courant.
- c. **Les transformateurs** à cause de leurs caractéristiques tension-courant non linéaire, les transformateurs génèrent des harmoniques qui dépendent sensiblement de l'amplitude et de la forme de la tension d'alimentation.
- d. **Les machines tournantes** elles engendrent des harmoniques d'amplitudes souvent négligeables. Les petites machines synchrones sont toutefois génératrices de tension harmonique du rang 3 [2].

### I.2.3.3 Caractérisations des harmoniques

Différentes grandeurs sont définies pour caractériser la distorsion en régime déformé. Le *taux de distorsions harmoniques global* et le *facteur de puissance* sont les plus employés pour quantifier respectivement les perturbations harmoniques et la consommation de puissance réactive [6], [7], [11].

#### 1. Le taux de distorsion individuel

$$\text{THD}_n = \frac{Y_n}{Y_1} \dots \dots \dots (I-5)$$

### 2. La valeur efficace du courant

$$Y_{e f f} = \sqrt{Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 + \dots + Y_n^2} \dots\dots\dots (I-6)$$

THD<sub>h</sub> : Taux de distorsion harmoniques.

Y<sub>1</sub> : La valeur efficace du courant (tension) fondamental.

Y<sub>n</sub> : La valeur efficace de la composante du courant (tension) harmonique (n étant le rang).

### 3. Le taux de distorsion harmonique global

Notre étude se limite au cas où la source de tension est sinusoïdale et où le courant absorbé par la charge est affecté de composantes harmoniques, dans ces conditions, le taux global de distorsions harmoniques est bien adapté pour quantifier le degré de pollution harmonique sur les réseaux électriques. Le **THD<sub>T</sub>** s'exprime par rapport à la fréquence fondamentale et caractérise l'influence des harmoniques sur l'onde de courant déformée. Il est donné par l'expression suivante :

$$THD_T = \frac{\sum_{n=2}^n \sqrt{Y_n^2}}{Y_1} \dots\dots\dots (I-7)$$

Y<sub>n</sub> : valeur efficace des courants ou tensions harmoniques.

Y<sub>1</sub> : valeur efficace du courant ou tension fondamentale.

2 ≤ n ≤ 40.

### 4. Le facteur de puissance

En présence des harmoniques, la puissance apparente S est composée de trois parties : active P, réactive Q et déformante D.

La puissance réactive Q est associée au courant fondamental et la déformante D est due aux harmoniques de courant avec :

$$D = 3.V \sqrt{I_{e f f}^2 - I_1^2} \dots\dots\dots (I-8)$$

Pour un signal sinusoïdal, le facteur de puissance **F<sub>p</sub>** est égal au quotient de la puissance active P par la puissance apparente S.

$$F_p = \frac{P}{S} \dots\dots\dots (I-9)$$

#### 1.2.4 Normalisation

Les normes, d'après la définition de l'**ISO**, sont « des accords documentés contenant des spécifications techniques ou autres critères précis destinés à être utilisés systématiquement en tant que règles, lignes directrices ou définitions de caractéristiques pour s'assurer que les matériaux, produits, processus et services sont aptes à l'emploi » en ce qui concerne la qualité de l'énergie, les normes ont un double objectif.

- Etablir la définition des caractéristiques nominales de la fourniture, c'est-à-dire les valeurs nominales comme les déviations admissibles de la tension et de la fréquence ;
- Définir les perturbations qui peuvent agir sur le réseau (par exemple le seuil qui sépare un creux de tension d'une interruption etc.), comme la quantité ou l'intensité maximale de perturbations pouvant avoir lieu dans un réseau particulier.

Les normes, de manière générale, donnent une définition assez précise des caractéristiques de la fourniture (tension et fréquence nominales, déviation admissible etc.), mais les limites des perturbations restent assez floues. D'ailleurs, les différents organismes de normalisation n'ont pas toujours la même vision sur la notion de qualité.

- **Qualité de l'énergie et la compatibilité électromagnétique**

Les deux principaux organismes de normalisation internationaux dans le domaine électrotechnique sont la **CEI** (Commission Electrotechnique Internationale) et l'**IEEE** (Institute of Electricals and Electronics Engineers). La CEI est un organisme officiel composé des comités nationaux de 63 pays (le représentant de la France est **UTE**, Union technique de l'Electricité et de la communication), tandis que l'**IEEE** est une association professionnelle avec plus de 377.000 membres appartenant à 150 pays, partagés en différentes régions et sections.

Ces deux organismes réalisent la principale activité de normalisation dans le domaine des perturbations électriques au niveau mondial mais n'ont pas une uniformité de critères en ce qui concerne la définition des interactions entre le réseau et les charges connectées.

Aujourd'hui, le terme le plus répandu dans les domaines scientifique et industriel, accepté et utilisé par l'**IEEE**, est celui de « qualité de l'énergie ». Ce concept détermine les paramètres qui définissent les propriétés du produit électricité dans les conditions normales, en termes de continuité de la fourniture et des caractéristiques de la tension (*symétrie, fréquence, amplitude et forme d'onde*). Par conséquent, cette vision essaie de déterminer les caractéristiques de la fourniture électrique afin de limiter son influence sur les différentes charges connectées au réseau et en même temps de limiter l'influence des charges sur le réseau de façon à éviter la modification de ses caractéristiques.

Deux sociétés de l'**IEEE** travaillent dans des domaines liés à la qualité de l'énergie, **IAS** (Industrial Applications Society) et **PES** (Power Engineering Society). Leurs activités de normalisation sont gérées par le comité **SCC-22** (Standards Coordinating Committee on Power Quality). Les deux normes de qualité principales de l'**IEEE** sont :

- ✓ **IEEE 519:1992**, Recommended Practices and Requirements for Harmonics Control in power systems. Cette norme détermine la procédure pour contrôler les harmoniques présents sur le réseau électrique ainsi que les limites recommandées de la pollution harmonique générée par les clients et de distorsion harmonique total sur le réseau.
- ✓ **IEEE 1159:1995**, IEEE Recommended Practice on Monitoring Electric Power Quality. Cette norme réalise un bilan exhaustif et donne une définition de tous les phénomènes électromagnétiques qui ont lieu dans le réseau en fonction de leurs contenus spectraux, leurs durées et leurs amplitudes.

### Normes concernant les perturbations harmoniques

Les normes **CEI** établissent des limites pour les émissions de courants harmoniques (**IEC 61000-3-2**, **IEC 61000-3-4** et **6100-3-6**) et en même temps établissent le niveau de compatibilité (**IEC 61000-2-4** et **IEC61000-2-2**) qui détermine le taux de distorsion harmonique de la tension de référence du réseau donné sur le tableau I-1, tableau I-2 respectivement [7].

Harmoniques impairs		Harmoniques pairs	
ordre	Courant (A)	ordre	Courant (A)
3	2.3	2	1.08
5	1.44	4	0.43
7	0.77	6	0.3
9	0.4		
11	0.33		
13	0.21		
$15 \leq h \leq 39$	0.15 -15/h		

**Tableau I-1 Limites de CIE 61000-3-2 des émissions des courants harmoniques**

Harmoniques impairs						Harmoniques pairs		
Non multiples de 3			Multiples de 3					
Ordres	a)	b)	Ordre	a)	b)	Ordre	a)	b)
5	2%	6%	3	2%	5%	2	1,5%	2%
7	2%	5%	9	1%	1,5%	4	1%	1%
11	1.5%	3,5%	15	0,3%	0,3%	6	0,5%	0,5%
13	1.5%	3%	21	0,2%	0,2%	8	0,2%	0,5%
17	1%	2%	$\geq 21$	0,2%	0,2%	10	0,2%	0,5%
19	1%	1,5%				12	0,2%	0,2%
23	0.7%	1,5%				$\geq 12$	0,2%	0,2%
25	0.7%	1,5%						
$\geq 25$	$0.2+(12.5/h)$	$0.2+(1,3.25/h)$						

**Tableau I-2 Limites de CIE61000-2-4 pour le taux de distorsion en courant et tension**

a)  $100 \text{ kV} \geq V \geq 30 \text{ kV}$  ( $THD < 3\%$ )

b)  $30 \text{ kV} \geq V \geq 1 \text{ kV}$  ( $THD < 8\%$ )

### I.3. Conséquences des perturbations

#### I.3.1 Sur les harmoniques

Les courants harmoniques se propagent dans le réseau électrique, déforment l'allure du courant de la source et polluent les convertisseurs alimentés par ce même réseau. Ils peuvent occasionner des incidents au niveau de l'appareillage du client et donner lieu à des surcoûts de production d'énergie importants, on peut les classer en deux types d'effets :

### I.3.1.1 Effets instantanés

Les effets instantanés apparaissent immédiatement dans certains appareillages :

1. **Défaut de fonctionnement de certains équipements électriques** en présence d'harmoniques ; la tension et le courant peuvent changer de signes plusieurs fois dans une demi-période. Les appareils dont le fonctionnement est basé par le passage à zéro des grandeurs électriques peuvent être affectés.
2. **Troubles fonctionnelles** les effets sur ces équipements peuvent se manifester par la dégradation de la qualité de l'image et des couples pulsatifs du moteur d'entraînement (micro-ordinateur, téléviseur,...etc).
3. **Erreurs dans les appareils de mesures** certains appareils de mesure et les compteurs d'énergie à induction présentent des dégradations de mesure et des erreurs de lectures supplémentaires en présence d'harmoniques.
4. **Vibrations et bruits** les courants harmoniques génèrent des vibrations et des bruits acoustiques, particulièrement dans les appareils électromagnétiques (transformateurs, inductances et machines tournantes) [5], [8].
5. Destruction par surcharge thermique des condensateurs

### I.3.1.2 Effets à termes

Ils se manifestent après une exposition plus ou moins longue à la perturbation harmonique. L'effet à termes le plus important est de nature thermique, il se traduit par l'échauffement. Il conduit à une fatigue mécanique prématurée du matériel, des lignes et amènent un déclassement des équipements.

1. **Echauffement des câbles et des équipements** ces effets peuvent être à moyen terme (quelques secondes à quelques heures) ou à long terme (quelques heures à quelques années) et concernent les câbles qui peuvent être le siège de suréchauffement du neutre et les matériels bobinés (transformateurs ou moteurs).
2. **Echauffement des condensateurs** l'échauffement est causé par les pertes dues au phénomène d'hystérésis dans le diélectrique, les condensateurs sont donc sensibles aux surcharges, qu'elles soient dues à une tension fondamentale trop élevée ou à la présence d'harmoniques. Ces échauffements peuvent conduire au claquage.
3. Echauffements dus aux pertes supplémentaires des transformateurs et machines [5], [6].

### I.3.2 Sur les creux de tension

Les creux de tension et les coupures perturbent de nombreux appareils raccordés au réseau. Ils sont la cause la plus fréquente de problèmes de qualité d'énergie. Les appareils sensibles sont : [2]

1. Chaines complètes de fabrication en continu dont le procédé ne tolère aucun arrêt temporaire d'un élément de chaîne ;
2. Eclairage et systèmes de sécurité ;
3. Equipements informatiques ;
4. Axillaires essentiels de centrales ;

5. Les moteurs asynchrones et synchrones ;
6. Les actionneurs ;
7. Machines à vitesses variables.

### I.3.3 Sur les surtensions

Les surtensions dans les réseaux électriques provoquent des dégradations et destruction du matériel, ainsi des erreurs dans le traitement des données [3].

### I.3.4 Sur les déséquilibres de tension

Les principaux effets sont le suréchauffement et l'apparition de couples de torsion et freinage dans les machines asynchrones triphasées [3].

## I.4. Moyens d'atténuation

Afin d'améliorer la qualité de l'énergie électrique dans les réseaux électriques, en assurant la disponibilité et la qualité de l'onde de tension et de courant, plusieurs solutions de dépollutions des réseaux électriques ont été proposées dans la littérature. Parmi celles-ci on rencontre le filtrage passif, cette solution est connue depuis longtemps et est la plus répandue surtout en forte puissance et sous haute tension (HT), néanmoins, elle présente deux inconvénients majeurs :

- a. Le phénomène de résonance avec le réseau qui est à l'origine de l'amplification de tout harmonique à des fréquences voisines de celles de la résonance ;
- b. La dépendance des performances du filtre passif des caractéristiques du réseau sur lequel il est connecté.

Le développement des semi-conducteurs de puissance entièrement commandable (Thyristors GTO et Transistors IGBT) en particulier, on conduit à la conception de nouvelles solutions dites « Filtre Actif », d'où on peut les classer par des solutions traditionnelles et des solutions modernes.

### I.4.1 Dépollution traditionnelle

Suivant les types de perturbations, courant et tension, deux solutions de dépollutions sont analysées :

#### I.4.1.1 Dépollution de courants perturbateurs

Afin de dépolluer les réseaux électriques de ce type de perturbations, plusieurs solutions ont été introduites dans la littérature.

#### 1. Rééquilibrage des courants perturbateurs

Puisque les courants déséquilibrés dans un réseau électrique basse tension (BT) résultent généralement des charges monophasées et biphasées mal réparties, la première solution est la répartition égale des charges sur les trois phases. La deuxième solution est l'installation d'un

compensateur passif composé d'inductance et de condensateur comme le montre la figure I-8-a [9].

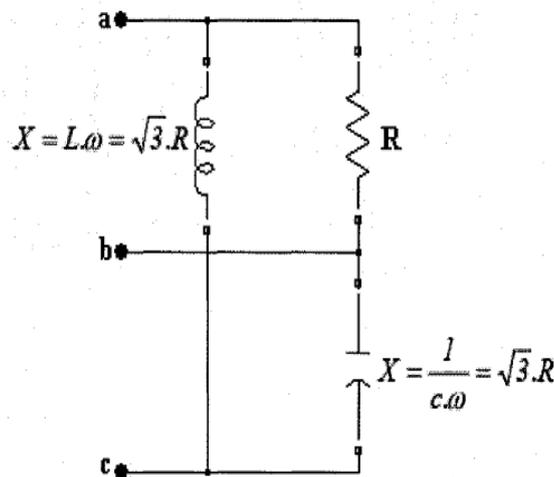


Figure I-8-a Schéma de principe d'un filtre passif composé L et C

### 2. Compensation de puissance réactive

La puissance réactive est majoritairement consommée par les moteurs asynchrones et plus récemment par des dispositifs à base d'électronique de puissance. Plusieurs méthodes sont utilisées pour relever le facteur de puissance, la plus simple est de placer des condensateurs en parallèle avec le réseau [9].

### 3. Compensation des courants harmoniques

Consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance de valeur très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau, parmi les dispositifs de filtrages les plus répandus : filtre passif résonnant (figure I-8-b) et filtre passif passe haut (figure I-8-c) [9], [11].



Figure I-8-b Filtre passif résonnant

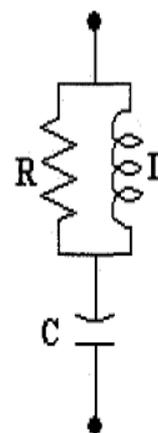


Figure I-8-c filtre passif passe haut

### I.4.1.2 Dépollution de tensions perturbatrices

Les tensions perturbatrices dans un réseau électrique basses tension (BT) sont principalement les creux de tension, tensions harmoniques et tensions déséquilibrées. Pour dépolluer ces deux dernières perturbations, on procède à la limite des courants perturbateurs en utilisant les solutions précitées, quant aux creux de tensions, on utilise les groupes électrogènes [9].

### I.4.2 Dépollution moderne

Les solutions de dépollutions traditionnelles ne répondent plus à l'évolution des réseaux électriques, d'autres solutions modernes ont été proposées dites « Filtre Actif », on distingue :

#### I.4.2.1 Filtres actifs : on distingue

##### 1. Filtres actifs shunts

###### a. Principe de fonctionnement

Le filtre actif shunt est connecté en parallèle au réseau (figure I-9-a) est plus souvent commandé comme un générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux en amplitude et phases opposés à ceux absorbés par la charge polluante, le courant côté réseau devient alors sinusoïdal. Ainsi, l'objectif du filtre actif shunt (F.A.P) consiste 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 [10], [12].

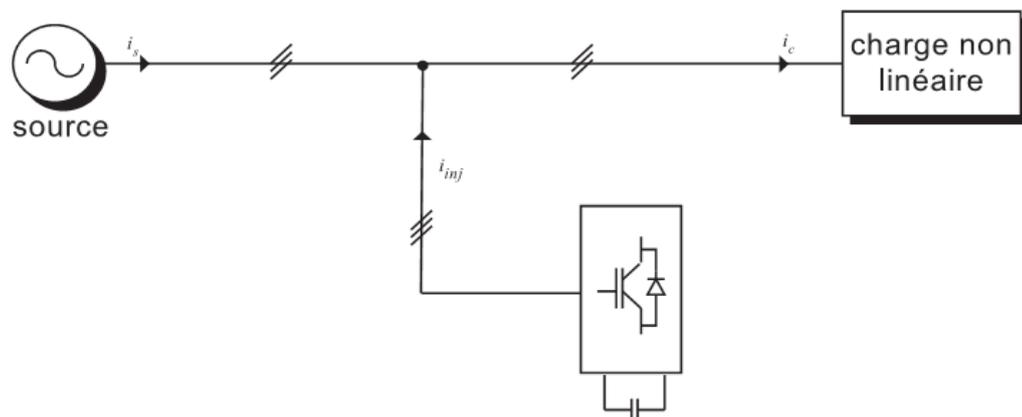


Figure I-9-a- Filtre actif shunt

###### b. Avantages

- Amélioration du taux de distorsion harmonique en courant ;
- Adaptabilité aux variations de la charge du réseau.

###### c. Inconvénients

- Ne permet pas de compenser les tensions harmoniques provoquées par la charge.

### 2. Filtres Actifs séries

#### a. Principe de fonctionnement

Le filtre actif série est connecté en série au réseau (figure I-9-b), il se comporte comme une source de tension qui engendre des tensions harmoniques dont la somme avec celle du réseau devient une onde sinusoïdale. Il est destiné à protéger les installations sensibles aux tensions perturbatrices (creux, harmoniques et déséquilibrés) provenant de la source et celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau [10], [12].

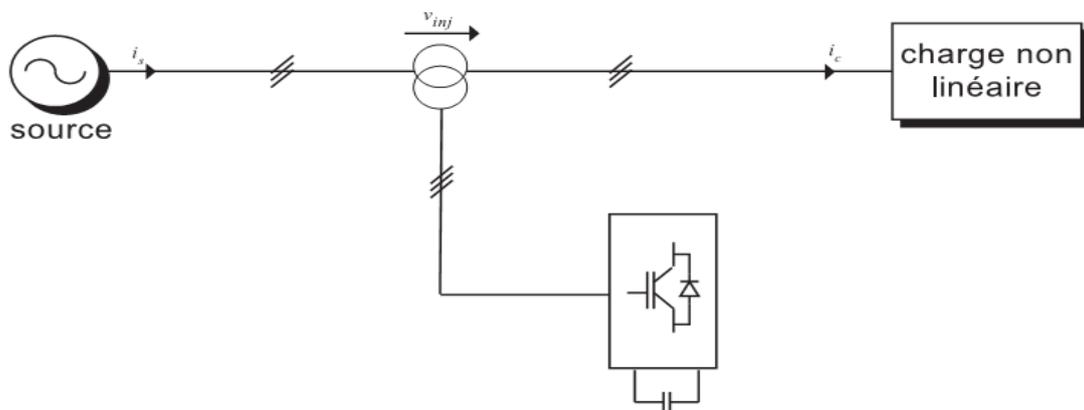


Fig1-9-b- Filtre actif série

#### b. Avantage

- Amélioration du taux de distorsion harmonique en tension ;
- Adaptabilité aux variations de la charge du réseau.

#### c. Inconvénients

- Ne permet pas de compenser les courants harmoniques provoqués par la charge

### 3. Combinaison Actif Shunt-Série (UPQC)

#### a. Principe de fonctionnement

La combinaison actif série shunt dite aussi UPQC (Unified Power Quality Conditioner) est une solution de compensation universelle basée sur le fonctionnement simultané des filtres actifs série et parallèle (figure I-9-c). L'UPQC possède les avantages cumulés des deux types de filtres précédents. Généralement, ce compensateur est formé de deux onduleurs de tension, l'un en série et l'autre en parallèle et partagent le même bus continu. Toutefois, lorsque le filtre actif série est placé en amont du filtre actif parallèle, cela permet de dépolluer la source des tensions perturbatrices et lorsqu'il est placé en aval, cela permet d'isoler la charge de la source perturbée. En effet, l'idée de base de cette combinaison est d'isoler d'un côté l'harmonique entre la charge et la source et de l'autre côté de régulariser la tension réseau, ceci s'effectue par l'intermédiaire du filtre actif série. Alors que, le filtre actif parallèle permet de compenser les courants harmoniques et la puissance réactive de la charge et il permet aussi de contrôler la tension continue du condensateur commun des filtres actifs [10], [12].

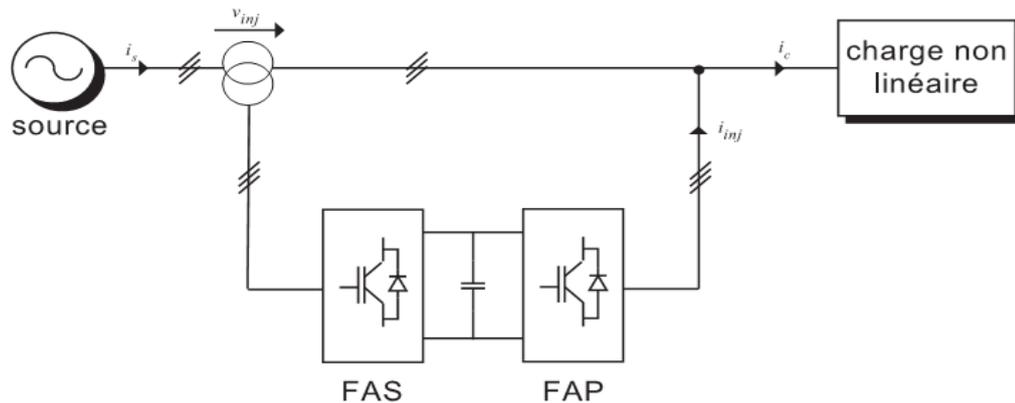


Figure I-9-c- Combinaison des filtres actifs série-shunt

#### 4. Filtres Hybrides Actifs-Passifs

Le filtrage hybride résulte de l'association d'un filtre passif et d'un filtre actif. L'intérêt des filtres hybrides est que le filtre passif prend en charge la compensation d'une grande partie des harmoniques, le filtre actif maintient les performances du filtrage en fonction de l'évolution de la charge et réseau.

Ainsi, la puissance du convertisseur qui constitue le filtre actif est fortement diminuée grâce aux éléments passifs. Ces structures permettent donc d'optimiser le rapport performance/coût et avoir une meilleure tenue en tension.

Plusieurs configurations ont été présentées dans la littérature :

##### a. Filtres actif en série avec la source/filtre passif en parallèle à la charge

Le rôle du filtre actif série dans ce cas est d'empêcher les courants harmoniques de transiter vers le réseau et de les obliger à passer par le filtre passif raccordé à leurs fréquences (figure I-10-a) [9].

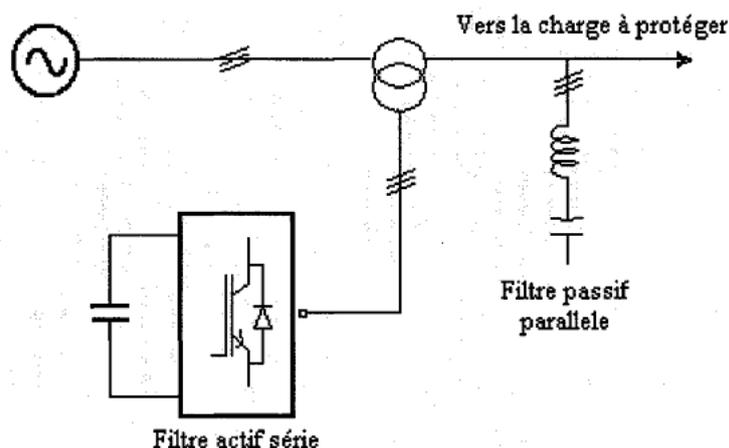


Figure I-10-a Filtre hybride

##### b. Filtre actif et passif en parallèle à la charge

Le principe de fonctionnement de cette configuration est le même que celui présenté précédemment avec 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-10-b).

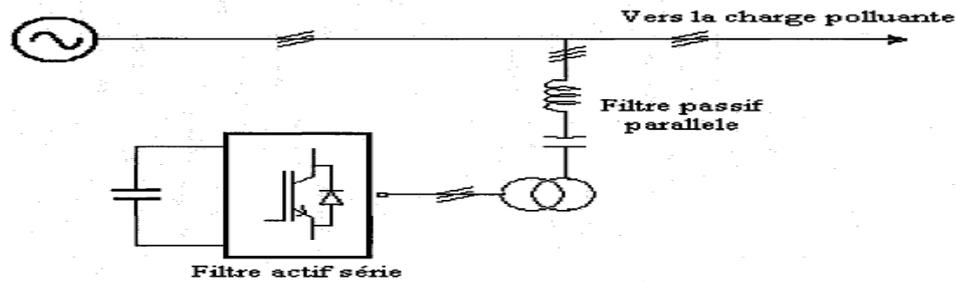


Figure I-10-b Filtre hybride

**c. Filtre actif parallèle à un filtre passif**

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 accordé 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-10-c) [9].

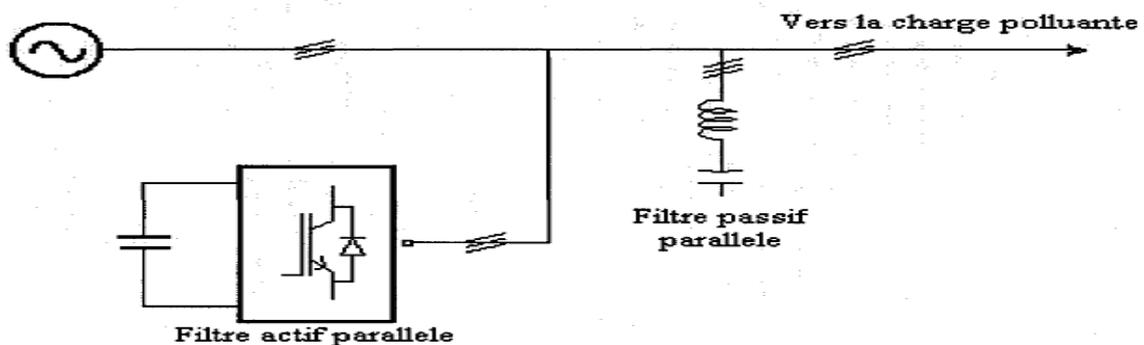


Figure I-10-c Filtre hybrides

**I.4.2.2 Systèmes flexibles de transmission en courant alternatif des (FACTS)**

FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission System*) : ce sont des dispositifs basés sur les composants de l'électronique de puissance utilisés avec de grandes performances pour la régulation de la tension et l'amélioration du transit de puissance. Le tableau 1-3 suivant, représente les principales catégories de dispositifs de contrôle des réseaux électriques [13].

La colonne à gauche des systèmes FACTS, présente les contrôleurs à base de thyristors ou bien des convertisseurs à base de thyristors tels que le SVC et le TCSC qui sont connus depuis plusieurs dizaines d'années à titre de compensateurs shunt et série respectivement et qui ont prouvé leur fiabilité dans le contrôle des réseaux.

La colonne droite des systèmes FACTS résultant de la technologie la plus avancée des FACTS avec des convertisseurs de sources de tension à base d'interrupteurs statiques sophistiqués IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) ou IGCT (*Insulated Gate Commutated Thyristor*) tels que le StatCom, SSSC, UPFC et IPFC. En général, les FACTS sont divisés en trois grandes catégories principales [14] :

- a) **Compensateurs série** : sont connectés en série avec le réseau comme une impédance variable (inductive ou capacitive) ou une source de tension variable. Utilisés pour la

## Généralités sur les perturbations, Conséquences et Moyens d'atténuation

compensation série de la puissance réactive et par leur influence sur l'impédance de la ligne effective, ils interviennent dans le contrôle du flux de puissance et la stabilité de ce dernier.

- b) Compensateurs shunt :** ils consistent en une impédance variable, source variable ou une combinaison des deux. Ils injectent un courant dans le réseau au point de connexion. Ils sont principalement efficaces dans la compensation de la puissance réactive, en conséquence le contrôle de la tension aux nœuds.
- c) Compensateurs hybrides :** c'est une combinaison des deux dispositifs précédents commandés d'une manière coordonnée. Ils permettent un contrôle multi-variable (tension, impédance et angle de transport) [13].

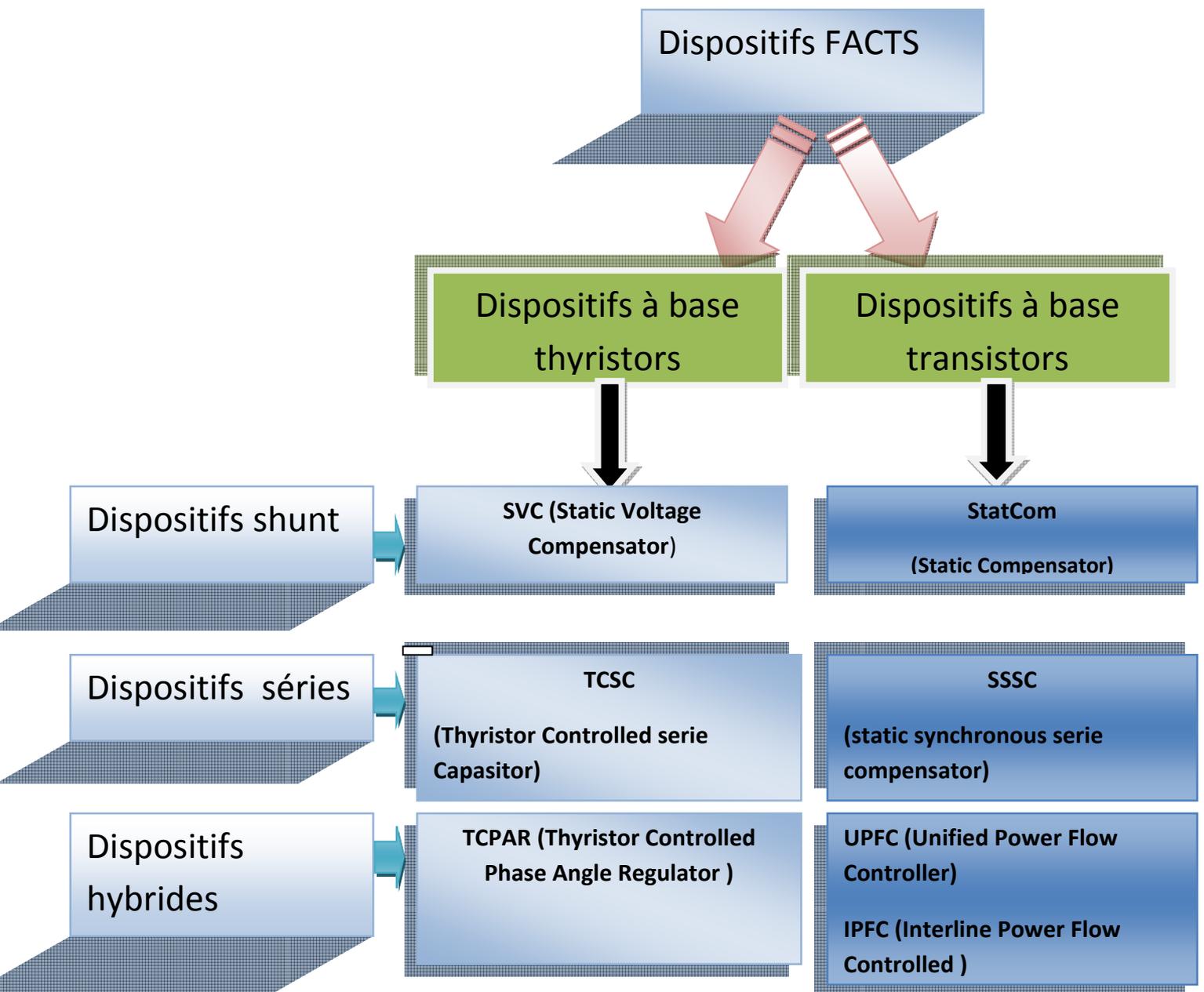


Tableau I-3 Les principaux dispositifs FACTS

### **I.5. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons décrit les principales perturbations qui peuvent prendre naissance dans les réseaux électriques, leurs origines et leurs conséquences sur les équipements essentiels existant dans le réseau et les installations industrielles.

Nous avons constaté que la dégradation de la qualité de l'énergie électrique peut conduire à une modification du comportement des performances ou même la destruction des équipements et des procédés qui dépendent avec des conséquences possibles sur la sécurité des personnes et des surcoûts économiques. Par ailleurs, l'analyse des principales causes de la dégradation de la qualité de l'énergie, nous laisse responsabiliser d'avantage l'utilisateur sur cette dégradation notamment les gros consommateurs industriels, le distributeur a aussi sa part de responsabilité liée essentiellement à la maîtrise de gestion de son réseau.

Cependant, les perturbations ne doivent pas être perçues comme une fatalité, car 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. Aussi, dans ce sens, nous avons présenté les différentes solutions pour y remédier.

Nous avons présenté les différentes structures du filtrage passif, actif, universel, nous avons aussi noté leurs avantages et inconvénients dans la dépollution harmonique. Aussi, nous avons présenté les dispositifs FACTS comme une solution d'amélioration de la qualité de l'énergie électrique et qui fera l'objet de nos prochains chapitres.

# CHAPITRE II

## II.1. Introduction

Le stockage massif de l'énergie électrique sous une forme immédiatement disponible n'est actuellement pas réalisable. Le problème majeur des exploitants est donc de maintenir l'équilibre en puissance entre l'offre disponible et la demande potentielle. C'est une condition nécessaire pour le bon fonctionnement du système production / transport / consommation. Les réseaux de transport assurent l'acheminement de l'énergie depuis des unités de productions vers les lieux de consommations à travers des lignes électriques (aériennes et souterraines). C'est dans ce contexte que les spécialistes du réseau électrique se voient confrontés à de nombreux défis [15].

Le développement des éléments de l'électronique de puissance commutable et commandable (thyristors et transistors) a donné naissance à de nouveaux dispositifs appelés FACTS.

D'après IEEE, FACTS est l'abréviation de (Flexible Alternating current Transmission Systems) qui s'interprète comme étant les systèmes de transmission du courant alternatif incorporant des contrôleurs à base de l'électronique de puissance et autres contrôleurs statiques en vue d'améliorer la contrôlabilité des réseaux électriques ainsi la capacité de transfert des lignes.

## II.2. Exploitation des réseaux électriques

### II.2.1. Chute de tension

Considérons la ligne électrique de la figure II-1-a, la représentation du diagramme de Fresnel des tensions est donnée dans la figure II-1-b. Lorsque la charge absorbe un courant  $\bar{I}$  à partir de source de tension,  $\bar{V}_S$ , la tension à la sortie  $\bar{V}_R$  chute au dessous de celle à l'entrée [14], [16].

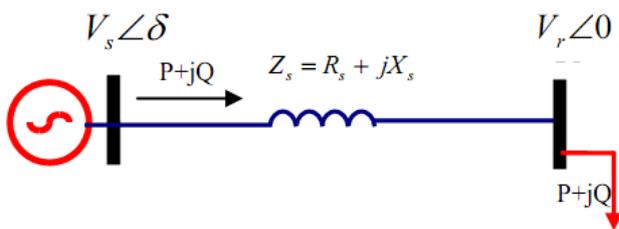


Figure II.1.a. Schéma d'une Ligne électrique simple

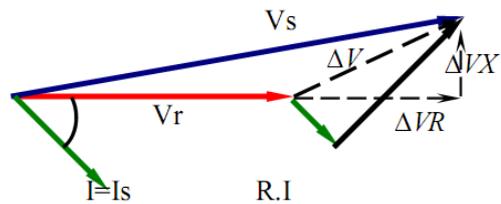


Figure II.1.b. Représentation de Fresnel des tensions

La chute de tension  $\Delta V$ , d'après le schéma équivalent et du diagramme des tensions, est donnée par la formule suivante :

$$\bar{\Delta V} = \bar{V}_S - \bar{V}_R = \bar{Z}_s \cdot \bar{I} \dots\dots\dots (II-1)$$

Avec  $I$  le courant de la charge donné en fonction de  $P$  et  $Q$  par la formule suivante :

$$\bar{I} = \frac{P - jQ}{\bar{V}_r} \dots\dots\dots (II-2)$$

## Compensation des Perturbations par DVR

En tenant la tension de sortie  $V_r$  comme référence des phases, on peut écrire la chute de tension  $\Delta V$  comme suite :

$$\overline{\Delta V} = (R_s + j X_s) \left( \frac{P - jQ}{\overline{V}_r} \right) = \frac{R_s P + X_s Q}{\overline{V}_r} + j \frac{X_s P - R_s Q}{\overline{V}_r} = \Delta V_T + j \Delta V_L \dots\dots\dots (II-3)$$

$\Delta V_T$  : la chute de tension transversale.

$\Delta V_L$  : la chute de tension longitudinale.

### II.2.2. La puissance transmise d'une ligne électrique

L'énergie électrique est transportée par des lignes électriques de capacités limitées à cause des limites thermiques des câbles.

Considérant la ligne électrique de la Figure II-1-a, les puissances active transmise et réactive sont données par les formule suivantes :

$$P_{tr} = \frac{3.V_s.V_r}{Z_s} \cos(\delta - \beta) - \frac{3.V_r^2}{Z_s} \cos \beta \dots\dots\dots (II-4).$$

$$Q = \frac{3.V_s.V_r}{Z_s} \sin(\delta - \beta) - \frac{3.V_r^2}{Z_s} \sin \beta - 3.Y V^2 \dots\dots\dots (II-5).$$

$V_s, V_r$  : tension d'entrée et de sortie du système ;

$P_{tr}$  : Puissance active transmise ;

$Q$  : Puissance réactive absorbée ;

$\delta$  : Déphasage de la tension  $\overline{V}_s$  de la source par rapport à la tension  $\overline{V}_r$  du récepteur;

$\beta$  : Argument de l'impédance de la ligne ;

$Y$  : Admittance transversale capacitive de la ligne :  $Y = \frac{1}{Z_c}$

Dans le cas de la *Haute Tension* (HT) et *Très Haute Tension* (THT) :  $R \ll X_L$  :

$$P_{tr} = \frac{3.V_s.V_r}{X_L} \sin \delta \dots\dots\dots (II-6).$$

$$Q = \frac{3.V_s.V_r}{X_L} \cos \delta - \frac{3.V_r^2}{X_L} \dots\dots\dots (II-7).$$

$$\Delta V = \frac{X_L.Q}{3.V_s.V_r} \dots\dots\dots (II-8).$$

On remarque que la chute de tension dépend de la puissance réactive et qu'il existe une corrélation entre l'angle de transport et la puissance active transmise [14], [16].

### II.2.3. Régulation de la tension

La tension et la fréquence sont deux paramètres très importants pour l'exploitation d'un système électrique. En effet, elles sont garantes du bon fonctionnement du point de vue du consommateur que du point de vue des éléments de transit ou des sources. Ainsi, la plage de variation de ces deux paramètres est fixée par la norme EN50160 aux valeurs dans le tableau II-1 ci-dessous [14].

U et f	Déviation max de la tension instantané	Déviation max de la fréquence instantané
<ul style="list-style-type: none"> <li>• B.T U=400V, f=50Hz</li> <li>• H.T U=20KV, f=50Hz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• -10% et 6%</li> <li>• ±5%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ±0.05Hz</li> <li>• ±0.05Hz</li> </ul>

**Tableau II-1 Valeurs normalisées de la norme EN50160 en tension et en fréquence**

## II.3. Compensation par les dispositifs FACTS

### II.3.1. C'est quoi un FACTS ?

Un système de transmission flexible du courant alternatif, plus connu sous le nom acronyme anglais FACTS est un équipement d'électronique de puissance d'appoint utilisé pour contrôler la répartition des charges dans le réseau en améliorant la capacité de transit de puissance et en réduisant les pertes et enfin, contrôler la tension en un point ou assurer la stabilité des réseaux de transmission d'énergie et des groupes de production qui y sont connectés [17].

### II.3.2. Apports et Avantages des FACTS

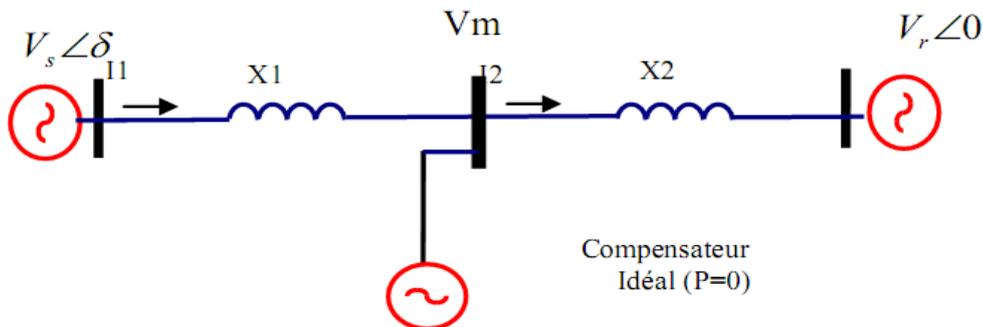
- Contrôle du transit de puissance ;
- Contrôle de la tension en régime stationnaire ;
- Stabilité dynamique ;
- Qualité de l'énergie ;
- Limiter les courants de courts-circuits [18].

### II.3.3. Compensation d'une ligne électrique avec les dispositifs FACTS

La compensation d'énergie réactive représente l'application de tous les éléments de l'électronique de puissance pour aboutir aux apports et aux avantages cités précédemment. Il existe trois types de compensation :

#### II.3.3.1. Compensation shunt

Considérons un réseau électrique équipé d'un compensateur shunt idéal connecté au point milieu de la ligne électrique comme le montre la figure II-2-a.

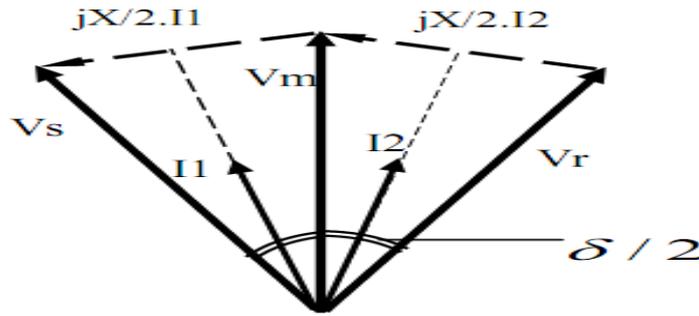


**Figure II.2.a. Connexion d'un compensateur shunt idéal au milieu d'une ligne électrique**

## Compensation des Perturbations par DVR

Le compensateur est représenté par une source de tension sinusoïdale en phase avec la tension  $V_m$  du point milieu de la ligne et échange juste la puissance réactive avec le réseau. Il découpe la ligne en deux segments égaux d'impédances  $X_L/2$ , le premier segment transporte la puissance depuis la source  $V_s$  au point milieu, quant au deuxième, il transfère cette puissance du point milieu au jeu de barres du récepteur  $V_r$ .

La relation entre les tensions des extrémités de la ligne et du compensateur  $V_m$ , ainsi, les courants dans la ligne dans les deux segments de la ligne, est représenté sur le diagramme de Fresnel de la figure II-2-b [18].



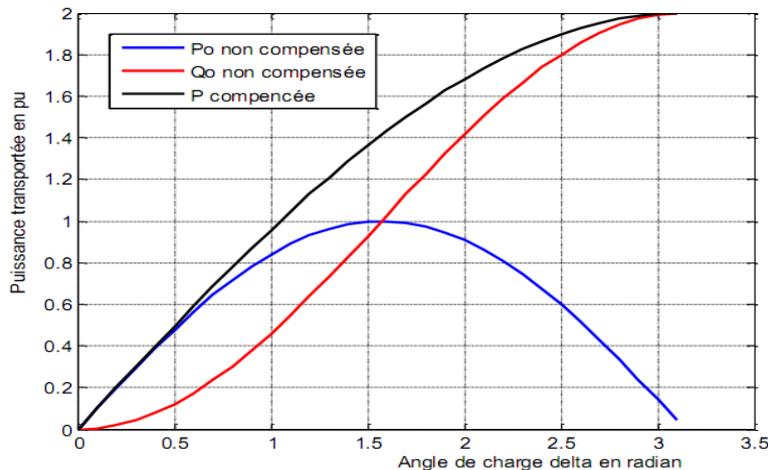
**Figure II.2.b. Représentation de Fresnel des courants et tensions en présence du compensateur**

Les puissances active et réactive transportées par une ligne électrique données par les équations précédentes 2-6 et 2-7 seront modifiées, en ajoutant un compensateur shunt au point milieu et données par les équations suivantes :

$$P_{tr} = \frac{6 \cdot V_s \cdot V_r}{X_L} \sin \delta \dots\dots\dots (II-9)$$

$$Q = \frac{6 \cdot V_s \cdot V_r}{X_L} \cos \delta - \frac{6 \cdot V_r^2}{X_L} \dots\dots\dots (II-10)$$

La variation de la puissance active et réactive en fonction de l'angle de charge  $\delta$  est représentée sur le graphe de la figure II-2-c.



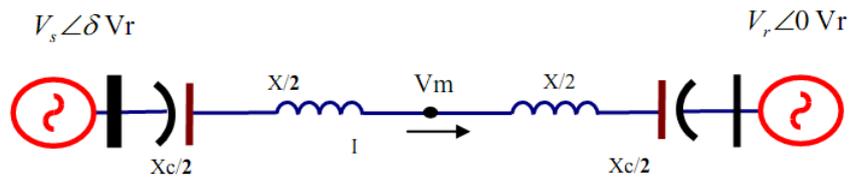
**Figure II-2-c Variation de P et Q en fonction de  $\delta$  en présence d'un compensateur shunt idéal**

On observe que le compensateur shunt, peut augmenter la puissance transmise maximale jusqu'au double ( $\delta = \pi/2$ ) [14].

### II.3.3.2. Compensation série

La compensation série est basée sur le principe de réduction de la réactance équivalente effective d'une ligne électrique qui peut être considérée comme ligne de plus faible longueur. Egalement, on peut atteindre cet objectif, en injectant une tension alternative, de même fréquence que celle du réseau en série à la ligne et en quadrature avec le courant y transitant.

Le dispositif le plus simple qui permet une compensation en série dans une ligne électrique est l'insertion des condensateurs en série à cette dernière comme le montre la figure II-3-a [18].



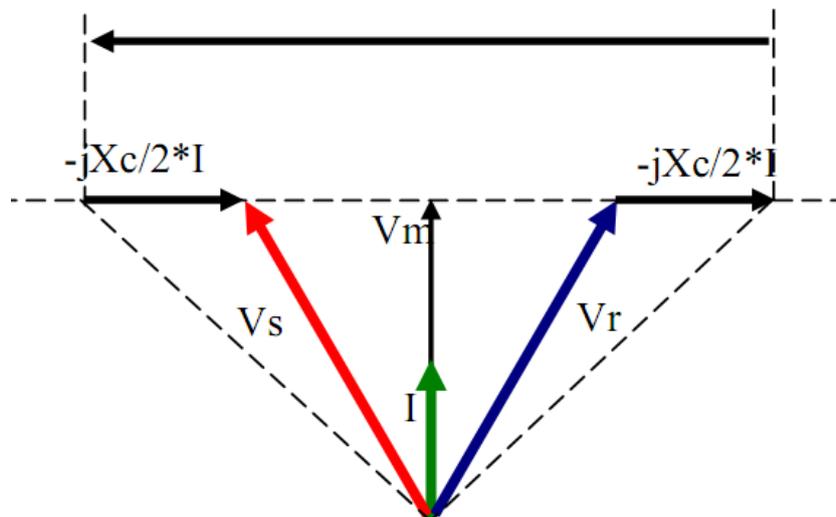
**Figure II.3.a. Connexion d'un compensateur série idéal au milieu d'une ligne électrique**

Systématiquement, en insérant ces condensateurs, la réactance effective de la ligne doit être diminuée et avoir une nouvelle réactance de valeur égale à :

$$V_e f f = (X_L - X_c)I = X_L(1 - k)I \dots \dots \dots (II-11).$$

k : coefficient de compensation série ;  $k = \frac{X_c}{X_L}$

La relation entre les tensions aux extrémités de la ligne et celle injectée par le compensateur série  $V_m$ , ainsi, les courants dans la ligne, est illustrée dans le diagramme de Fresnel de la figure II-3-b.

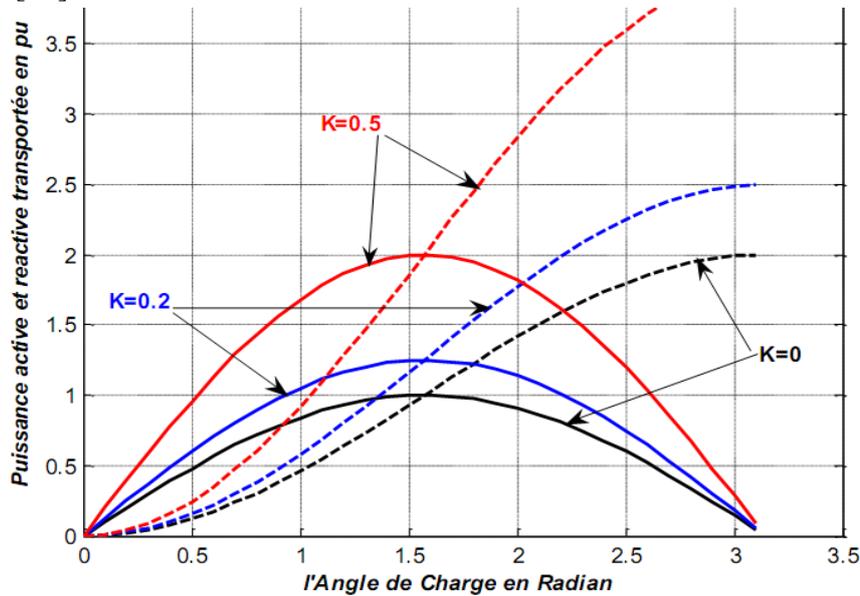


**Figure II.3.b. Représentation de Fresnel des tensions compensatrices**

La puissance transmise par une ligne compensée est égale :

$$P_{tr} = \frac{3.V_S.V_R}{X_L.(1-k)} \sin \delta \dots\dots\dots (II-12).$$

On observe qu'elle varie selon la valeur du degré de compensation k, aussi, elle peut augmenter la capacité de transport d'une ligne électrique comme le montre le graphe de la figure II-3-c [17].



**Figure II-3-c Variations de P et Q en fonction de  $\delta$  pour différentes valeurs de K en présence d'un compensateur série idéal**

### II.4. Structure des principaux dispositifs FACTS

La technologie FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission System*) n'est pas limitée en un seul dispositif, mais elle regroupe une collection de dispositifs à base des éléments de l'électronique de puissance implantés dans le réseau électrique, afin de mieux contrôler le flux de puissance et d'augmenter la capacité de transit de puissance des lignes électriques. Par action de contrôle rapide de ces dispositifs sur l'ensemble des paramètres du système électrique (*tension, réactance et angle de transport*).

#### II.4.1. Compensateurs shunts

La compensation shunt est utilisée pour influencer sur la caractéristique électrique de la ligne de transport, afin d'augmenter la capacité de transport d'énergie dans le régime statique et ainsi contrôler le profil de tension le long de la ligne. On distingue :

##### II.4.1.1. Compensateurs shunts à base de thyristors (SVC)

Un SVC (*Static Var Compensator*) est un générateur ou absorbeur d'énergie électrique réactive connecté en dérivation à la ligne électrique de transport et dont la tension de sortie est ajustée pour échanger un courant inductif ou capacitif pour maintenir et contrôler des paramètres spécifiques du réseau électrique. Il permet entre autres la connexion de charges éloignées des centres de productions [16].

## Compensation des Perturbations par DVR

Un *SVC* est généralement constitué d'une ou plusieurs batteries de condensateurs fixes, commutables soit par disjoncteurs ou thyristors montés en antiparallèle (*TSC*) et d'un banc de réactance en série avec un gradateur (*TCR*) couplé au réseau à travers un transformateur comme le montre la figure II-4-a [20].

TCR : Thyristor Controlled Reactor.

TSC : Thyristor Switched Capacitor.

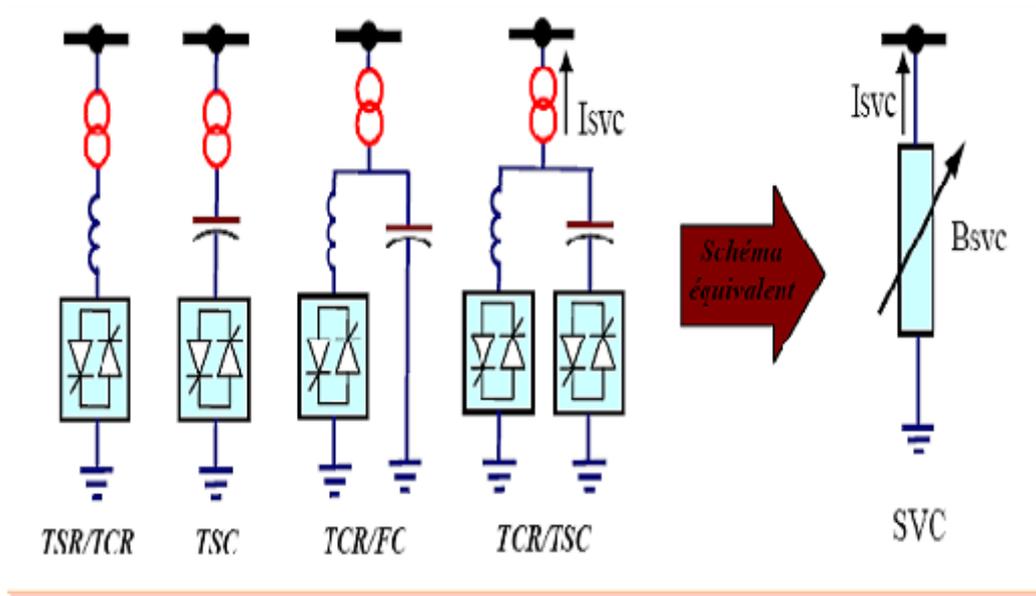


Figure II.4.a. Schéma de principe d'un SVC

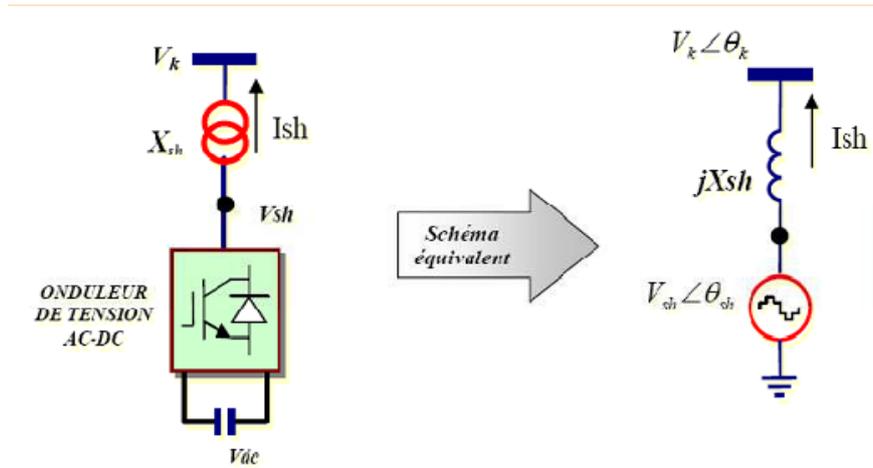
Il existe deux types de *SVC* :

- ***SVC industriels*** : sont souvent associés à des charges déséquilibrées, qui peuvent varier très rapidement tels que les laminoirs et fours-à-arc.
- ***SVC de Transmissions*** : ont pour fonction de réduire la tension des réseaux moins chargés en absorbant la puissance réactive et d'augmenter la tension des réseaux surchargés, en fournissant de la puissance réactive et d'aider le système à retrouver la stabilité en cas de défaut.

### II.4.1.2. Compensateurs shunts à base thyristors GTO (StatCom)

Le *StatCom* (*Static Compensator*) est basé sur la structure d'un convertisseur statique de tension triphasé, il est équivalent à une machine synchrone classique fonctionnant en compensatrice, mais sans inertie. Il est principalement utilisé pour la compensation dynamique des réseaux électriques afin de faciliter la tenue en tension, d'accroître la stabilité en régime transitoire et d'amortir les oscillations de puissances.

C'est un convertisseur de tension à base de Thyristors GTO ou IGBT alimenté par des batteries de condensateurs, l'ensemble est connecté parallèlement à travers un transformateur de couplage au réseau, comme le montre la figure II-4-b. [19]



**Figure II.4.b. Schéma de principe d'un StatCom**

### II.4.1.3. Comparaison des différents dispositifs shunt

Le SVC et le StatCom sont très proches dans leur pouvoir de compensation mais très différents dans le principe de compensation :

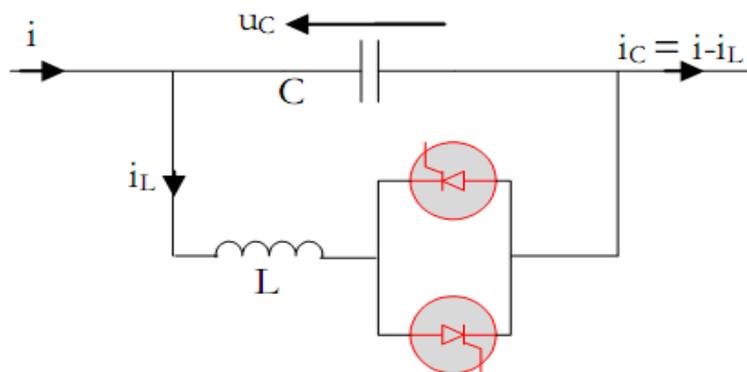
- Le StatCom est une source de tension synchronisée en dérivation au réseau électrique tandis que le SVC est une admittance (inductive ou capacitive) shunt contrôlée.
- Le StatCom présente une caractéristique supérieure au SVC, beaucoup plus performant et surtout ne nécessite même pas même banc de batterie comme le SVC pour la même puissance.

### II.4.2. Compensateurs série

La compensation série est très efficace dans le contrôle du transit de puissance dans les lignes électriques. Avec la compensation série, l'impédance effective de la ligne entre la source et le récepteur diminue et par conséquent, le bon contrôle du flux de puissance et pour corriger la limite de stabilité donc doit fournir plus de puissance réactive.

#### II.4.2.1 Compensateurs série à base de thyristors (TCSC)

Un TCSC (*compensateur série contrôlé par thyristors*) est composé d'une inductance en série à un gradateur le tout en parallèle à une capacité comme le montre la figure II-5-a [14].



**Figure II.5.a. Schéma de principe d'un TCSC**

## Compensation des Perturbations par DVR

Il permet le contrôle du flux de puissance et l'élévation de la capacité de transfert des lignes, en agissant sur la réactance du compensateur  $X_{TCSC}$  qui elle, varie selon l'angle d'amorçage ( $\alpha$ ) des thyristors, donnée par la formule suivante :

$$X_{TCSC} = X_{TCR} \parallel X_C = \frac{X_{TCR} X_C}{X_{TCR} + X_C} \dots\dots\dots (II-13)$$

$$X_{TCSC} = \frac{L \omega}{\frac{2}{\pi} \left( \pi - \alpha - \frac{\pi}{2} \right) - L C^2 \omega} \dots\dots\dots (II-14)$$

D'où, la puissance transmise régit entre deux jeux de barre est donnée par l'équation suivante :

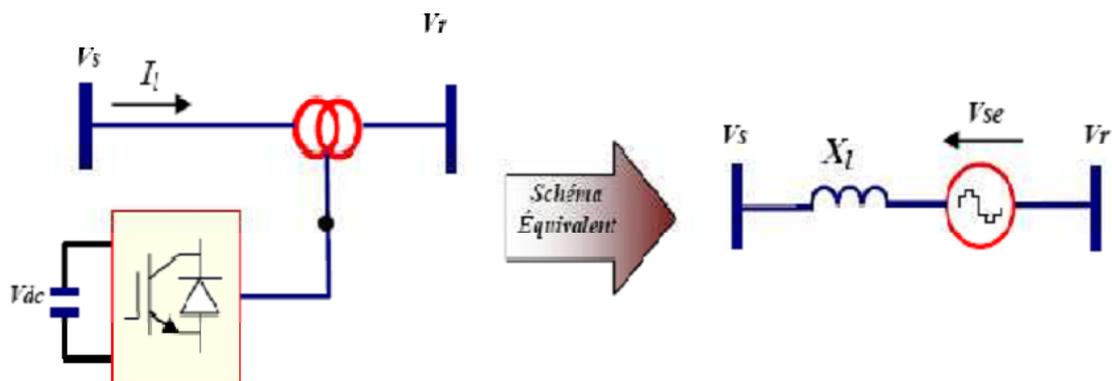
$$P_{tr} = \frac{3.V_S.V_R}{X_L + X_{CSC}} \sin \delta \dots\dots\dots (II-15)$$

### II.4.2.2 Compensateurs série à base thyristors GTO (SSSC)

Ce type de compensateur série est le plus important des dispositifs de cette famille de FACTS. Il est constitué d'un onduleur triphasé couplé en série à la ligne électrique à l'aide d'un transformateur, Son rôle est d'injecter une tension triphasée, à la fréquence du réseau, en série avec la ligne de transport. Cette tension est en quadrature avec le courant de la ligne.

Nous pouvons, dans ce cas, régler continuellement la valeur apparente de la capacité ou l'inductance ainsi introduite en parallèle de cet onduleur. Si on utilise un système de stockage d'énergie. Le *SSSC (Compensateur Synchrone Statique Série)*, peut à ce moment échangée de la puissance active avec la ligne électrique figure II-5-b.

Ceci peut contribuer à améliorer la qualité de l'énergie électrique tels que les creux de tension et maintenir les tensions à la valeur exigée [14], [20].



**Figure II.5.b. Schéma de principe d'un SSSC**

### II.4.2.3 Comparaison des différents dispositifs série

Le SSSC est une source de tension contrôlée. Le TCSC est un compensateur à impédance effective variable, il y a des différences essentielles dans les caractéristiques et les fonctionnalités de ces dispositifs :

- Le SSSC offre la possibilité d'acquiescer d'une source d'énergie dans le bus continu, il peut donc assurer une compensation de la résistance de la ligne par injection de puissance active ainsi que pour la réactance de la ligne par injection de puissance réactive. Le TCSC ne peut échangés que de la puissance réactive avec la ligne.
- Le SSSC avec un élément de stockage d'énergie active améliore encore l'efficacité d'amortissement des oscillations de puissance transmise par la modulation de la compensation série sur un signal pris du réseau comme la puissance active, la vitesse du générateur et l'angle de charge.

### II.4.3. Compensateurs hybrides

Les dispositifs FACTS présentés précédemment permettent d'agir uniquement sur un des trois paramètres déterminant de la puissance transmise dans une ligne (tension, impédance et angle de transport). Par combinaison des deux types de dispositifs (séries et shunts), il est possible d'obtenir des dispositifs hybride, capable de contrôler simultanément les différents paramètres citer précédemment, on distingue :

#### II.4.3.1 Compensateurs hybrides à base thyristors

##### a) TCPAR (Thyristors Controlled Phase Angle Regulator)

*TCPAR (Déphaseur Statique)* est un transformateur déphaseur à base thyristors. Ce dispositif a été créé pour remplacer les déphaseurs à transformateurs ou régulateurs en charge qui sont commandés mécaniquement. Il est constitué de deux transformateurs l'un est branché en série avec la ligne, et l'autre en parallèle avec la ligne. Ce compensateur n'est pas encore utilisé, seule une étude est actuellement menée afin d'introduire un déphaseur à thyristors dans l'interconnexion des réseaux du nord ouest du Minnesota (Figure II-6-a) [13].

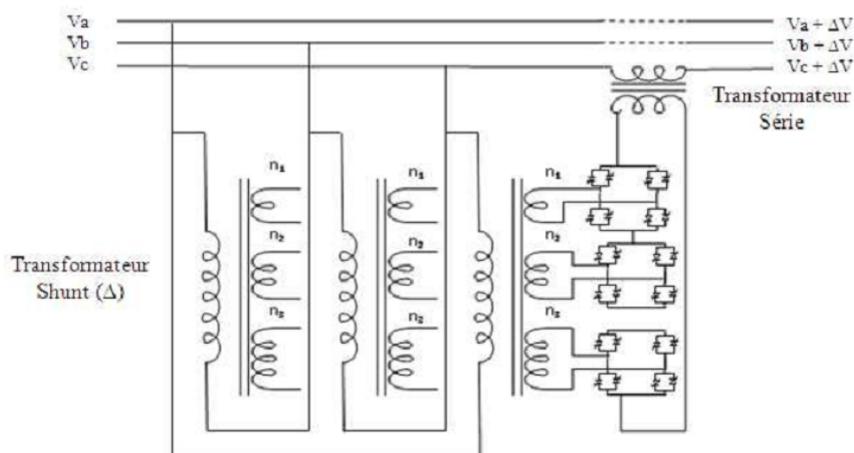


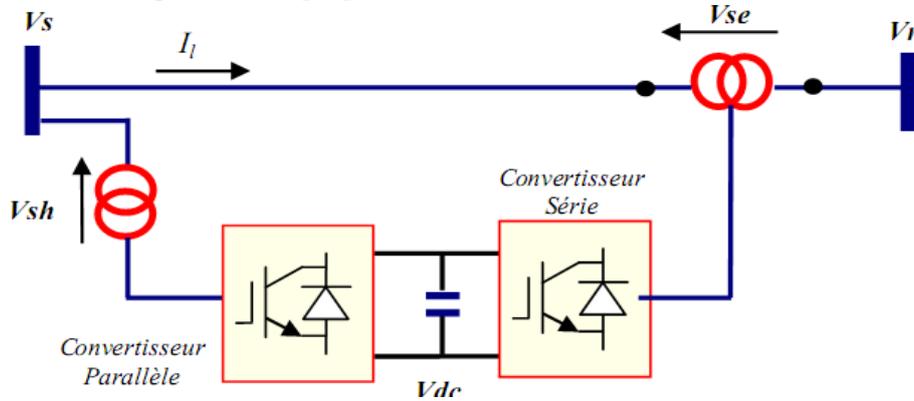
Figure II.6.a. Schéma de principe d'un (TCPAR)

#### II.4.3.2 Compensateurs hybrides à base de thyristors GTO

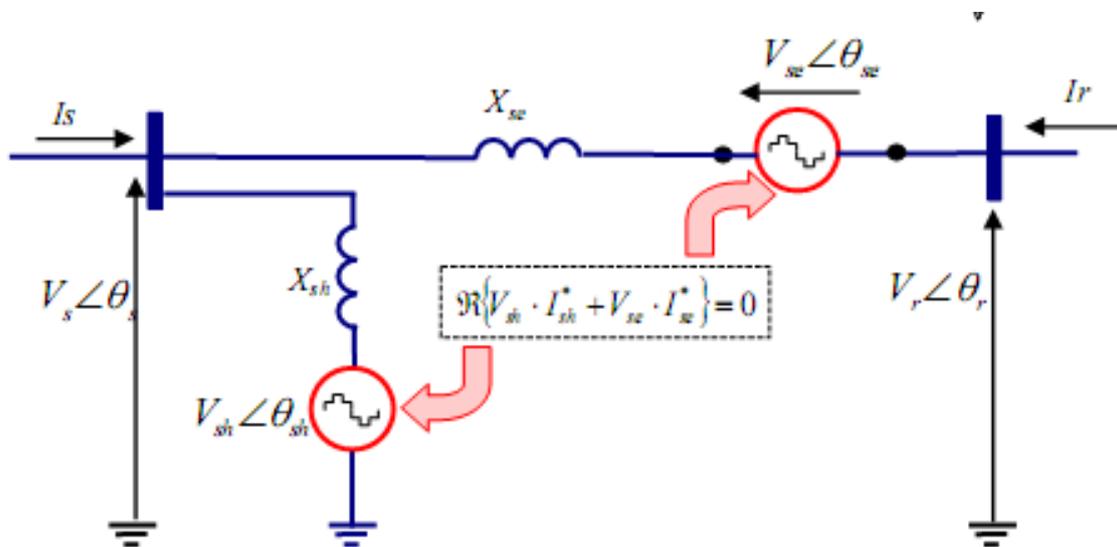
##### a) UPFC (Unified Power Flow Controller)

*UPFC (Le contrôleur de transit de puissance unifié)* est formé de deux convertisseurs de tension reliés par une liaison de courant continu (DC) formée par un condensateur, il s'agit

principalement de la combinaison d'un StatCom en série avec un SSSC connectés au réseau chacun à travers un transformateur, les deux convertisseurs sont reliés par un condensateur comme le montre la figure II-6-b [21].



**Figure II-6-b Structure de l'UPFC**



**Figure II.6.c. Schéma équivalent d'un UPFC**

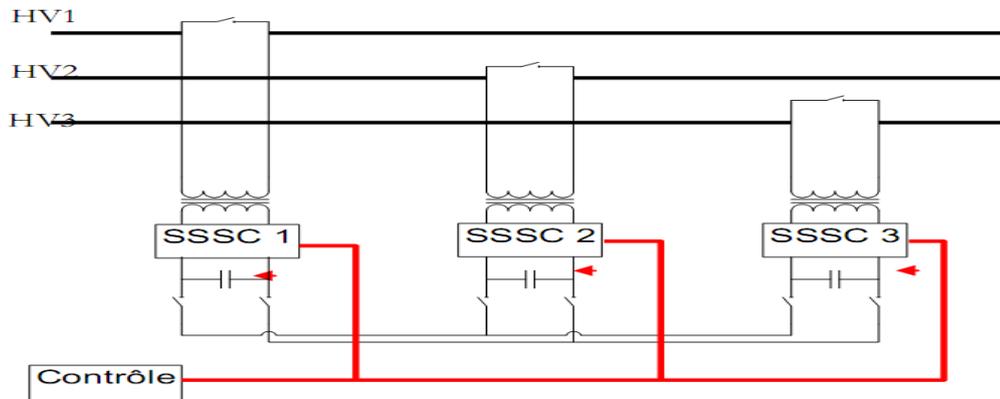
Le principe de l'UPFC consiste à dériver une partie du courant circulant dans la ligne pour le réinjecter avec une amplitude et phase appropriées. Le convertisseur 1, connecté en shunt avec la ligne, a pour fonction de prélever la puissance active et de la délivrer au convertisseur 2 connecté en série avec la ligne.

Le convertisseur 1 shunt peut également générer de la puissance réactive indépendamment de la puissance active du réseau. De ce fait, il peut agir à la fois sur les trois paramètres de la puissance transmise (*tension, impédance et angle de transport*) [21].

### b) IPFC (Interline Power Flow Controller)

L'IPFC, contrôleur du transit de puissance entre ligne, est utilisé dans le cas d'un système de lignes multiples reliées à un même poste.

L'*IPFC* (contrôleur de puissance entre ligne), est formé de trois SSSC, chacun d'eux fournissant une compensation série à une ligne, du côté continu, tous les convertisseurs sont reliés entre eux via des disjoncteurs comme le montre le figure II-6- [17].



**Figure II.6.d. Schéma de principe d'un IPFC**

L'*IPFC*, permet de transférer de la puissance active entre les lignes compensées pour égaliser les transits de puissances active et réactive sur les lignes ou pour décharger une ligne surchargée vers une autre moins chargée. Les tensions injectées possèdent une composante en quadrature et une autre composante en phase avec les courants respectifs des lignes, pour une compensation série indépendante dans chaque lignes et définir le niveau de puissance active échangée avec les autres lignes respectivement. Sur la liaison continue, le bilan est toujours nul.

#### II.4.4. Synthèse

Le tableau II-2 résume d'une manière générale et simple l'impact de l'utilisation de chaque dispositif FACTS pour la résolution des différents problèmes qui entravent le bon fonctionnement du réseau électrique [13], [14].

	Contrôle de charge	Contrôle de tension	Stabilité transitoire	Amplitudes des oscillations
<b>SVC</b>	*	***	*	**
<b>StatCom</b>	*	***	*	**
<b>TCSC</b>	***	*	***	**
<b>SSSC</b>	***	*	***	**
<b>TPCAR</b>	***	**	*	**
<b>UPFC</b>	***	***	***	***
<b>IPFC</b>	***	***	***	***

**Tableau II.2. Application des FACTS à la résolution des problèmes dans le réseau électrique**

\*Influence petite, \*\*Influence moyenne, \*\*\*Influence grande

## II.5. Compensation d'une ligne électrique par DVR

### II.5.1. Description

Le dispositif FACTS à base d'onduleur de tension connecté en série au réseau électrique est appelé Static Synchronous Serie Compensator (SSSC) à été proposé par Gyugyi en 1989.

Le SSSC ne diffère pas dans sa structure de base de celle du StatCom, seulement il est connecté en série avec la ligne de transport, il consiste alors, en un onduleur de tension avec une source de tension continue (condensateur) et l'ensemble lié à la ligne de transport de transport en série à travers un transformateur de couplage et un filtre LC comme représente la figure II-7-a [14].

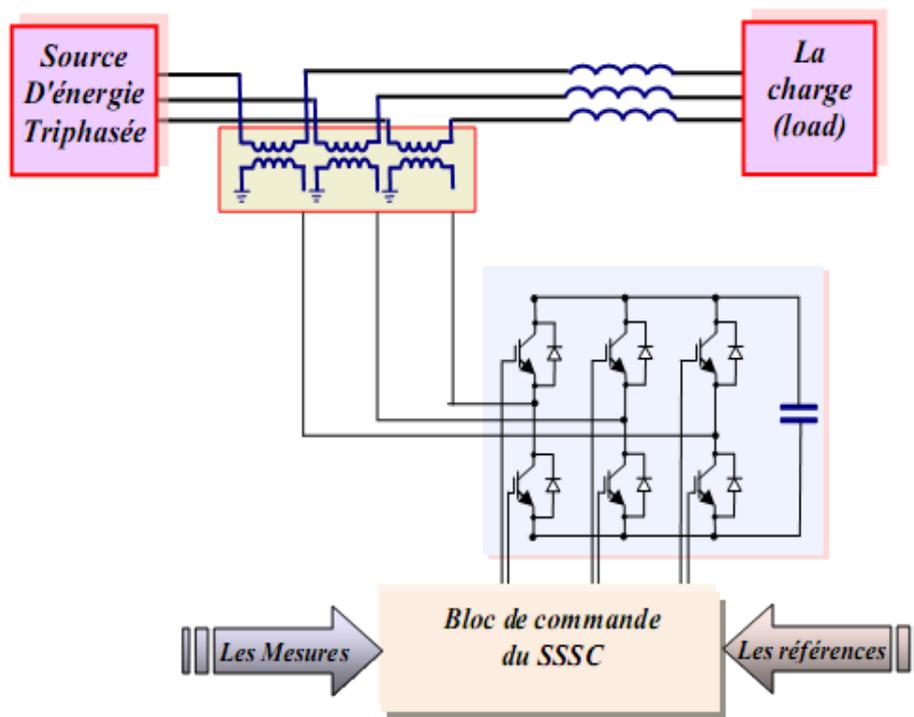


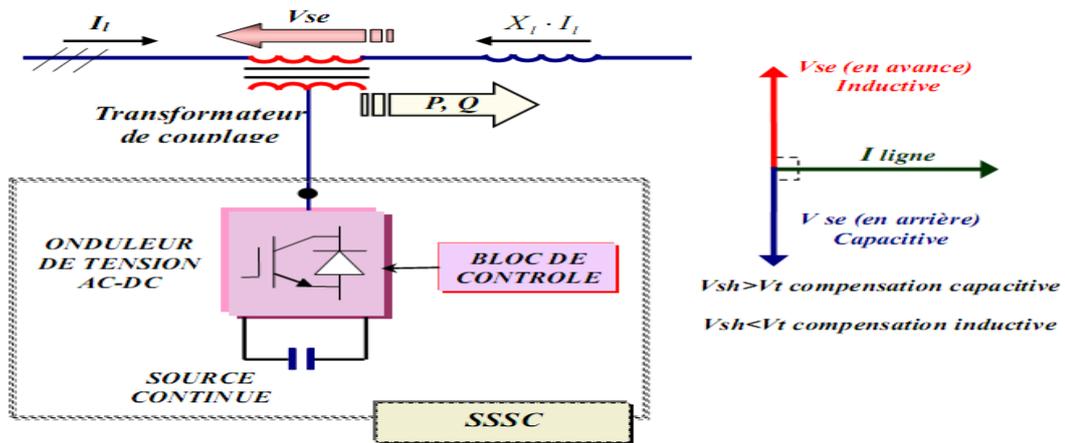
Figure II.7.a. Schéma de la structure d'un DVR

#### Selon IEEE :

Le SSSC est un générateur synchrone statique qui fonctionne sans source d'énergie extérieur en tant que compensateur série dont la tension de sortie est en quadrature et indépendamment contrôlée avec le courant de la ligne dans le but d'augmenter ou de diminuer la chute de tension réactive à travers la ligne et par conséquent contrôler l'énergie électrique transportée.

### II.5.2. Principe de fonctionnement

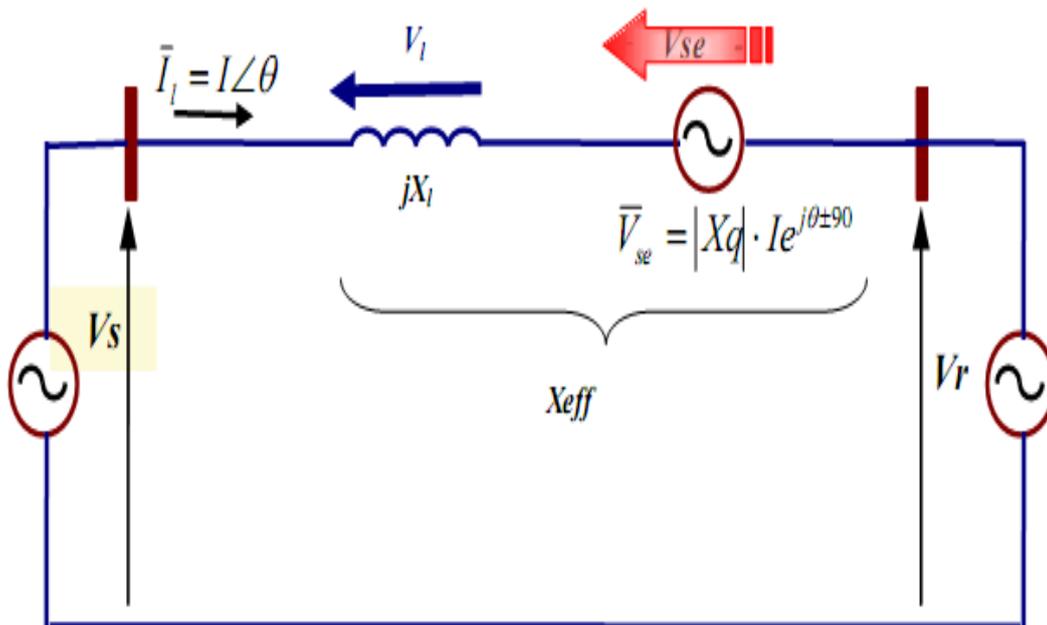
Le SSSC est un générateur statique de la famille des compensateurs séries fonctionnant sans source d'énergie extérieure. Son principe de fonctionnement peut être expliqué en ce référant au schéma et au phaseur de la figure II-7-b [18].



**Figure II.7.b. Schéma du principe de fonctionnement d'un SSSC**

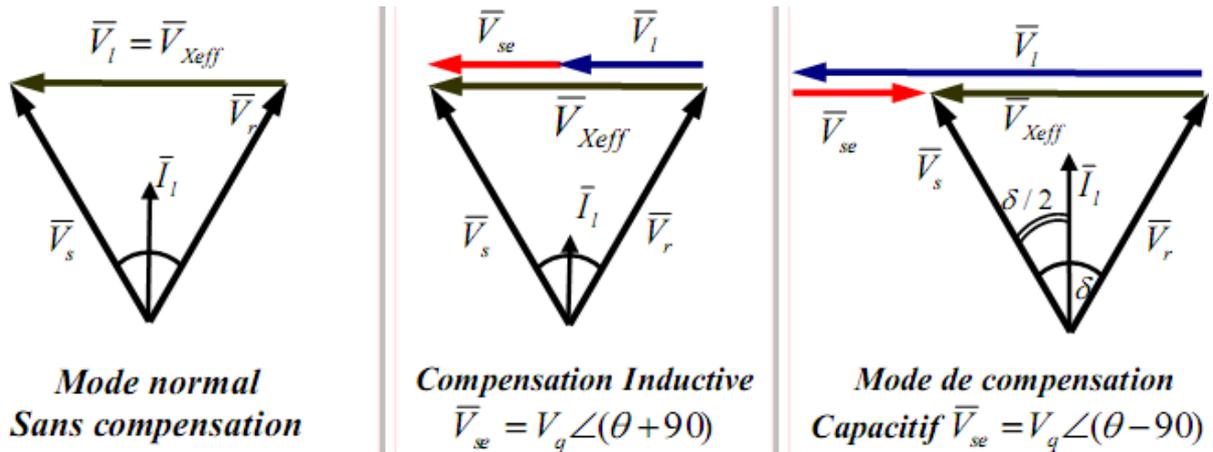
Le SSSC délivre une tension triphasée  $V_{se}$ , à la fréquence du réseau, en quadrature ( $\pm 90^\circ$ ) avec le courant de la ligne et contrôlable afin d'augmenter ou diminuer la tension à travers la ligne représentée par sa réactance  $X_l$  selon le mode de compensation (inductif ou capacitif) illustré dans la figure II-7-c, mais comme la réactance de la ligne ne varie pas réellement, c'est le courant dans la ligne qui sera affecté par cette variation et par conséquent les puissances correspondante.

Idéalement la tension  $V_{se}$  est à  $\pm 90^\circ$  du courant de la ligne ce qui fait qu'aucun échange de puissance active du réseau et le SSSC ne se produit [14].



**Figure II.7.c. Schéma équivalent d'une ligne électrique en présence d'un SSSC**

On peut expliquer les différents modes de compensation en se référant aux diagrammes vectoriels de la figure II-7-d en admettant le schéma équivalent d'un SSSC installé dans un réseau électrique simple représenté sur la figure II-7-c.



**Figure II.7.d. Représentation de Fresnel des modes de compensation du SSSC**

- Le diagramme de la figure (a) 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.  $k : \% \text{ compensation} = \frac{X_c}{X_l} \cdot 100$  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 capacitif, le courant de la ligne augmente avec l'augmentation de degré de compensation de 0% à 100%.

Dans la compensation série en considérant le schéma équivalent de la figure II-7-c, le courant dans la ligne est donné par l'équation suivante :

$$\vec{I}_l = \vec{I}_{se} = \frac{\vec{V}_s - \vec{V}_r - \vec{V}_\delta}{j X_l} \dots\dots (II-16).$$

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

$$S_{SSC} = (\vec{V}_s - \vec{V}_r) \cdot \vec{I}_{se}^* = \frac{|\vec{V}_s - \vec{V}_r|^2 - (\vec{V}_s - \vec{V}_r) \cdot \vec{V}_\delta}{j X_l} = P_{SSC} + j Q_{SSC} \dots\dots\dots (II-17).$$

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

$$P_{SSC} = \frac{V_s V_r \sin(\theta_r - \alpha) - V_s V_\delta \sin(\theta_s - \alpha)}{X_l} \dots\dots\dots (II-18).$$

$$Q_{SSC} = \frac{-V_s (V_r \cos(\theta_r - \alpha) + V_\delta \cos(\theta_s - \alpha)) + (V_r^2 \cos(\theta_r - \alpha) - 2V_s V_r \cos(\theta_s - \alpha))}{X_l} \dots\dots\dots (II-19).$$

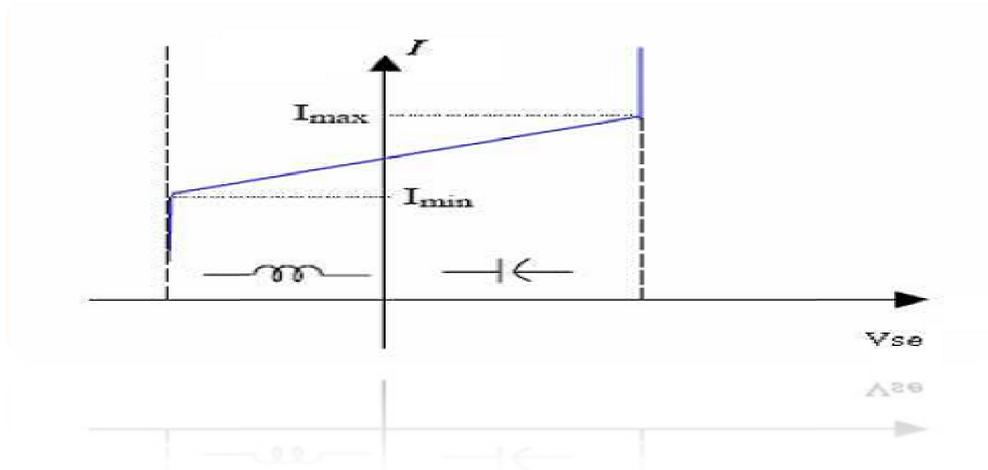
$V_s, V_r$  et  $V_{se}$  : modules des tensions  $\vec{V}_s, \vec{V}_r$  et  $\vec{V}_{se}$  respectivement.

$\theta_s, \theta_r$  et  $\alpha$  : phases des tensions  $\vec{V}_s, \vec{V}_r$  et  $\vec{V}_{se}$  respectivement.

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

$$P_{SSC} = 0 \Leftrightarrow V_s (V_r \sin(\theta_r - \alpha) - V_s \sin(\theta_s - \alpha)) = 0 \dots\dots (II-20).$$

Sa caractéristique statique est donnée sur la figure II-7-e.



**Figure II.7.e. Caractéristique statique du SSSC**

### II.5.3. 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 Fig2-7-d sur laquelle on constate que l'angle de phase du courant de la ligne est  $\delta/2$  ; l'expression du courant sera :

$$I_l = \frac{[V_s \sin(\delta) + V_{se} \cos(\frac{\delta}{2})] + j[V_s \cos(\delta) + V_{se} \sin(\frac{\delta}{2})]}{X_l} \dots\dots\dots (II-21).$$

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

$$P_{SSC} = \frac{V^2}{X_l} \sin \delta + \frac{V * V_{se} \cos(\frac{\delta}{2})}{X_l} \dots\dots\dots (II-22)$$

$$Q_{SSC} = \frac{V^2}{X_l} (1 - \cos \delta) - \frac{V * V_{se} \sin(\frac{\delta}{2})}{X_l} \dots\dots\dots (II-23).$$

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  $\frac{V * V_{se} \cos(\frac{\delta}{2})}{X_l}$  et  $\frac{V * V_{se} \sin(\frac{\delta}{2})}{X_l}$  ; ces puissances additionnelles sont en fonction de la tension injectée du SSSC [18].

## II.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des notions fondamentales sur les puissances active et réactive transmises et la chute de tension ainsi que les différents paramètres influant.

## **Compensation des Perturbations par DVR**

---

Ensuite, nous avons présenté les différents types de compensation, puis les différentes structures des dispositifs de transmission des systèmes en courant alternatif *FACTS*. Enfin, la description, le principe de fonctionnement et l'effet sur une ligne électrique d'un DVR ont été donnés.

Nous avons choisi d'étudier SSSC (Static Synchronous Serie Compensator) ou DVR comme dispositif *FACTS* pour l'atténuation des perturbations dans le réseau électrique de distribution et de transport. Une étude concernant la modélisation et la simulation sous MATLAB par la méthode heuristique sera détaillée dans les prochains chapitres.

# CHAPITRE III

## III.1. Historique

C'est à partir de 1965, que l'ensemble flou apparaît pour la première fois par une publication de M<sup>r</sup> LOTFI A-ZADEH de l'université de BARKELEY aux USA.

Parallèlement, certains chercheurs se sont penchés sur la résolution par logique floue de problèmes réputés difficiles.

Ainsi en 1975 apparaît la première application de la logique floue sur la conduite d'un moteur à vapeur par M<sup>r</sup> 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.

C'est au JAPON qu'elle a pris un développement rapide (fin des années 1980), qu'elle ne restait pas théorique mais également applicative surtout, sur les produits à grands publics (machine à laver, caméscope estampillé, photographiques), l'industrie (traitement des eaux, grues portuaire, systèmes de ventilations et climatisation), et en fin dans des domaines très différents tels que les finances et le diagnostique médical.

A partir des années 90, c'est en Allemagne que l'application de la logique floue apparaît à grand nombres d'applications variées, ainsi qu'aux USA à moindre échelle, pour devenir enfin une réalité en France plus tard [22].

## III.2. Introduction

La commande floue est une commande non-linéaire ayant des propriétés de robustesses, et possède la capacité de prendre en charge le traitement des variables imprécises et d'en déduire des décisions objectives, par connaissance des données approximatives de sorties et du comportement du système.

La régulation par logique floue est apte à fournir une commande efficace en choisissant les fonctions d'appartenance (triangulaire, trapézoïdale et gaussienne) de manière appropriée et en établissant une base de règles, la non-linéarité peut être compensée dans le système à régler.

Aussi elle 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 flou.
- **Inférence** : les ensembles flous sont reliés et comparés avec les différentes règles.
- **Defuzzification** : l'ensemble flou de sorti est converti en valeur de sortie nette.

## III.3. Avantages et Intérêts d'un Régulateur Flou

### III.3.1. Avantages

- La connaissance humaine à une situation quelconque est généralement imparfaite.
- L'être humain résout souvent des problèmes complexes à l'aide de données approximatives.
- Dans l'industrie, les opérateurs résolvent souvent des problèmes complexes de manière relativement simple et sans s'avoir besoin de modéliser le système.

- Plus la complexité du système augmente, moins il est possible de faire des affirmations précises sur son comportement.
- Plutôt que de modéliser le système, il est souvent intéressant de modéliser le comportement d'un opérateur humain face au système [22].

### III.3.2. Intérêts

- Prendre en compte une expertise existante de nature qualitative.
- Prendre en compte des variables qu'on sait intégrer difficilement dans la boucle.
- Améliorer le fonctionnement du contrôleur classique par autoréglage ou modification de leurs sorties en fonction des événements [22].

## III.4. Rappels des principes de la logique floue

### III.4.1. Ensemble flou

La notion d'ensemble flou a été proposée par Zadeh 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, les humains manipulant au quotidien.

Mathématiquement, un ensemble classique peut être vu comme une généralisation du concept d'ensemble ordinaire dont la fonction d'appartenance prend juste deux valeurs [0, 1] (ensemble Booléen) [23].

$$\mu_F(x) = \begin{cases} \mu_F = 1 & x \in \mu_F \\ \mu_F = 0 & x \notin \mu_F \end{cases} \dots\dots\dots (III-1).$$

Ainsi, un ensemble flou F d'un univers de discours  $\mu$  est caractérisé par une fonction d'appartenance notée  $\mu_F$  prenant des valeurs dans l'intervalle [0, 1], qui associe chaque élément x de  $\mu$  un degré d'appartenance  $\mu_F(x)$  indiquant le niveau d'appartenance de x à F. cette ensemble peut être continu ou discret.

**Définition 1** soient :

$\mu$  : Univers de discours.

x : L'élément générique de  $\mu$ .

$\mu_F$  : Collection continue ou discrète.

$$\mu_F : \mu \rightarrow [0,1]$$

$$F = \int_{\mu} \mu_F(x) / x \quad \text{si U est continu} \dots\dots\dots (III-2).$$

$$F = \sum_{i=1}^{\infty} \mu_F(x_i) / x_i \quad \text{si U est discret} \dots\dots\dots (III-3).$$

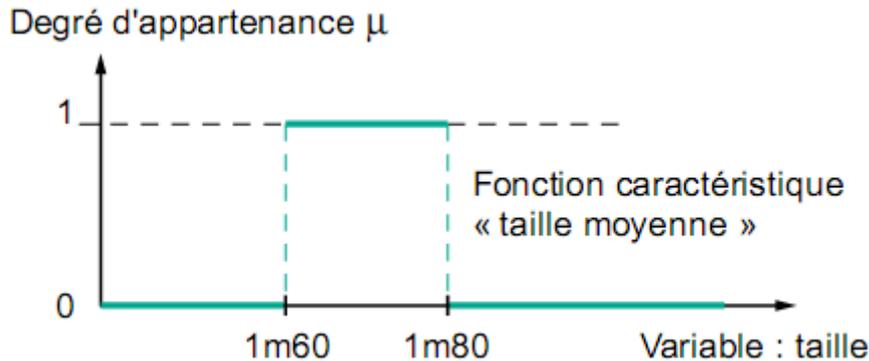
**Définition 2**

- Support d'un ensemble flou :  $\mu_F(x) = 0 \leq \mu_F(x) < 0,5$ .
- Point de commutation :  $\mu_F(x) = 0,5 \leq \mu_F(x) < 1$ .
- Point singleton:  $\mu_F(x) = 1$ .

### Exemple :

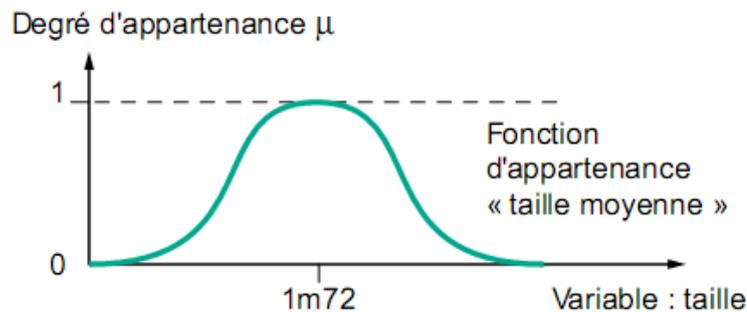
S'il on désire classer un groupe d'individus par leurs tailles en définissant la catégorie des petits par une taille inférieure à 160 cm, la catégorie des moyens comprise entre 160 cm et 180 cm et la catégorie des grands par une taille supérieure à 180 cm.

- La logique classique donne la représentation e la figure III-1-a, pour les trois variables « petite », « moyenne » et « grande » [24].



**Figure III-1-a Représentation des tailles d'un groupe d'individus par logique classique**

- Si l'on résout le même problème à l'aide de la logique floue, les variables ne sont plus binaires mais présente une infinité de valeurs possible entre « vrai » et « faux » comme le montre la Figure III-1-b.



**Figure III-1-b Représentation des tailles d'un groupe d'individus par logique floue**

On constate que cette représentation est beaucoup plus proche de la façon dont l'être humain raisonne puisqu'elle permet de faire intervenir des notions telles que plutôt petit assez grande etc.... Cet avantage se fait évidemment, au détriment de la simplicité de la représentation.

### III.4.2. Variables linguistiques

L'utilisation des ensembles flous constituent une voix favorisée pour la manipulation des concepts vagues et imprécis.

Une variable linguistique, peut être définie par un 5-uple  $(x, T(x), \mu, G$  et  $M)$  dans lequel :[25]

X : Le nom de la variable.

T(x) : Ensemble composé de sous-ensembles flous de  $\mu$  qui caractérisent x.

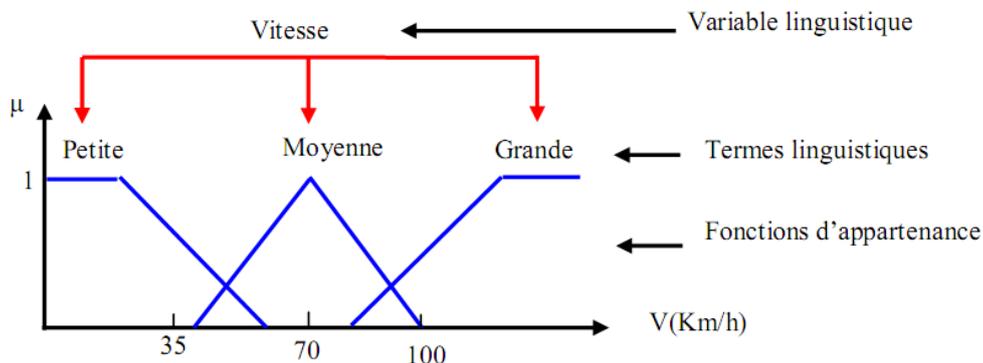
$\mu$  : Univers de discours.

G : Règle syntaxique pour la génération des noms des valeurs de x.

M : Règle sémantique qui associe à chaque valeur un sens.

### Exemple

Si la vitesse est interprétée comme une variable linguistique, alors son ensemble de termes linguistiques T (vitesse) peut être : T (vitesses) = {lente, moyenne, rapide, ...etc} où chaque terme dans T (vitesse) est caractérisé par un ensemble flou dans un univers de discours  $\mu = [0, 100]$  comme le montre la figure III-2-a.



**Figure III-2-a Représentation d'un terme linguistique**

### III.4.3. Représentation des fonctions d'appartenance

On représente les variables linguistiques par leurs fonctions d'appartenances. Donc à chaque *sous ensemble flou*  $F_i$  est associé une *fonction d'appartenance*  $\mu_{F_i}(x)$  ou  $x$  est la *variable linguistique*. Tel que, à chaque point  $x$  est associé une valeur précise  $\mu_{F_i}(x)$ , qui désigne, *le degré d'appartenance de  $x$  à  $F_i$* . [22], [26].

La fonction d'appartenance peut être représentée par plusieurs formes : triangulaire, trapézoïdale, sinusoïdale et gaussienne. Les formes citées sont illustrées sur la Figure III-2-b :

#### III.4.3.1. Fonction triangulaire

Elle est définie par trois paramètres (a, b, c), qui déterminent les coordonnées des trois sommets :

$$\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \dots\dots\dots (III-4).$$

#### III.4.3.2. Fonction trapézoïdale

Elle est définie par quatre paramètres (a, b, c, d), qui déterminent les coordonnées des quatre sommets :

$$\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}\right), 0\right) \dots\dots\dots (III-5).$$

### III.4.3.3. Fonction sinusoïdale

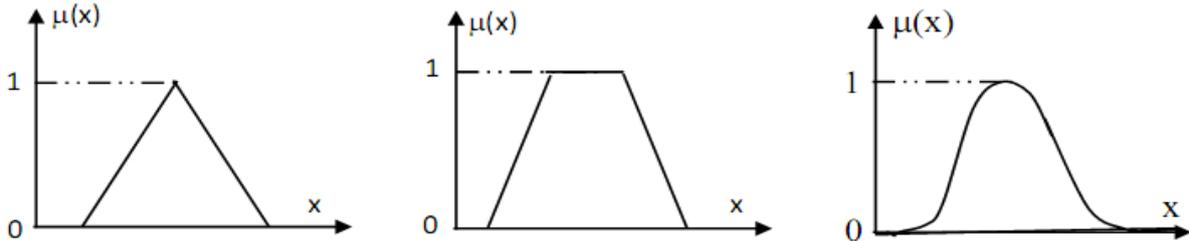
Elle est définie par deux paramètres (a, b) :

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + e^{-x(p - a - b)}} \dots\dots\dots (III-6).$$

### III.4.3.4. Fonction gaussienne

Elle est définie par deux paramètres ( $\sigma, m$ ) :

$$\mu(x) = \exp - \left( \frac{(x - m)^2}{2 \sigma^2} \right) \dots\dots\dots (III-7).$$



**Figure III-2-b Différents types des fonctions d'appartenance**

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

Soient A et B deux ensembles flous dans  $\mu$  ayant respectivement  $U_A$  et  $U_B$  comme fonction d'appartenance. [22]

**III.4.4.1. Egalité :**  $A = B \Leftrightarrow \forall x \in \mu, \mu_A(x) = \mu_B(x) \dots\dots\dots (III-8)$

**III.4.4.2. Inclusion :**  $A \subset B \Leftrightarrow \forall x \in \mu, \mu_A(x) \leq \mu_B(x) \dots\dots\dots (III-9)$

**III.4.4.3. Union :**

$$\mu_A \cup \mu_B = \text{Max} \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \} \dots\dots\dots (III-10)$$

$$\mu_A \cup \mu_B = \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \cdot \mu_B(x) \dots\dots\dots (III-11)$$

**III.4.4.4. Intersection :**

$$\mu_A \cap \mu_B = \text{Min} \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \} \dots\dots\dots (III-12)$$

$$\mu_A \cap \mu_B = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x) \dots\dots\dots (III-13)$$

**III.4.4.5. Complémentation :**  $\mu_A(x) = 1 - \mu_B(x) \dots\dots\dots (III-14)$

### III.4.5. Raisonnement en logique floue

En logique classique, le raisonnement est de la forme :

$$f(x) = \begin{cases} \text{Si } P \text{ Alors } q \\ \text{Si } p \text{ est vrai Alors } q \text{ est vrai} \end{cases} \dots\dots\dots (III-15)$$

En logique floue, le raisonnement flou, appelé aussi raisonnement approximatif se base sur des règles floues qui sont exprimées en langage naturel en utilisant les variables linguistiques dont nous avons donné la définition précédemment. En raisonnement approché, il y a deux règles d'inférence floue importante proposées par Zadeh nommées « *Modus Ponens Generalise* » (MPG) et « *Modus Tollens Generalise* » (MTG).

### III.4.6. Structure générale d'un contrôleur flou

Chaque système basé sur la logique floue est composé de quatre blocs principaux illustrés par la figure III-3-a.

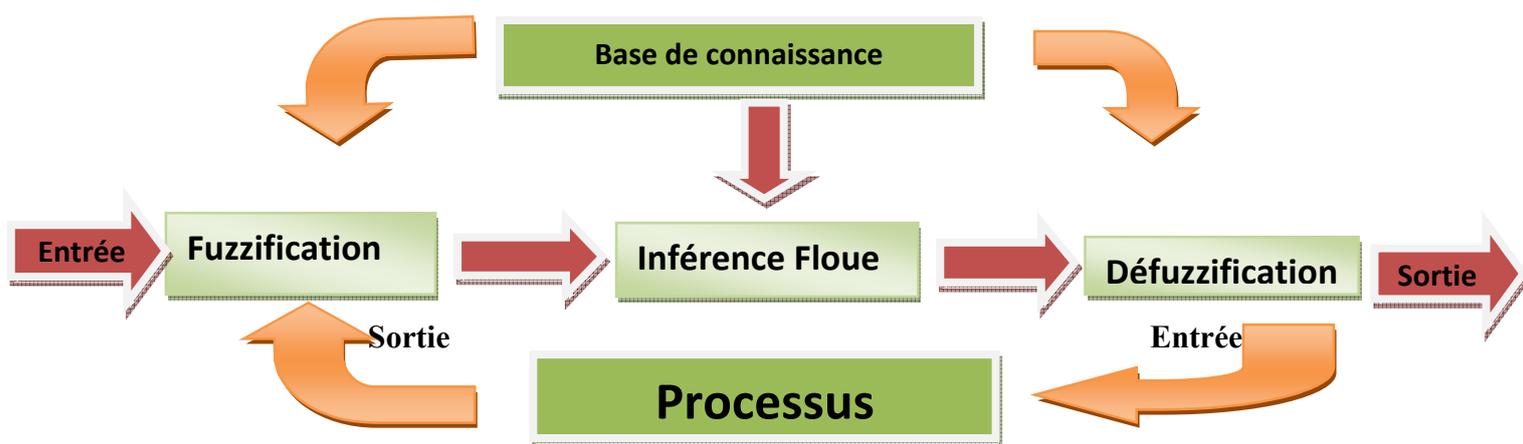


Figure III-3-a Structure générale d'un système basé sur la commande floue

- Base de connaissance de règles.
- La fuzzification des variables d'entrées, avec éventuellement un prétraitement de l'information.
- L'inférence à partir d'une base de connaissance.
- La defuzzification, avec éventuellement un post-traitement de l'information.

A l'aide du schéma synoptique précédent, nous pouvons maintenant faire apparaître les éléments de modélisation d'un contrôleur flou :

#### III.4.6.1. Stratégie de fuzzification

Consiste à transformer les valeurs réelles en valeurs linguistiques.

#### III.4.6.2. Base de données

- Discrétisation/normalisation des univers de discours.
- Partition floue des espaces d'entrées et de sorties.
- Choix des fonctions d'appartenances.

#### III.4.6.3. 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.4.6.4. Logique de prise de décision

- Définition d'une implication floue.
- Interprétation des connecteurs de phases ET et AUSSI.
- Mécanisme d'inférence.
- Définition d'un opérateur de composition de règle.

## III.4.6.5. Stratégie de defuzzification

Consiste à transformer les valeurs floues en valeurs physiques (réelles).

## III.4.7. Régulateur flou

La commande floue a les mêmes objectifs de régulation et de poursuite qu'une commande réalisée en automatique classique. Cependant, il est possible de se passer d'un modèle explicite du procédé à commander. C'est le plus souvent, le savoir faire d'un expert ou d'opérateur qualifié manipulant le procédé qui est pris en compte pour l'élaboration de la loi de commande.

Cette approche est basée sur deux concepts essentiels : celui de la décomposition d'une plage de variation d'une variable sous forme de nuances linguistiques et sur des règles provenant de l'expertise de l'opérateur humain, qui s'exprime, sous forme linguistique, comment doivent évoluer les commandes du systèmes en fonction des variables observées : « *Si l'erreur est plus grande et la variation de l'erreur est plus grande, alors la variation de sortie est plus grande* ».

Ces concepts sont basés sur une partie de la théorie des ensembles flous introduite par Zadeh.

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

- la fuzzification qui permet de passer de valeurs réelles en valeurs linguistiques,
- le cœur du régulateur représenté par les règles reliant les entrées et les sorties,
- et enfin l'inférence et la défuzzification qui permettent à partir des ensembles flous d'entrées de déterminer la valeur réelle de sortie comme l'illustre la Figure III-3-b [22].

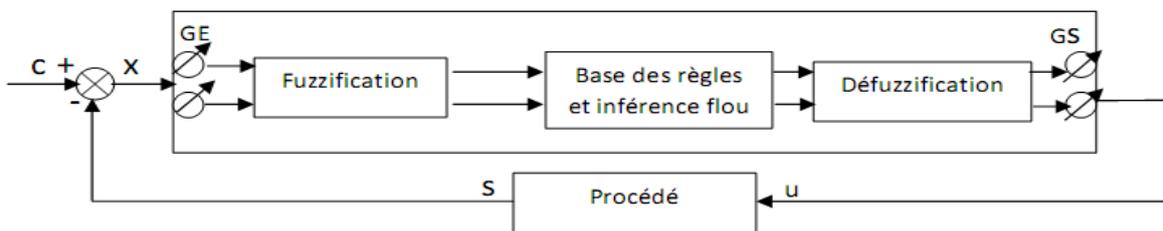


Figure III-3-b Schéma d'une boucle de régulation à contrôleur flou

### III.4.7.1. La fuzzification des entrées

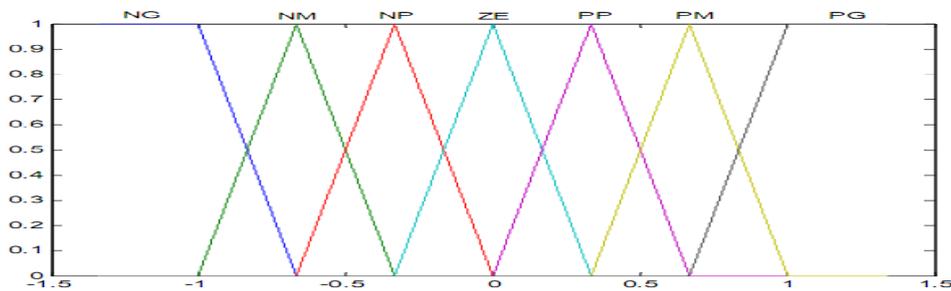
L'objectif de la fuzzification est de transformer les variables déterministes d'entrées en variables floues, c'est-à-dire en variables linguistiques, en définissant des fonctions d'appartenance pour ces différentes variables d'entrées.

Les grandeurs physiques d'entrées  $X$  sont réduites à des grandeurs normalisées  $x$  dans une plage de variation, souvent  $[-1, 1]$ , appelée univers de discours, qui peut être soit discret, soit

continu. Bien souvent, cet univers de discours est borné, en appliquant une limitation sur la valeur numérique de  $|x| \leq 1$ , pour pallier au problème des grandes variations de X. les gains de normalisation caractérisent des facteurs d'échelles d'entrées x et X.

Dans le cas d'un univers de discours continu, le nombre de valeurs linguistiques (négative petite, négative moyenne, positive grande,...etc), représentées par des fonctions d'appartenances, pour une variable  $x_1$  peut varier (par exemple trois, cinq, sept). Un exemple de fuzzification continue est illustré dans la Figure III-4-a pour une seule variable de x, avec les fonctions d'appartenance triangulaire ; les valeurs linguistiques correspondantes sont caractérisées par des symboles tels que : [26]

NG : Négative Grand ;                      NM : Négative Moyen ;                      NP : Négative Petit ;  
 ZE : Zéro environ ;                      PP : Positive Petit ;                      PM : Positive moyen ;  
 PG : Positive Grand ;



**Figure III-4-a Fuzzification continue avec sept fonctions d'appartenance**

### III.4.7.2. Base des règles et inférence floue

Les règles floues représentent le cœur du régulateur, et permettent d'exprimer sous forme linguistique les variables d'entrées du régulateur aux variables de commande du système.

Un type de règle peut être par-exemple :

Si  $x_1$  est « positive grand » ET  $x_2$  est « zéro environ » alors u est « négative grand ».

Où  $x_1$  et  $x_2$  représentent les variables d'entrées du système tels que l'écart de réglage et sa variation et u la commande du système. L'expérience dans l'élaboration de ces règles joue un rôle important. La représentation graphique de l'ensemble des règles, appelée matrice d'inférence ou table de règles, permet de synthétiser le cœur du régulateur flou.

Le Tableau III-1 représente l'inférence pour les deux variables linguistiques d'entrée, l'écart et sa variation et la variable de sortie. [23]

e $\Delta e$	NG	NM	NP	ZE	PP	PM	PG
NG	NG	NG	NG	NG	NM	NP	ZE
NM	NG	NG	NG	NM	NP	ZE	PP
NP	NG	NG	NM	NP	ZE	PP	PM
ZE	NG	NM	NP	ZE	PP	PM	PG
PP	NM	NP	ZE	PP	PM	PG	PG
PM	NP	ZE	PP	PM	PG	PG	PG
PG	ZE	PP	PM	PG	PG	PG	PG

**Tableau III-1 Exemple de calcul de la variation de commande  $\Delta U$**

**III.4.7.3. La défuzzification**

La defuzzification consiste à prendre une décision, c'est-à-dire, obtenir une commande réelle à partir de la commande introduite sous forme d'ensemble flou. Dans le cas d'un raisonnement basé sur l'inférence de règles floues, plusieurs méthodes existent. Les plus couramment utilisées sont : [27]

**1. Méthode du centre gravité**

Cette méthode est la plus utilisée dans les contrôleurs flous. Elle génère le centre de gravité de l'espace flou d'une action de contrôle (commande).

Dans le cas d'un univers de discours discret, cette méthode produit :

$$U_0 = \frac{\sum_1^n \mu_F(x_i) \cdot x_i}{\sum_1^n \mu_F(x_i)} \dots\dots\dots (III-16).$$

N : le nombre des niveaux de quantification de la sortie du contrôleur

**2. Méthode de moyenne de maximum**

Cette stratégie génère une commande qui représente la valeur moyenne de toutes les actions de contrôle locales ayant des fonctions d'appartenance maximales.

Plus spécialement, dans le cas d'un univers de discours discret, l'action de commande peut être exprimée comme suit :

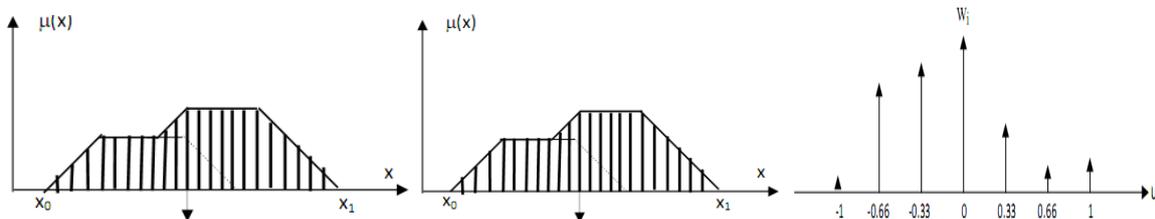
$$U_0 = \sum_1^L \frac{x_i}{L} \dots\dots\dots (III-17).$$

$X_i$ : est la valeur de la commande locale avec laquelle la fonction d'appartenance associée atteint la valeur maximale  $\mu_F(x_i)$ .

L : est le nombre total des valeurs prises par la fonction d'appartenance.

**3. Méthode de moyenne pondérée**

La commande est égale à la commande locale ayant la fonction d'appartenance maximale.



**Figure III-4-b Défuzzification par les différentes méthodes**

**III.5. application d'un régulateur flou pour le DVR**

Soit « e » l'erreur mesure-consigne,  $\Delta e = e_k - e_{k-1}$  les règles induites par la commande sont du type :

$$\Delta U_k = K_{\Delta e} \cdot \Delta e + K_e \cdot e \dots\dots\dots (III-18)$$

Où :

$K_{\Delta e}$  et  $K_e$  sont les composantes proportionnelles et intégrales choisis en fonction des prédicats associés à  $e$  et  $\Delta e$ .

$\Delta U_k$  est l'incrément de commande

- **fuzzification**

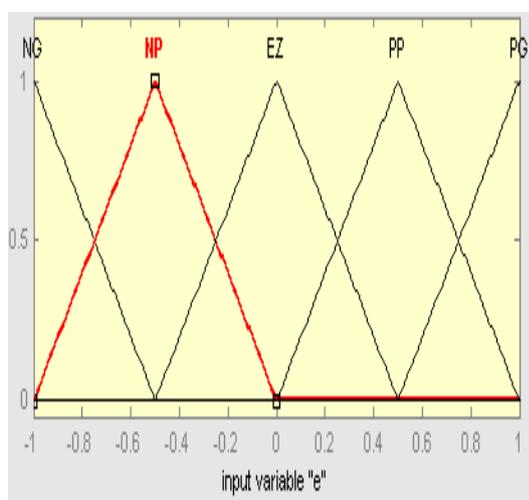
On considère pour chaque variable de mesure (l'erreur et sa variation) cinq sous-ensembles flous notés  $\{NG, NP, ZE, PP, PG\}$ , définis sur l'ensemble des réels.

De plus, on admet cinq actions possibles pour la variation de la sortie de commande définies par les sous-ensembles flous  $\{NG, NP, ZE, PP, PG\}$  sur l'univers de discours  $[e, \Delta U]$ .

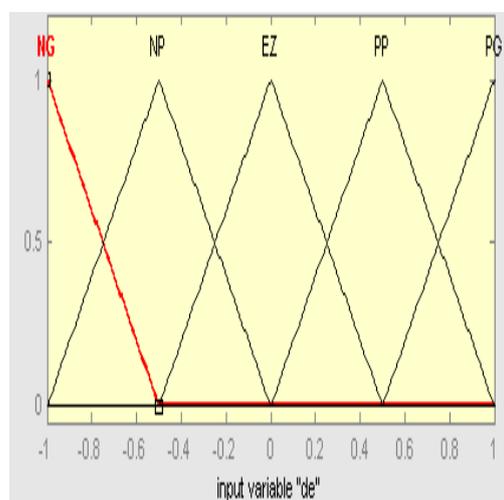
Avec :

NG : Négative Grand, NP : Négative Petit, ZE : Zéro, PP : Positive Petit, PG : Positive Grand.

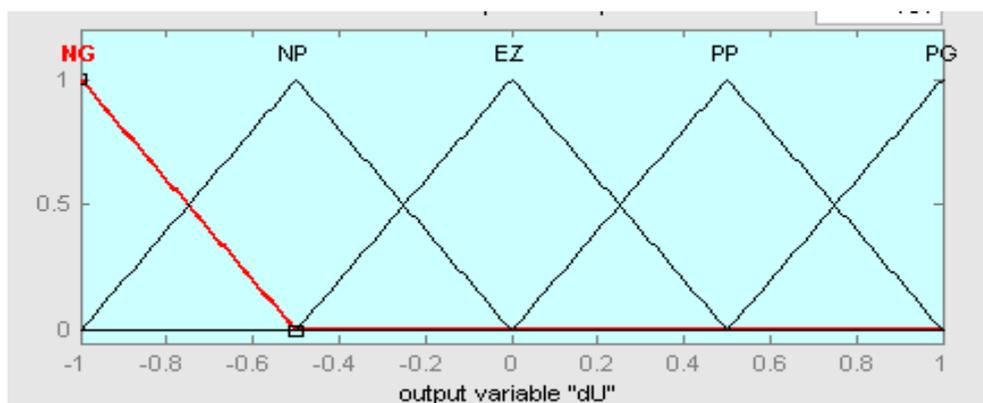
La figure III-5-a, III-5-b et III-5-c représente l'allure de ces différents sous-ensembles flous.



**Figure III-5-a** Fonction d'appartenance De l'entrée 'e'



**Figure III-5-b** Fonction d'appartenance De l'entrée 'de'



**Figure III-5-c** Fonctions d'appartenance de la sortie 'dU'

- **Base de règle**

Le nombre de règle tirées à partir du plan de phase est égale à  $5 \times 5 = 25$  comme le montre le tableau III-2 suivant :

## Régulation par Logique Floue

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

**Tableau III-2 Calcul de la variation de sortie ‘dU’ par la méthode de Mamdani**

- Et la méthode de défuzzification, nous avons choisie la méthode du centre de gravité.

### III.6. conclusion

Ce chapitre, à fait l’objet de l’application de commande par logique floue sur un DVR, l’objet principal étant la régulation de la tension de sortie du réseau.

Nous avons présenté la théorie de la logique floue afin de l’utiliser pour contrôler le système.

Enfin, nous avons choisi un régulateur PI-flou.

# CHAPITRE IV

## IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, on traitera le cas d'un contrôle de tension aux bornes d'une charge à l'aide d'un DVR commandé en courant. L'intérêt de cette commande, par rapport aux autres types, réside dans la simplicité des équations utilisées pour l'identification puisqu'elle n'utilise ni PLL, ni transformation de Park, d'où une sensibilité moindre aux perturbations affectant la tension réseau. De plus, cet algorithme permet la compensation de plusieurs perturbations simultanément.

Enfin, pour clôturer notre travail, nous allons étudier le comportement du DVR par simulations numériques effectuées à l'aide du logiciel Matlab/Simulink et ce, vis-à-vis de diverses perturbations enregistrées dans un réseau MT alimentant une charge sensible.

## IV.2 Présentation du système à simuler

Dans notre cas de simulation, nous avons utilisé un réseau triphasé classique composé d'une source triphasée sinusoïdale variable en amplitude, phase et fréquence, ligne et charge comme illustré sur la figure IV-1 paramétrées (30kV, 50 Hz  $[R_1, R_0] = [0.1, 0.15]$ ,  $[L_1, L_0] = [0.3e-3, 0.45e-3]$ ,  $[C_1, C_0] = [9e-12, 18e-12]$  pour les lignes, 1.5MW, 0.62MVar pour la charge sensible et 0.62MVar pour la charge non sensible). Nous nous intéresserons à la réaction du DVR lors de perturbations affectant l'amplitude ou phase de tension ; les perturbations choisies sont : creux de tension, sursension, fluctuation de tension, déséquilibre du système triphasé et variation de fréquence.

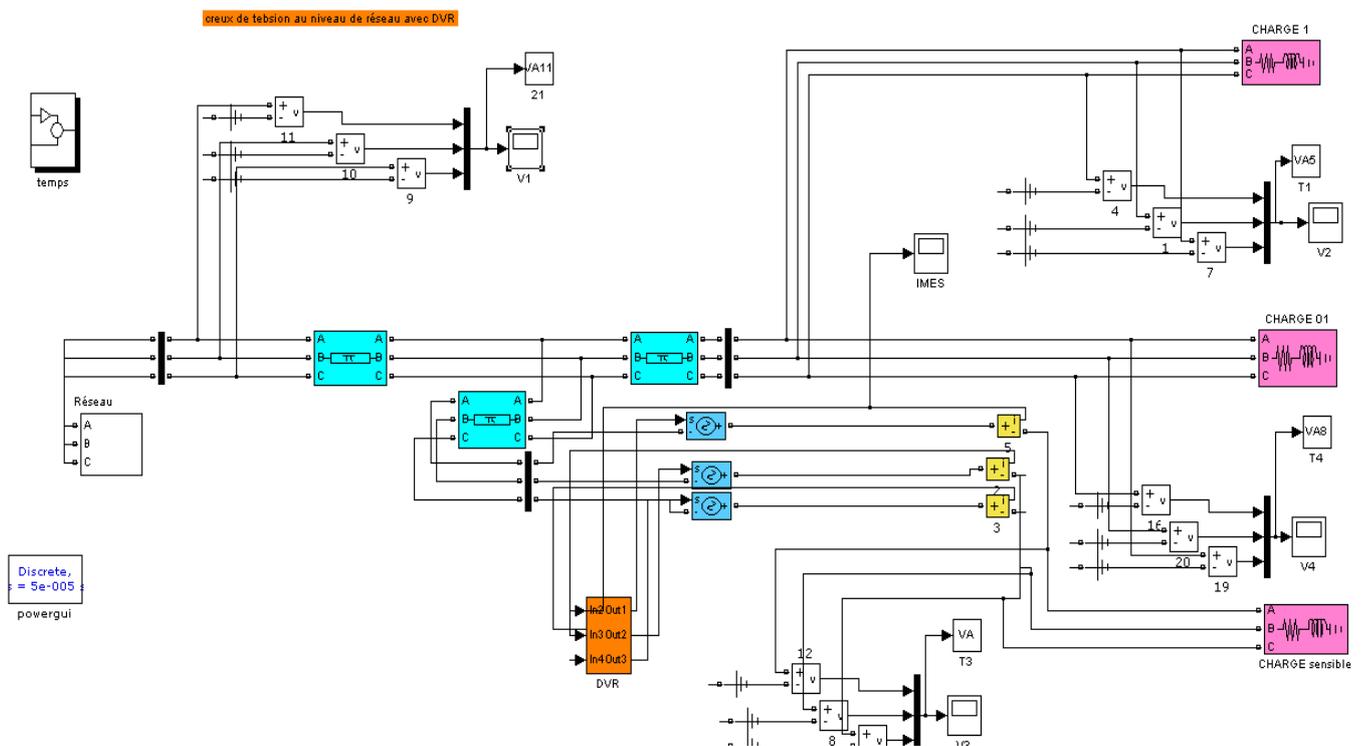
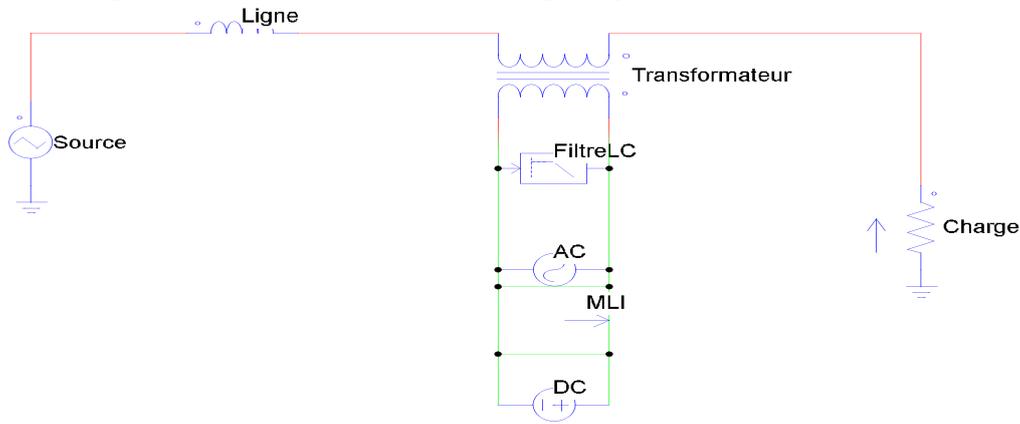


Figure IV-1 Schéma réseau simple équipé d'un dispositif FACTS série –DVR–

## IV.3 Technologie et principe de fonctionnement

La figure IV-2 représente le DVR inséré dans le système à étudier. Il est composé d'un onduleur de tension commandé en courant 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 LC de deuxième ordre et un transformateur de couplage dont le secondaire est inséré en série avec le réseau qui alimente l'élément sensible à protéger



**Figure IV-2 Schéma équivalent du système**

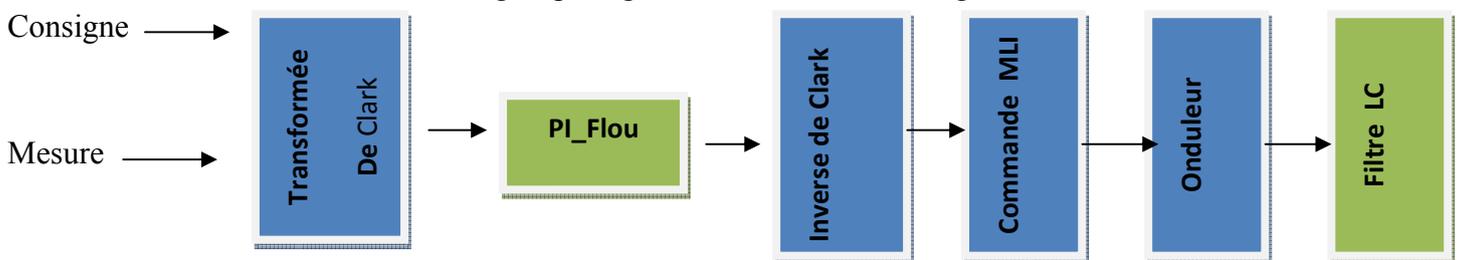
Durant son fonctionnement, le DVR permet d'injecter, en série au réseau, une tension fidèlement opposée à la perturbation enregistrée dans ce dernier. La détection, l'identification et la génération de cette tension sont obtenues grâce à un dispositif associé à une commande qui pilote l'onduleur et qui reproduit fidèlement la perturbation à compenser.

## IV.4 Stratégie de contrôle du DVR

Il existe deux types de perturbations :

- Celles qui engendrent seulement une variation d'amplitude de tension ; et,
- Celles qui engendrent, en plus, un saut de phase de la tension,  $\bar{V}_s$ , imposée par le réseau à l'entrée du DVR

La tension,  $V_{inj}$ , injectée en série au réseau par le DVR, piloté par une stratégie de compensation, dépendra du type de la perturbation à compenser afin d'obtenir la tension désirée aux bornes de la charge à protéger comme le montre la figure IV-3.



**Figure IV-3 Algorithme de commande du DVR**

Les diverses stratégies de commande élaborées par différents auteurs s'appuient sur une multitude de méthodes d'identification des perturbations, l'énergie mise en jeu par le DVR pour assurer la compensation et le but assigné à celui-ci. 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 Park 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 ce, particulièrement, dans le cas d'un déséquilibre.

$$[A_{M(1,2,h)}] = [T]^{-1} \cdot [A_{M(\alpha,\beta,0)}] \dots \dots \dots (IV-1).$$

Où :

$$[T] = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \sqrt{2} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (IV-2).$$

[T] : représente la matrice de transformation de Clark et [A], la matrice des courants ou tensions, puis :

$$[T]^{-1} = [T]^t = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \sqrt{2} & 0 & 1 \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} & \sqrt{\frac{3}{2}} & 1 \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\sqrt{\frac{3}{2}} & 1 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (IV-3).$$

Par ailleurs :

- Les composantes symétriques des grandeurs (courant ou tension) en fonction des grandeurs réelles mesurées sont données par l'équation suivante :

$$[A_{M(1,2,h)}] = [K] \cdot [A_{M(a,b,c)}] \dots \dots \dots (IV-4).$$

Où :

[K] : est la matrice de transformation de Fortescue donnée par la relation suivante :

$$[K] = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (IV-5).$$

Avec :  $\alpha = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$  opérateur vectoriel.

Ainsi, les deux matrices, des composantes symétriques des grandeurs mesurées et de leurs composantes dans le référentiel de Clark, sont reliées par l'expression suivante :

$$[A_{M(1,2,h)}] = [D][A_{M(\alpha,\beta,0)}] \dots \dots \dots (IV-6).$$

$$[D] = [K][T]^t = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & j\frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & -j\frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (IV-7).$$

Des deux relations précédentes, on déduit les expressions donnant les différentes composantes symétriques du courant ou tension en fonction de leurs composantes dans le référentiel de Clark : [9]

$$A_1 = \frac{1}{\sqrt{6}} [ A_\alpha + j A_\beta ]$$

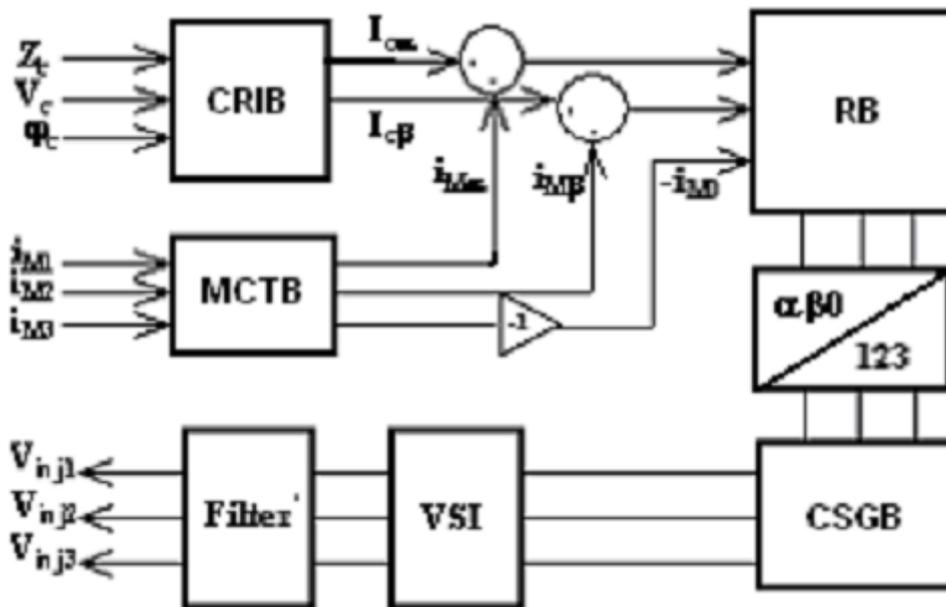
$$A_2 = \frac{1}{\sqrt{6}} [ A_\alpha - j A_\beta ] \dots\dots\dots (IV-8)$$

$$A_h = \frac{1}{\sqrt{3}} A_0$$

Du système d'équations (IV-8), on peut déduire que la composante homopolaire,  $A_h$ , ne dépend que de la composante de Clark,  $A_0$ , tandis que les deux autres (directe et inverse) de courant ou tension,  $A_1$  et  $A_2$ , dépendent des composantes de Clark sur les axes  $\alpha$  et  $\beta$ . Ainsi, on peut conclure que des contrôles séparés sur ces composantes peuvent être envisagés.

De ce qui précède, on déduit aussi que pour varier l'amplitude d'une perturbation affectant l'une des grandeurs (courant ou tension), il suffit de réguler ses composantes sur les axes  $\alpha$ ,  $\beta$  et 0 du référentiel de Clark.

Les différentes opérations utilisées et associées à cette commande sont résumées dans le bloc diagramme représenté sur la figure IV-4 suivante :



**Figure IV-4 Bloc diagramme de l'algorithme de commande du DVR**

Les trois courants de référence des trois phases d'intensité efficace  $I_c$ , sont déduits à partir de la tension,  $V_c$ , souhaitée aux bornes de la charge et de l'impédance,  $Z_c$ , de la charge.

Les composantes dans le référentiel de Clark, des courants de référence et mesurés sont ensuite comparées et les écarts qui en résultent sur chacun des axes  $\alpha$ ,  $\beta$  et 0 sont compensés

par des régulateurs de type PI-Flou puis transformés en grandeurs instantanées qui constituent les modulantes de la commande MLI de l'onduleur. Les tensions de ce dernier sont filtrées puis injectées à travers un transformateur de couplage, en série au réseau et en amont à la charge protégée.

### IV.5 Modélisation du système à étudier

Notre étude traite le système modélisé, entièrement, sous Matlab/Simulink.

#### IV.5.1 Bloc d'identification du courant de référence (BICR)

La compensation des écarts provoqués par les perturbations entre les grandeurs électriques, courants ou tensions, de référence et celles mesurées aux bornes de la charge à protéger, peut se faire directement en comparant leurs valeurs réelles ou les valeurs de leurs composantes dans un référentiel convenablement choisi.

Le traitement de déséquilibre de tensions (courants) apparaissant dans un système triphasé se fait, généralement, en décomposant un tel système en trois sous-systèmes équilibrés (direct, inverse et homopolaire). Les composantes des grandeurs, courants et tensions, dans ces dernières ont la propriété d'être, respectivement, proportionnelles à celles rapportées sur les axes  $\alpha$  et  $0$  et/ ou décalées d'un angle de  $90^\circ$  sur l'axe  $\beta$  du référentiel de Clark [11]. Ainsi, pour atténuer ce type de perturbation, il est judicieux d'effectuer des régulations directement sur les composantes des grandeurs, courants et tensions, dans ce référentiel. Notre choix s'est donc porté sur l'utilisation de cette transformation dans les circuits de détection et mesure des perturbations d'autant plus qu'elle présente aussi les avantages de ne pas véhiculer les perturbations harmoniques dans le circuits de commande et de ne pas faire appel à l'utilisation de la PLL pour la production des signaux de commande.

Le bloc BICR détermine les composantes suivant les axes  $\alpha$  et  $\beta$  du courant de référence dont la valeur efficace est donnée par la relation suivante :

$$I_c = \frac{V_c}{Z_c} = \frac{P}{3.V_c \cdot \cos\phi} \dots\dots\dots (IV-9)$$

Avec :

$I_c$ ,  $V_c$ ,  $Z_c$ ,  $\cos\phi_c$  et  $P$  représentant, les grandeurs de consignes (courant, tension, impédance, facteur de puissance et la puissance de la charge).

Si l'on désigne la tension,  $\bar{V}_s$  imposée par la source à l'entrée du DVR comme référence des phases, les composantes du courant de référence suivant les axes ( $\alpha$  et  $\beta$ ) du référentiel de Clark sont données par les relations suivantes :

$$I_{c\alpha} = \sqrt{3}.I_c \cos(\omega t + \gamma - \arg(I_c)) \dots\dots\dots (IV-10)$$

$$I_{c\beta} = \sqrt{3}.I_c \sin(\omega t + \gamma - \arg(I_c)) \dots\dots\dots (IV-11).$$

Où :  $\gamma$  représente la phase initiale de la tension de la source.

### IV.5.2 Bloc de transformation des courants mesurés (BTCM)

Le bloc BTCM détermine les composantes des courants mesurés suivant les axes ( $\alpha$ ,  $\beta$  et 0) de Clark et ce, en utilisant les relations (IV-1 et IV-2) précédentes.

### IV.5.3 Bloc de régulation

Les écarts entre les composantes des courants de références,  $I_c(\alpha, \beta, 0)$ , et celles des courants mesurés,  $I_m(\alpha, \beta, 0)$ , sont corrigés par des régulateur 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 [21].

### IV.5.4 Onduleur

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

Ainsi les grandeurs de sortie de l'onduleur en fonction des états de conduction de ses interrupteurs et de la tension continue sont données par l'expression matricielle suivante [21]:

$$\begin{bmatrix} V_{i n j} 1 \\ V_{i n j} 2 \\ V_{i n j} 3 \end{bmatrix} = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} 2U_1 & -U_2 & -U_3 \\ -U_1 & 2U_2 & -U_3 \\ -U_1 & -U_2 & 2U_3 \end{bmatrix} \cdot U_0 \dots\dots\dots (IV-12).$$

Où :  $\overline{V_{i n j}}$  représentent les tensions injectées par le DVR dans le réseau, les  $U_i$  représentent les états de conduction des composants et  $U_0$  la tension sur le bus continu.

## IV.6 Simulations et interprétations des résultats

Afin de discuter adéquatement les résultats de simulations de l'ensemble constitué par le réseau, le dispositif FACTS série (DVR) et la charge sensible, nous allons présenter nos résultats de simulations effectuées sous Matlab/Simulink en six (05) étapes : la première étape concerne la simulation avec une charge créant un creux de tension de 30% d'amplitude connectée au point de raccordement. La deuxième étape concerne la simulation avec une source génératrice de surtensions de 20% d'amplitude connectée au PCC. La troisième étape concerne la simulation d'un défaut de déséquilibre de tension causé par un court-circuit entre phase. La quatrième étape concerne une simulation d'une perturbation de type variation de fréquence. La cinquième et la dernière étape concerne une simulation de plusieurs types de perturbations.

### IV.6.1 Compensation d'un creux de tension triphasé

Dans cette partie de simulation, on va analyser la robustesse en termes de rapidité et de précision du dispositif FACTS série (DVR) lors de la compensation de creux de tension triphasé. Toutefois la charge génératrice des creux de tension au point commun de raccordement à la charge PCC sera simulée par une source de tension programmable paramétrée comme l'indique le tableau IV-1.

Parameters

Positive-sequence: [ Amplitude(Vrms Ph-Ph) Phase(deg.) Freq. (Hz) ]

[30e3 0 50]

Time variation of: Amplitude

Type of variation: Step

Step magnitude (pu, deg. or Hz):

-0.3

Variation timing (s) : [ Start End ]

[0.1 0.3]

Fundamental and/or Harmonic generation:

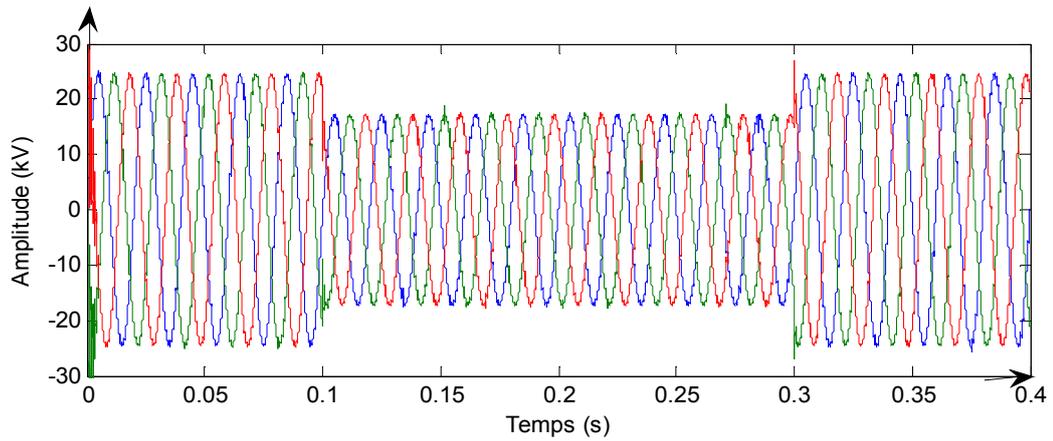
OK Cancel Help Apply

**Tableau IV-1 : Paramètres de la source générant un creux de tension**

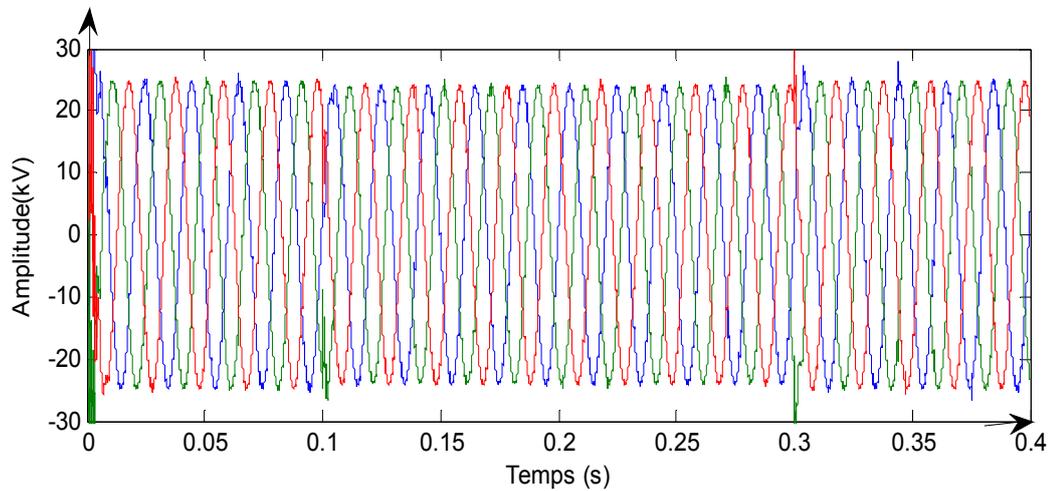
Comme illustré sur la figure IV-5-a, on remarque bien qu'à l'instant  $0,1 \leq t \leq 0,3$  s, l'amplitude de la tension est réduite de 30% par rapport à la tension fondamentale (25 kV), alors que la tension de la charge sensible est gardée toujours à la même valeur désirée comme le montre la figure IV-5-b.

Ceci est grâce au DVR qui, injecte à travers le filtre LC et le transformateur de couplage connectés en série au réseau reliant la charge sensible la tension manquante ou compensatrice comme l'illustre la figure IV-5-c.

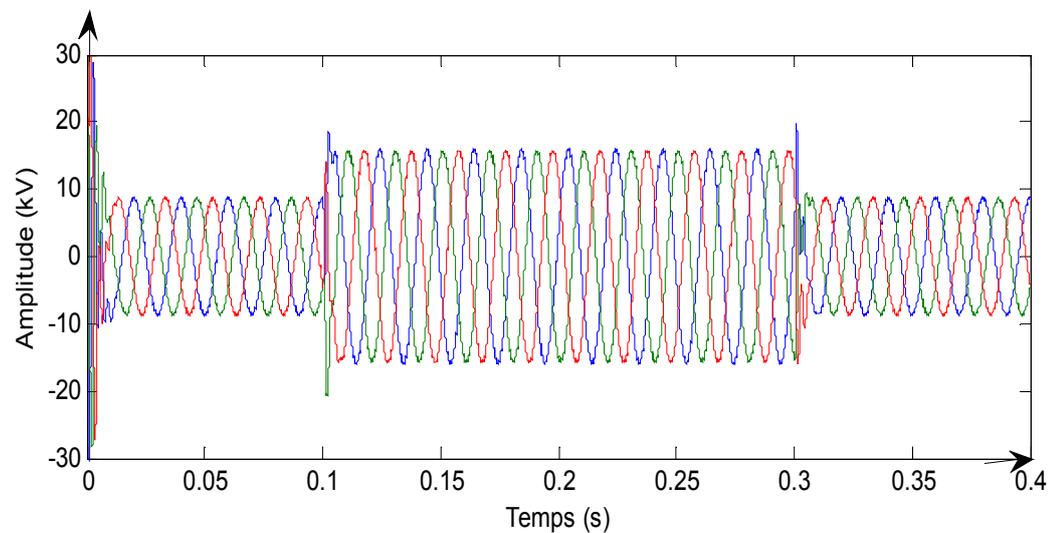
En résumé, durant le premier cycle de la tension source, le DVR corrige adéquatement et efficacement le creux de tension au point de raccordement de la tension d'alimentation de la charge à protéger. En plus à partir de plusieurs essais de simulations, nous affirmons que le dispositif FACTS série (DVR) est capable de compenser tous les creux de tensions allant jusqu'à 60% de la tension fondamentale.



**Figure IV-5-a : Tensions aux bornes de la source**



**Figure IV-5-b : Tensions aux bornes de la charge sensible**



**Figure IV-5-a : Tensions injectées par le DVR.**

## IV.6.2 Compensation des surtensions triphasées

Cette partie de simulation sera réalisée de la même façon que pour les creux de tensions triphasés, nous avons utilisé une source de tension programmable paramétrée comme l'indique le tableau IV-2.

Parameters

Positive-sequence: [ Amplitude(Vrms Ph-Ph) Phase(deg.) Freq. (Hz) ]  
[30e3 0 50]

Time variation of: Amplitude

Type of variation: Step

Step magnitude (pu, deg. or Hz):  
0.2

Variation timing (s) : [ Start End ]  
[0.1 0.3]

Fundamental and/or Harmonic generation:

OK Cancel Help Apply

Tableau IV-2 Paramètres de la source générant les surtensions

Comme illustré sur la figure IV-6-a, on remarque bien qu'à l'intervalle de temps  $0,1 \leq t \leq 0,3$  s, l'amplitude de la tension au point de raccordement PCC est en augmentation de 20% de la tension fondamentale, alors que la tension de la charge sensible est gardée toujours à la valeur désirée comme illustré sur la figure IV-6-b ; ceci, grâce au DVR qui corrige parfaitement les surtensions produites au PCC, en injectant à travers un filtre LC et transformateur de couplage connectés en série au réseau reliant la charge sensible des tensions compensatrices qui sont bien synchronisées et en opposition de phases avec les tensions de la source comme l'illustre la figure IV-6-c.

En résumé, après nos différents essais et simulations nous affirmons que ce dispositif est capable de corriger les surtensions d'amplitude allant jusqu'à 40% de la tension nominale.

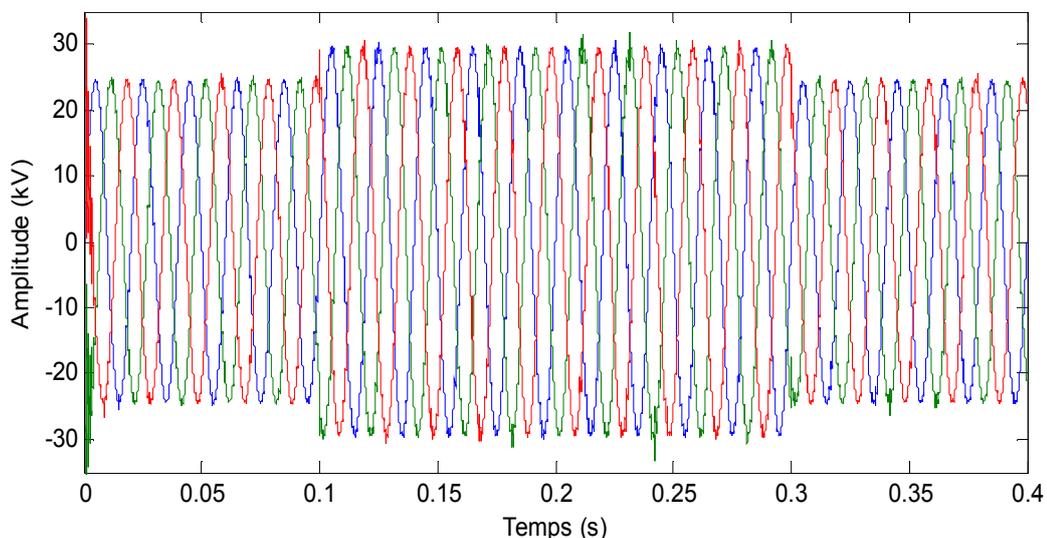


Figure IV-6-a : Tensions aux bornes de la source

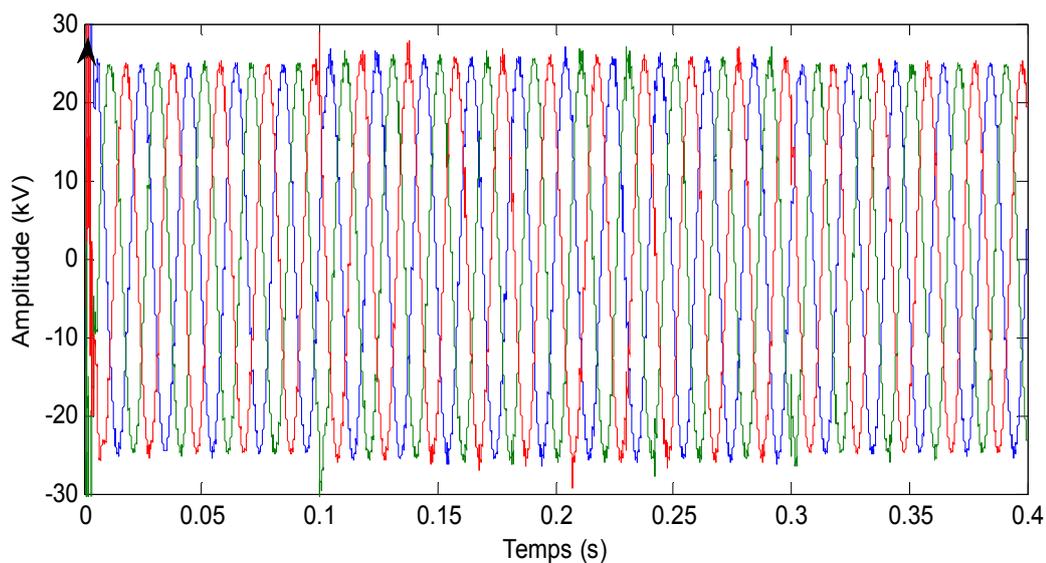


Figure IV-6-b : Tension aux bornes de la charge sensible

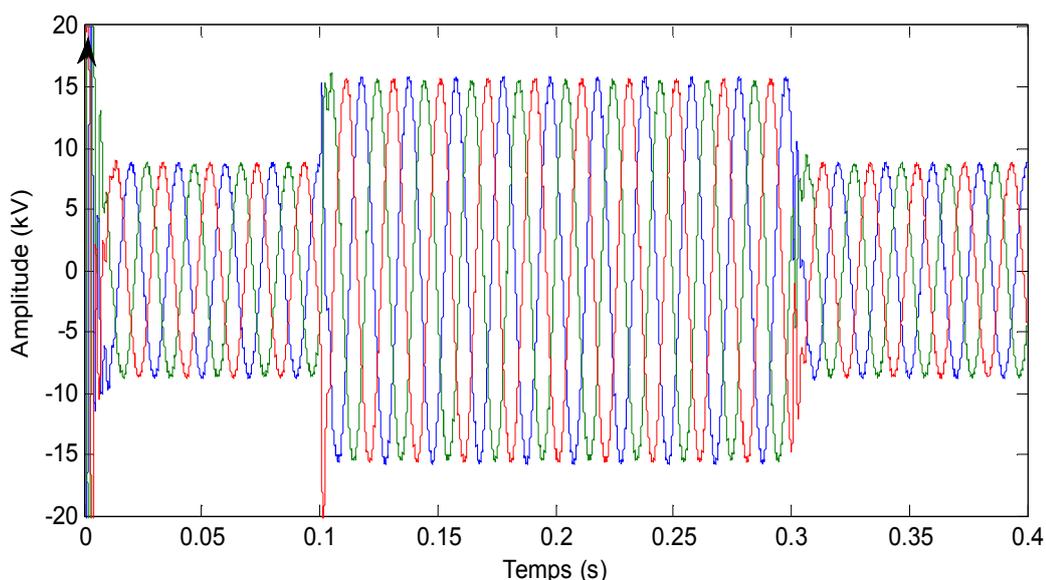


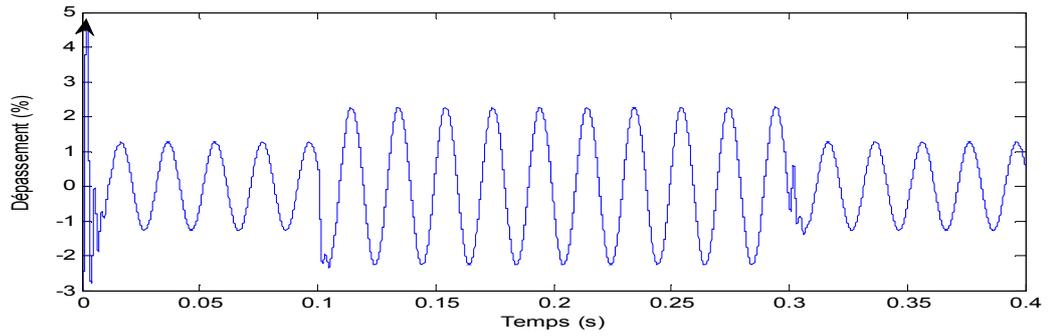
Figure IV-6-b : Tensions injectées par le DVR

### IV.6.3 Compensation d'un déséquilibre des tensions triphasées

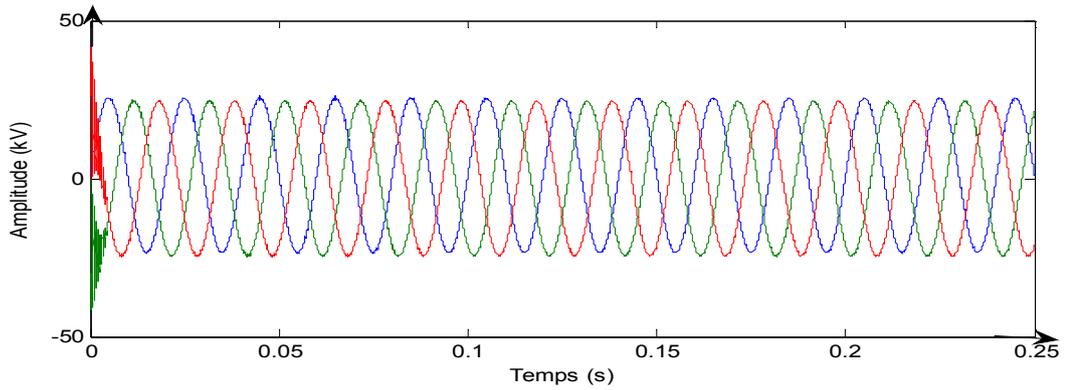
Pour créer un déséquilibre en amplitude dans le circuit d'alimentation triphasé, nous avons inséré une force électromotrice en série à la phase a, puis nous nous intéressés à la réaction du DVR. Ainsi, comme on voit sur la figure IV-7-a, dès l'instant  $t = 0.04s$  le système de tensions triphasées subit le déséquilibre en amplitude de phase a par rapport à la phase b et c.

La figure IV-7-b, représente la tension de source de la phase déséquilibrée, la figure IV-7-c, représente la tension aux bornes de la charge sensible après compensation.

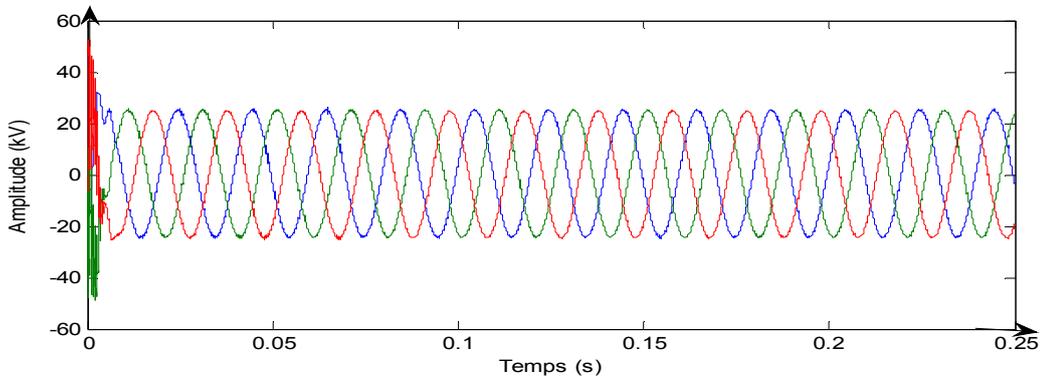
Nous remarquons bien, sur la figure IV-7-d, que le DVR a parfaitement compensé le déséquilibre de la phase affectée.



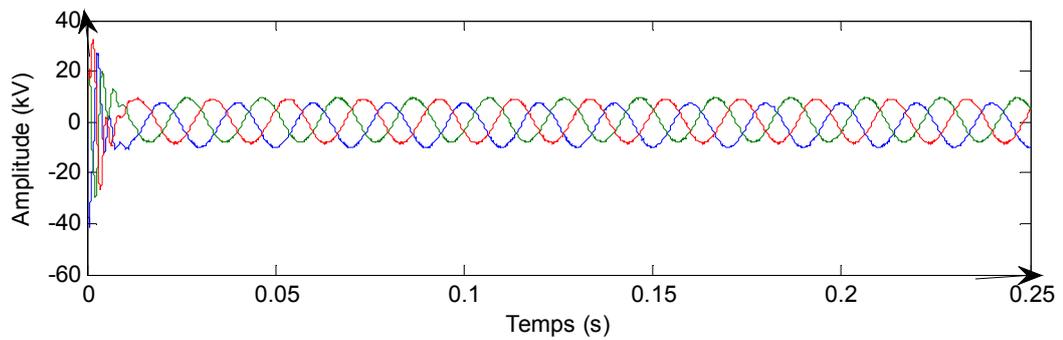
**Figure IV-7-a Action du DVR**



**Figure IV-7-b Tension aux bornes de la charge perturbée**



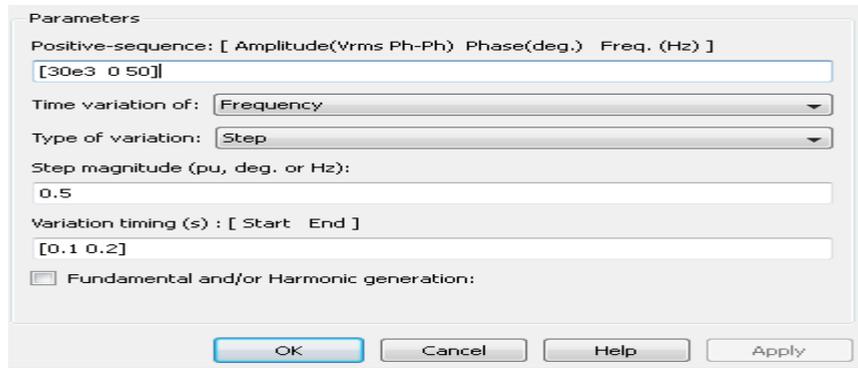
**Figure IV-7-c Tension aux bornes de la charge sensible**



**Figure IV-7-d Tension injectée par le DVR**

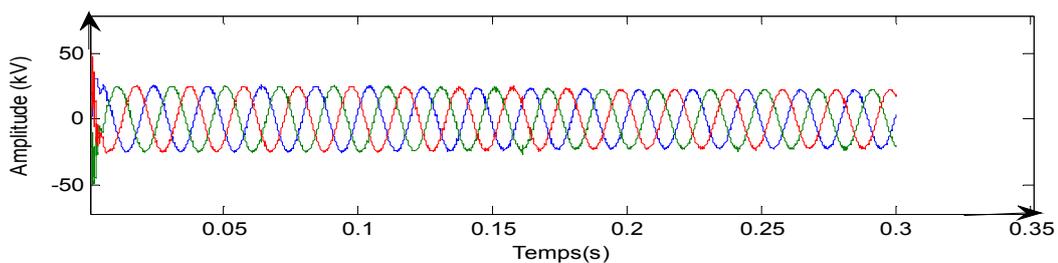
## IV.6.4 Compensation d'une variation de fréquence

Cette partie de simulation sera réalisée de la même façon que pour les trois types de perturbations précédentes, nous avons utilisé une source de tension programmable paramétrée comme l'indique le tableau IV-4 suivant.

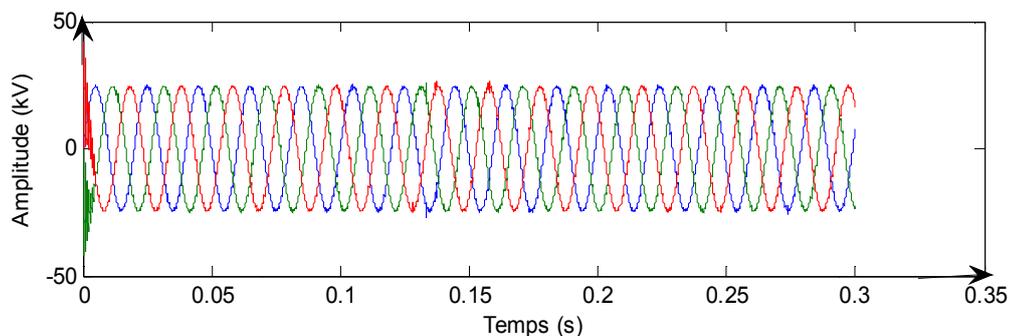


**Tableau IV-4 Paramètres de la source générant des variations de fréquence**

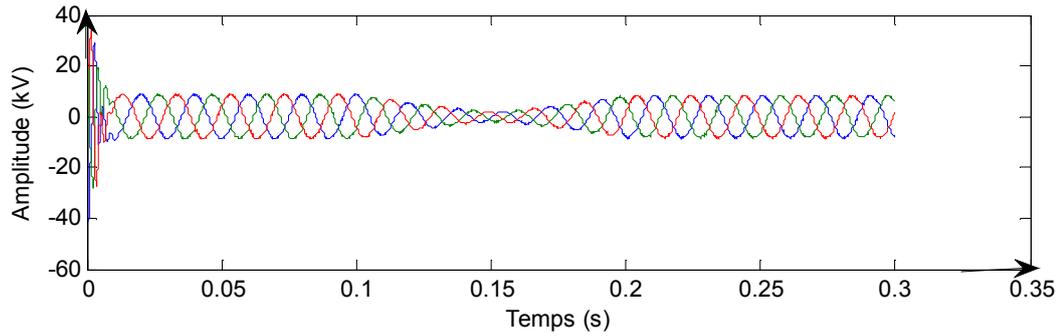
Comme illustré sur la figure IV-9-a, on remarque bien que durant l'intervalle  $0,2 \leq t \leq 0,3$  s, on commence à apercevoir la variation de fréquence au point de raccordement PCC qui est en augmentation de 0.5 Hz de la fréquence fondamentale, alors que la fréquence de la charge sensible est gardée toujours à la valeur désirée comme illustré sur la figure IV-9-b ; ceci est obtenu, grâce au DVR qui corrige parfaitement les variations de fréquence produites au PCC, en injectant à travers un filtre LC et un transformateur de couplage connecté en série au réseau reliant la charge sensible des tensions compensatrices avec un déphasage plus élevé par rapport à ceux de la source comme l'illustre la figure IV-9-c.



**Figure IV-8-a : Tensions aux bornes de la source**



**Figure IV-8-b : Tensions aux bornes de la charge sensible**



**Figure IV-8-a : Tensions injectées par le DVR**

### IV.6.5 Compensation de plusieurs types de perturbations

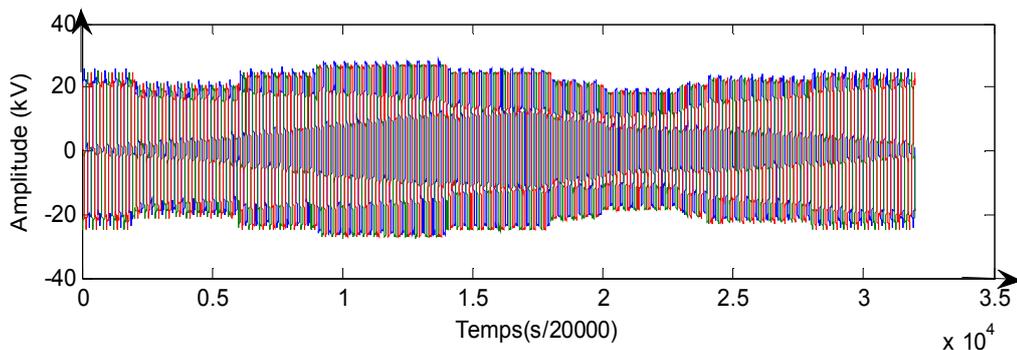
Dans cette dernière partie de simulation, nous allons introduire à des instants bien précis toutes les perturbations présentées précédemment. Ces dernières seront appliquées selon le timing et les caractéristiques indiquées dans le tableau IV-5 :

Type de perturbation	Temps (s)	Caractéristique de la perturbation
Régime permanent	$0 \leq t \leq 0.1$	Pas de perturbation
Creux de tension	$0.1 \leq t \leq 0.3$	30%
Régime permanent	$0.3 \leq t \leq 0.45$	Pas de perturbation
Surtension	$0.45 \leq t \leq 0.7$	20%
Régime permanent	$0.7 \leq t \leq 0.9$	Pas de perturbation
Déséquilibre du système triphasé	$0.9 \leq t \leq 1.2$	Court-circuit au niveau de la phase a
Fluctuation de tension	$1.2 \leq t \leq 1.4$	8%
Régime permanent	$1,4 \leq t \leq 1,6$	Pas de perturbation

**Tableau IV-5 : Paramètres de réglage de plusieurs perturbations**

L'objectif de cette partie de test, est de s'assurer du bon fonctionnement du dispositif FACTS à base des interrupteurs d'électronique de puissance (DVR) lorsque la source est polluée de plusieurs types de perturbation en amplitude.

En résumé, d'après les résultats de simulation illustrés sur la figure IV-10-a, figure IV-10-b et figure IV-10-c, nous affirmons que le DVR est un dispositif efficace contre toutes les perturbations en amplitude, que sa commande détecte toutes ces perturbations, en seulement, un cycle de période et que toutes ces perturbations sont atténuées au maximum.



**Figure IV-9-a : Tensions aux bornes de la source**

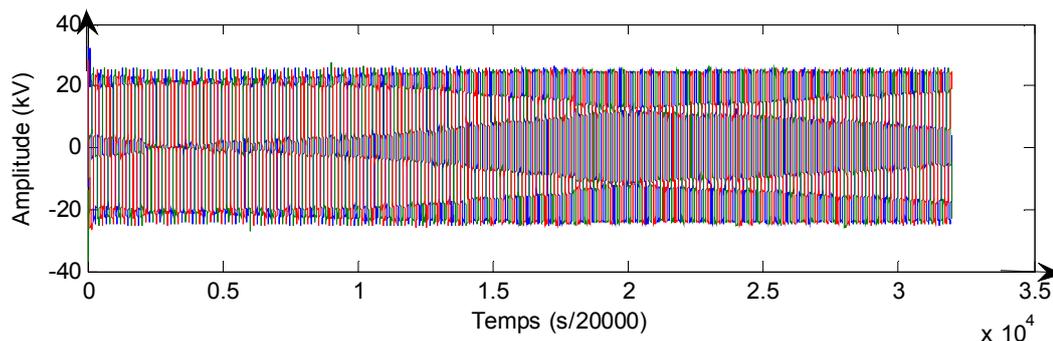


Figure IV-9-a : Tensions aux bornes de la charge sensible

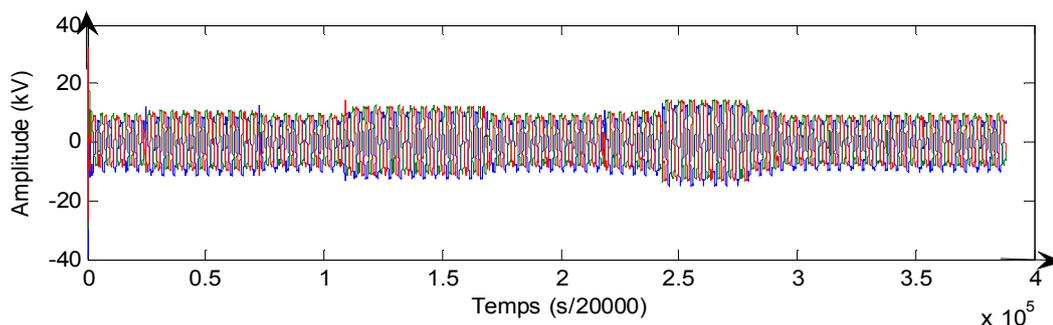


Figure IV-9-a : Tensions injectées par le DVR

### IV.7 Conclusion

Dans ce chapitre, la régulation de la tension par logique floue pour la compensation des perturbations aux charges sensibles dans un réseau électrique muni de dispositif FACTS série (DVR), a été appliquée. Une simulation numérique à l'aide du logiciel Matlab/Simulink a été conçue et testée sur un réseau classique, afin de déterminer son comportement et la rapidité du DVR à compenser les perturbations.

Dans un premier temps, nous avons présenté les résultats individuels de simulation pour chaque type de perturbation (creux de tension, surtension, déséquilibre de phase, fluctuation de tension et de fréquence), ensuite, toutes ces perturbations sont simulées simultanément dans un seul bloc.

Toutefois, à partir des résultats obtenus nous affirmons que grâce au DVR, la tension aux bornes de la charge sensible est gardée toujours à la valeur désirée (25 kV).

En résumé, les résultats obtenus par simulation sont satisfaisants et montrent bien les bonnes performances du dispositif FACTS série (DVR) avec régulateur flou au niveau de la compensation des perturbations électriques.

# **CONCLUSION GENERALE**

### Conclusion générale

Des perturbations électriques peuvent prendre naissance dans le réseau du fournisseur, dans l'installation perturbée de l'utilisateur ou dans l'installation d'un utilisateur voisin. Ces perturbations ont des conséquences différentes selon la topologie ou la spécificité du réseau électrique, des charges, le contexte économique et le domaine d'application. Elles peuvent ainsi, causer la perte de l'outil de production, provoquer l'inconfort ou voir même la destruction des équipements et potentiellement la mise en danger des personnes.

Toutefois, la recherche d'une meilleure compétitivité des entreprises et la dérégulation du marché de l'énergie électrique, font de la qualité de l'énergie électrique un sujet indiscutable pour les compagnies d'électricité, les personnels d'exploitation et de gestion de sites tertiaires ou industriels ainsi, pour les constructeurs des équipements et les équipes de maintenances.

Cependant, les perturbations ne doivent pas être subies comme une fatalité, car des solutions existent, surtout avec le développement rapide des composants de l'électronique de puissance qui a permis d'améliorer la gestion des réseaux électriques en introduisant un nouveau concept par les systèmes de transmission de l'énergie à courant alternatif flexible appelé FACTS. Avec leur concours, le contrôle du flux de puissances active et réactive ainsi que, l'augmentation des capacités de transfert des ligne sont atteints et performés par l'injection des tensions (ou courants) des convertisseurs conçus avec des interrupteurs statiques modernes commandés en ouverture et en fermeture tels que : GTO et IGBT. La mise en œuvre de ces dispositifs est indispensable pour le respect de la réglementation et des normes des commissions d'électricité ; ainsi que, l'application de méthodes rigoureuses (diagnostic, mise en œuvre, étude, solution et maintenance préventive) permettent une meilleure qualité d'alimentation et adéquate aux besoins des utilisateurs.

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

Dès l'insertion du DVR, sous l'environnement Matlab/Simulink des résultats de simulations ont montrés l'efficacité de ce type de dispositif et la méthode de logique floue à compenser toutes les perturbations à savoir les creux tensions, surtension, fluctuation de fréquence, déséquilibre du système triphasé et même en présence de toutes ces perturbations.

Pour conclure ce travail, nous affirmons que l'ensemble des objectifs fixés au départ de notre travail ont été atteints et que nous somme très satisfaits de la structure du compensateur et le régulateur flou de type PI-flou pour les résultats de simulation obtenus au niveau de :

- L'identification de la fréquence du réseau et des paramètres de la tension ;
- L'identification des surtensions et creux de tension ;
- La restitution dans le réseau électrique des tensions compensatrices.

# **Références Bibliographiques**

### Références Bibliographiques

- [1] Luc Lasn « *Electrotechnique* » DUNOD 2008.
- [2] : VANYA IGNATOVA « *Application Aux Creux De Tension Et La Pollution Harmoniques* ». Thèse de doctorat, Electrotechnique, Université Joseph Fourier Grenoble, 2006.
- [3] : Bertrand Charier « *La Qualité De L'énergie Electrique : Critères Et Définitions* », *Techno élec*, 2009.
- [4] : P. Espel « *Analyse De La Qualité De L'énergie Electrique : Mesure Du flicker* », *Revue Française de métrologie n°20*, 2009.
- [5] : Cahier technique Schneider électrique n°199 « *la qualité de l'énergie électrique* » 2001
- [6] : Allag Zoubir&Yahyaoui Hillal « *Influence Des Harmonique Et Déséquilibres Sur La Compensation De L'énergie Réactive Des Réseaux Electriques De Distribution* », Mémoire de Master, Université de Béjaia, 2012.
- [7] : Fettous Mourad « *Les Systèmes De L'électronique De Puissance Appliqués Au Réseau De Distribution En Vue De L'amélioration De La Qualité De L'énergie Electrique* », Mémoire de magister, Université de Béjaia, 2006.
- [8] : Faride Hamoudi&abderezek khali « *technique de commande des systèmes de l'électronique de puissance dédiés à la qualité de l'énergie électrique* », Mémoire d'ingénieur d'état en Electrotechnique, Université de Béjaia, 2005.
- [9] : Mohamad Alaà Eddin Alali « *Contribution A L'étude Des Compensateurs Actifs Des Réseaux Electrique BT* », Thèse de Doctorat, Génie Electrique, Université Louis Pasteur Starsbourg, 2002.
- [10] : Djafar Ouled Abdeslam « *Technique Neuro-Mimitique Pour La Commande Dans Le Système Electrique : Application Des F.A.P Dans Les R.E.B.T* », Thèse de Doctorat, Electronique, Electrotechnique et Automatique, Haute Alsace, 2005.
- [11] : Marcel Daniel Epanya « *application du filtre actif pour une mise en œuvre de méthode de prédiction et de contrôle dans les R.D.E* », Exigence de maitrise en Génie Electrique, Université de Québec à trois Rivière, 2010.
- [12] : Chelah Samira « *Analyse Stochastique De La De La Résultante De L'injection Du Courant Harmonique Dans Le Réseau Electrique* », Mémoire de Magister, Université Tizi Ouzou, 2012.

## Références Bibliographiques

---

- [13] : Lamia Kartobi « *Optimisation De La Synthèse Des FACTS Par Les Algorithmes Génétiques Et Les Essaim Particulaires Pour Le Contrôle Des Réseaux Electrique* », Mémoire de Magister, USTHB, 2006.
- [14] : Ziane-Khodja Abd « *Les Systèmes De L'électronique De Puissance Dédiés Aux Réseaux D'énergie Electriques : Impact Sur La Qualité Et La Répartition de la Puissance D'énergie* », Thèse de Doctorat, Commande des systèmes électriques, Université De Bejaia, 2012.
- [15] : Jean Christophe Passelergue « *Interaction Des Dispositifs FACTS Dans Les Grands Réseaux Electrique* », Thèse de doctorat, Génie Electrique, INP Grenoble, 1998.
- [16] : Abdelaàli Alibi « *Contrôle Des Réseaux Electrique Par Les FACTS* », Mémoire de Magister, Université de Batna, 2009.
- [17] : Mezaàche Mohammed « *Analyse Et Traitement De La Qualité De L'énergie En Utilisant Des Dispositifs De Contrôle Des Réseaux Electriques Dans Le Cas De La Stabilité De La Tension : UPFC* », Mémoire de Magister, Université de Batna, 2011.
- [18] : Haimour Rachida « *Contrôle Des Puissances Réactives Et Des Tensions Par Les Dispositifs FACTS Dans Un Réseau Electrique* », Thèse de Doctorat, Université Batna, 2009.
- [19] : M.Touafek Mohamed Yaakoub « *Amélioration De La Stabilité Transitoire Des Réseaux Electrique Par Un Contrôle Neuro-Flou Des Systèmes FACTS* », Mémoire de Magister, Université de Sétif, 2012.
- [20] : Sayed Mohammed SadaghZadeh « *Amélioration De La Stabilité Transitoire Des Réseaux Electriques Et L'amortissement Des Oscillations Par SMES Et SSSC* », Thèse de Doctorat, Génie Electrique, Université Téhéran, 1998.
- [21] : Berrahal Khoukha « *Modélisation Et Simulation D'un Système FACTS : UPFC* », Mémoire de Magister, Université de Batna, 2009.
- [22] : Hamadou Takfarinas « *Commande par logique floue d'un moteur asynchrone double étoile* », Mémoire de Master, Université de Béjaia, 2013.
- [23] : Frank Deroncourt « *Introduction à la Logique Floue* », Paris, Avril 2011.
- [24] : Ferhat Lahouazi « *Mise En Œuvre d'une Stratégie De Commande neuro-Floue : Application à un Pendule Inversé* » Mémoire de Magister, Université Tizi-Ouzou, 2011.
- [25] : Antoine Sinzinkayo « *Application de la logique floue aux choix d'une méthode d'assemblage* », Diplôme de maitrise des sciences appliquées, Ecole Polytechnique de Montréal, 2000.
- [26] : Cahier Technique Schneider N°191 « *Logique Floue* », 1998.
- [27] : Arnold Kauf Mann, « *Introduction à La Logique Floue* », Techniques de l'ingénieur A120-R7032.

**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