

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

## **UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET**

**FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES**  
**DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**



# **MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

**Pour l'obtention du diplôme de Master**

**Domaine : Sciences et Technologie**

**Département : Electrotechnique**

**Spécialité : Réseaux électriques**

## **THÈME**

**Contrôle d'une ligne HVDC pour le transit des puissances**

*Préparée par :*  
**BELMAHI Fatma**  
**BAKDI Meriem**

**Devant le Jury :**

**Nom et prénoms**

B. BEKKI

A. BOUAAZA

S. BELFEDHAL

Z. TEZTAZ

A.H. BOUMEDIENE

**Grade**

M.A. A

M.C. A

M.C. B

M.A. A

M.C. B

**Qualité**

Président

Examinateur

Examinateur

Encadreur

Co- Encadreur

**PROMOTION : 2021-2022**

# *Remerciements*

*Au terme de ce travail on tient tout d'abord à remercier ALLAH le tout puissant de nous avoir donné le courage et la volonté d'achever ce modeste travail.*

*Et d'avoir fait de notre parcours de thème un parcours réussi et riche grâce à des personnes estimables qu'on a rencontrées et qu'on tient à les remercier.*

*On tient à remercier notre promotrice **M<sup>me</sup> : Teztaz Zineb**, et notre Co-promoteur **M<sup>r</sup> : Boumediene A. Hamid**. Pour leurs encadrements, leurs soutiens tout au long de notre travail ainsi que leurs aides précieuses.*

*Nos remerciements s'adressent à **M<sup>r</sup> : Chaachoua Tayeb**, Notre promoteur au sein de la Société de Production d'Electricité -SPE- Tiaret. Pour sa générosité et sa patience dont il a su faire preuve malgré la charge professionnelle ainsi qu'à l'équipe de la SPE pour leurs accueils bienveillants et leurs conseils avisés.*

*On remercie chaleureusement les membres de jury de nous avoir fait l'honneur d'examiner ce mémoire, et accepter de le juger.*

*On n'oublie pas de remercier l'ensemble des enseignants de l'université IBN KHALDOUN - Tiaret- particulièrement **M<sup>r</sup> : Tayeb ALLAOUI**, **M<sup>r</sup> : Youcef MIHOUB** et **M<sup>E</sup> : Mimouna ABID** pour toutes les connaissances acquises auprès d'eux. Et tous ce qui ont contribué à la réalisation de ce travail.*

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A ma très chère mère qui ne cesse de me soutenir dans tous les domaines de la vie  
plus particulièrement mes études.*

*A la mémoire de mon très cher père « Khaled ».*

*A mes très chères sœurs.*

*A mon très cher frère « Amine ».*

*A mon cher cousin « Fouzi ».*

*A Toute la famille.*

*A tous mes amis.*

*A tous ceux et celles qui sont chères à mon cœur.*

*A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin, même avec un mot d'encouragement  
et de gentillesse.*

*Fatma*

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A ma très chère mère qui ne cesse de me soutenir dans tous les domaines de la vie  
plus particulièrement mes études.*

*A mon très cher père « Abdelkader » pour tous les sacrifices.*

*A mes très chères sœurs.*

*A mes très chers frères*

*A Toute la famille.*

*A tous mes amis.*

*A tous ceux et celles qui sont chères à mon cœur.*

*A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin, même avec un mot d'encouragement  
et de gentillesse.*

*Meriem*

# SOMMAIRE

|                                                                                            |          |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| <b>Introduction Générale .....</b>                                                         | <b>1</b> |
| <b>CHAPITRE I : Etat De L'art Et Généralités sur les systemes HVDC</b>                     |          |
| I.1. Introduction.....                                                                     | 3        |
| I.2. Système de transmission d'énergie électrique HVAC .....                               | 3        |
| I.2.1. Avantages .....                                                                     | 3        |
| I.2.2. Inconvénients .....                                                                 | 3        |
| I.3. Définition du HVDC.....                                                               | 4        |
| I.4. Historique sur le développement du transport en HVDC .....                            | 4        |
| I.5. Intérêts des systèmes HVDC par rapport aux systèmes alternatifs .....                 | 6        |
| I.6. Applications HVDC.....                                                                | 7        |
| I.6.1. Liaisons souterraines ou sous-marines .....                                         | 7        |
| I.6.2. Lignes aériennes de grande longueur.....                                            | 7        |
| I.6.3. Interconnexions transfrontalières.....                                              | 7        |
| I.6.4. Interconnexions entre réseaux asynchrones.....                                      | 8        |
| I.6.5. Augmentation de la capacité de transit .....                                        | 8        |
| I.6.6. Stabilité du système de transmission .....                                          | 8        |
| I.7. Configurations des systèmes HVDC .....                                                | 8        |
| I.7.1 Liaison monopolaire .....                                                            | 8        |
| I.7.2 Liaison Bipolaire .....                                                              | 9        |
| I.7.3 Liaison Homopolaire .....                                                            | 9        |
| I.7.4 Liaison Dos à Dos (back to back).....                                                | 9        |
| I.7.5 Liaison Multi-terminaux .....                                                        | 9        |
| I.8. Types des convertisseurs dans liaison HVDC .....                                      | 10       |
| I.8.1. Convertisseurs CSC.....                                                             | 10       |
| I.8.2. Convertisseurs VSC.....                                                             | 11       |
| I.9. Avantages des systèmes VSC-HVDC .....                                                 | 11       |
| I.10. Inconvénients de la technologie VSC-HVDC par rapport à la technologie CSC-HVDC ..... | 12       |
| I.11. Composants élémentaires des systèmes VSC-HVDC .....                                  | 12       |
| I.11.1. Transformateurs de conversion.....                                                 | 12       |
| I.11.2. Filtres alternatifs (AC).....                                                      | 12       |
| I.11.3. Convertisseurs VSC.....                                                            | 12       |
| I.11.4. Condensateurs DC .....                                                             | 13       |

|                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------|----|
| I.11.5.Réactances de phase .....                          | 13 |
| I.11.6.Filtres DC.....                                    | 13 |
| I.11.7. Câbles DC.....                                    | 13 |
| I.12.Domaines d'application des systèmes VSC-HVDC.....    | 14 |
| I.13.Evolution des topologies des convertisseurs VSC..... | 14 |
| I.13.1.Topologie à deux niveaux.....                      | 14 |
| I.13.2. Topologie à trois niveaux .....                   | 15 |
| I.13.3. Topologie MMC .....                               | 16 |
| I.14.Conclusion .....                                     | 17 |

## **CHAPITRE II : Modelisation Et Contrôle Des Systèmes VSC-HVDC**

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| II.1.Introduction .....                                                     | 19 |
| II.2.Modélisation des éléments du réseau .....                              | 19 |
| II.2.1.Transformateurs.....                                                 | 20 |
| II.2.2.Filtres.....                                                         | 20 |
| II.2.2.1.Filtres AC.....                                                    | 20 |
| II.2.2.2.Filtres DC.....                                                    | 21 |
| II.2.3.Modélisation des lignes .....                                        | 22 |
| II.2.4.Modélisation des charges .....                                       | 23 |
| II.2.5.Modélisation des éléments shunt.....                                 | 23 |
| II.2.6.Modélisation VSC .....                                               | 24 |
| II.3.Principe de fonctionnement et configuration d'un système VSC-HVDC..... | 25 |
| II.4.Contrôle.....                                                          | 26 |
| II.4.1.Contrôle du VSC .....                                                | 28 |
| II.4.2.Techniques de modulation.....                                        | 29 |
| II.4.2.1.Modulation de largeur d'impulsion (MLI).....                       | 29 |
| II.4.3.Notions du systèmes dynamiques - performances .....                  | 30 |
| II.4.4.Notion de fonction de transfert.....                                 | 33 |
| II.4.5.Les Types du Régulateurs .....                                       | 33 |
| II.5.Définition de la Logique Floue .....                                   | 35 |
| II.5.1.Principes de la Logique Floue .....                                  | 35 |
| II.5.2.Sous-ensembles flous .....                                           | 35 |
| II.5.3.Degré d'appartenance et fonctions d'appartenance.....                | 36 |
| II.5.4.Contrôleur flou .....                                                | 37 |
| II.6.Application de la commande floue Adaptative .....                      | 37 |

|                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| II.6.1. Structure générale du régulateur flou adaptatif .....        | 39 |
| II.6.1.1. Bloc de fuzzy .....                                        | 39 |
| II.6.1.2. Les règles d'un contrôleur flou .....                      | 39 |
| II.6.2. Avantages et Inconvénients du réglage par logique flou ..... | 41 |
| II.7. Conclusion .....                                               | 42 |

### **CHAPITRE III : Simulation et Interprétation des Résultats**

|                                                       |    |
|-------------------------------------------------------|----|
| III.1. Introduction .....                             | 44 |
| III.2. Modèle générale de simulation .....            | 44 |
| III.2.1. Modèle des deux stations de conversion ..... | 44 |
| III.2.2. Modèle du Contrôle .....                     | 45 |
| III.3. Résultats de simulation : .....                | 48 |
| III.4. Interprétations des résultats : .....          | 52 |
| III.5. Conclusion .....                               | 52 |
| Conclusion générale .....                             | 54 |
| ANNEXE .....                                          | 55 |
| <br>                                                  |    |
| Références bibliographiques .....                     | 56 |

# Liste des figures

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure I. 1: Liaisons HVDC dans le monde.....                                                                   | 6  |
| Figure I. 2: Coûts relatifs comparés d'une liaison à courant continu et d'une liaison à courant alternatif..... | 7  |
| Figure I. 3: Des systèmes HVDC Monopolaire (a), bipolaire (b) et homopolaire (c).....                           | 9  |
| Figure I. 4: Des systèmes HVDC dos-à-dos (a), parallèle multi-terminal (b) et série multi-terminal(c).....      | 10 |
| Figure I. 5: Un convertisseur source de courant CSC.....                                                        | 10 |
| Figure I. 6 : Un convertisseur source de tension VSC.....                                                       | 11 |
| Figure I. 7: Schéma des éléments d'un système VSC-HVDC.....                                                     | 12 |
| Figure I. 8: Schéma d'un câble sous-marin unipolaire d'un système VSC-HVDC.....                                 | 14 |
| Figure I. 9: Convertisseur VSC-HVDC à deux niveaux.....                                                         | 15 |
| Figure I. 10: Forme d'onde de la tension.....                                                                   | 15 |
| Figure I. 11 : Convertisseur VSC-HVDC à trois niveaux.....                                                      | 16 |
| Figure I. 12: Forme d'onde de la tension.....                                                                   | 16 |
| Figure I. 13: Schéma d'un sous module.....                                                                      | 17 |
| Figure I. 14: Schéma d'un convertisseur MMC triphasé.....                                                       | 17 |
| <br>                                                                                                            |    |
| Figure II. 1 Schémas des éléments de SVC-HVDC.....                                                              | 19 |
| Figure II. 2: Schéma équivalent monophasé d'un transformateur triphasé.....                                     | 20 |
| Figure II. 3: Filtre passe-haut du second ordre.....                                                            | 21 |
| Figure II. 4 : Condensateur $u_{DC}$ .....                                                                      | 22 |
| Figure II. 5: Schéma en $\pi$ d'une ligne de transmission.....                                                  | 23 |
| Figure II. 6: Schéma équivalent d'une charge.....                                                               | 23 |
| Figure II. 7: Modèle des éléments shunt : a) symbole, b) élément inductif, c) élément capacitif.....            | 24 |
| Figure II. 8: Convertisseur à trois niveaux (diode parallèle).....                                              | 24 |
| Figure II. 9: Tensions produites par le convertisseur NPC 3 niveaux.....                                        | 25 |
| Figure II. 10: Schéma d'un système VSC-HVDC.....                                                                | 26 |
| Figure II. 11: Structure de contrôle d'une liaison VSC- HVDC.....                                               | 27 |
| Figure II. 12: Structure de contrôle d'une station VSC-HVDC.....                                                | 27 |
| Figure II. 13: Structure de contrôle d'une station VSC-HVDC.....                                                | 27 |
| Figure II. 14: Schéma de principe d'un VSC.....                                                                 | 28 |
| Figure II. 15: Exemple technique de la Modulation de Largeur d'impulsion (MLI).....                             | 30 |
| Figure II. 16: Exemple d'un critère de précision.....                                                           | 31 |
| Figure II. 17: Exemple d'un critère.....                                                                        | 31 |
| Figure II. 18: Comportements instables.....                                                                     | 32 |
| Figure II. 19: Comportements stables.....                                                                       | 32 |
| Figure II. 20: Les différents degré de rapidité.....                                                            | 32 |
| Figure II. 21: Représentation d'un système quelconque à 1 entrée – 1 sortie.....                                | 33 |
| Figure II. 22: Schéma fonctionnel du régulateur P.....                                                          | 33 |
| Figure II. 23: Régulateur PI.....                                                                               | 34 |
| Figure II. 24: Schéma fonctionne du régulateur PI.....                                                          | 34 |
| Figure II. 25: Schéma fonctionnel.....                                                                          | 34 |
| Figure II. 26: Représentation Graphique d'un Ensemble Classique et d'un Ensemble Flou.....                      | 36 |
| Figure II. 27: Éléments de la logique floue.....                                                                | 36 |

|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure II. 28: Formes de fonctions d'appartenance.                           | 36 |
| Figure II. 29: Schéma général d'un Contrôleur flou.                          | 37 |
| Figure II. 30: Structure de base de la commande adaptative utilisée.         | 38 |
| Figure II. 31: Structure du contrôleur flou adaptatif utilisé                | 38 |
| Figure II. 32: Schéma du bloc de Fuzzy                                       | 39 |
| Figure II. 33: Règles d'un contrôleur flou                                   | 39 |
| Figure II. 34 : L'entrée (fonctions d'appartenance)                          | 40 |
| Figure II. 35 : Variables de flou                                            | 40 |
| Figure II. 36 : Sortie (fonctions d'appartenance)                            | 40 |
| Figure II. 37 : Surface totale.                                              | 41 |
|                                                                              |    |
| Figure III. 1: VSC-based HVDC transmission link 200 MVA (+/- 100kV).         | 44 |
| Figure III. 2: Modèle du réseau                                              | 45 |
| Figure III. 3: Station de conversion                                         | 45 |
| Figure III. 4: Schéma de contrôle d'une station VSC, contrôlée et P et en Q. | 45 |
| Figure III. 5: Contrôle discret d'une station VSC                            | 46 |
| Figure III. 6: Contrôle externe d'une station VSC                            | 46 |
| Figure III. 7: Contrôle interne d'une station VSC                            | 47 |
| Figure III. 8 : Bloc de PLL                                                  | 47 |
| Figure III. 9.1.a : La tension $U_{abc}$ de régulateur PI                    | 48 |
| Figure III. 10.2.a : Le courant $I_{abc}$ de régulateur PI                   | 48 |
| Figure III. 11.3.a : La puissance réactive de régulateur PI                  | 48 |
| Figure III. 12.4.a : La puissance active de régulateur PI                    | 49 |
| Figure III. 13.5.a : Le courant $I_{vd}$ de régulateur PI                    | 49 |
| Figure III. 14.6.a : Le courant $I_{vq}$ de régulateur PI                    | 49 |
| Figure III. 15.1.b : La tension $U_{abc}$ de PI adaptatif                    | 50 |
| Figure III. 16.2.b : Le courant $I_{abc}$ de PI adaptatif                    | 50 |
| Figure III. 17.3.b : La puissance réactive de PI adaptatif                   | 50 |
| Figure III. 18.4.b : La puissance active de PI adaptatif                     | 51 |
| Figure III. 19.5.b : Le courant $I_{vd}$ de PI adaptatif                     | 51 |
| Figure III. 20.6.b : Le courants $I_{vq}$ de PI adaptatif                    | 51 |

# Liste des tableaux

|                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau II. 1 : Table de commutation du convertisseur NPC 3 niveaux ..... | 25 |
| Tableau II. 2 Résumé des effets respectifs des actions P, I, et D.....    | 35 |
| Tableau II. 3 : Règles d'un contrôleur flou .....                         | 39 |

# Listes des abréviations et symboles

|                        |                                                                          |
|------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| HVAC                   | High voltage alternatif current (courant alternatif haute tension)       |
| HVDC                   | High voltage direct current (courant continu haute tension)              |
| AC                     | Alternating Current (Courant alternative)                                |
| DC                     | Direct current (courant continu)                                         |
| IGBT                   | Insulated Gate Bipolar Transistors (Transistor bipolaire à grille isolé) |
| MLI                    | Modulation de Largeur d'Impulsion                                        |
| PWM                    | PulseWidth modulation                                                    |
| PID                    | Régulateur proportionnel-intégral Dérivé                                 |
| K <sub>p</sub>         | Gain proportionnel                                                       |
| LCC                    | Line-commutated converters(Convertisseurs à commutation de ligne.)       |
| MMC                    | Modular Multi-level Converter                                            |
| CSC                    | Convertisseur de source de courant.                                      |
| VSC                    | Voltage Source Converter                                                 |
| FSTPIC                 | Fuzzy Self Tuning PI Controller                                          |
| PU                     | Per-Unit.                                                                |
| $V_i$                  | Tension aux bornes de la charge                                          |
| $P_i, Q_i$             | Puissances actives et réactives consommées par la charge i               |
| $Y_i$                  | Admittance de la charge                                                  |
| X                      | Inductance equivalent                                                    |
| $V_{abc \text{ conv}}$ | Les tensions d'entrée du convertisseur                                   |
| m                      | Indice de modulation                                                     |
| $f_{ref}$              | Fréquence du signal de référence                                         |
| $f_p$                  | Fréquence du signal porteur                                              |
| r                      | Taux de modulation                                                       |
| $V_{ref}$              | Rapport de l'amplitude de la modulante                                   |
| $V_p$                  | Valeur crête du signal porteur                                           |

# **INTRODUCTION GENERALE**

# Introduction Générale

Aujourd'hui, les besoins en énergie électrique augmentent de façon continue, au regard de cette évolution, l'interconnexion des réseaux électriques à travers des systèmes de type HVDC se développe de plus en plus. Cependant, afin de répondre aux besoins et contraintes générés par la dérégulation des réseaux, il est nécessaire que ces systèmes d'interconnexion présentent des performances dynamiques et de robustesse élevée [1].

Le domaine de l'électronique de puissance s'est considérablement développé ces dernières années, offrant un potentiel énorme pour la conversion d'énergie électrique, en particulier avec l'apparition des IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors). Ceci a ouvert pour l'industrie de l'énergie, des horizons pour l'utilisation du HVDC basé sur les convertisseurs de source de tension (VSC) comme solution plus prometteuse pour le transport d'énergie électrique [2].

Les systèmes de transmission VSC-HVDC font l'objet de plusieurs axes de recherche comme les convertisseurs d'électronique de puissance, les topologies à deux niveaux, trois niveaux, multi-niveaux et les techniques de commande.

Les contrôleurs conventionnels de type PI sont les plus simples pour les systèmes complexes non linéaires et dynamiques mais présentent un manque de robustesse, vu la présence de fortes non linéarités et on ne dispose pas d'un modèle mathématique précis. En outre, les contrôleurs traditionnels PI avec des valeurs de gain fixe qui sont utilisés pour les systèmes de transmission VSC-HVDC produisent souvent une instabilité du système [3].

Le détail de fonctionnement, la modélisation et la simulation d'un système VSC-HVDC à base d'IGBT à trois niveaux sont étudiés, et pour améliorer la dynamique du système nous avons adapté une nouvelle commande basée sur le PI adaptatif. A cet effet, les concepts de cette technique et les aspects méthodologiques nécessaires à la compréhension sont présentés [4].

L'objectif de ce travail est d'étudier, de modéliser et de simuler des liaisons HVDC de type source de tension (VSC-HVDC).

Donc notre travail peut être divisé en trois chapitres :

Le Premier Chapitre c'est un Aperçu générale et état de l'art sur les systèmes HVDC et leurs principes de fonctionnement ainsi que leurs applications. Les différentes configurations et topologies.

Le deuxième chapitre s'intéresse à la modélisation et le contrôle des systèmes VSC-HVDC ainsi une explication des concepts de la logique floue et le PI adaptatif.

Le troisième chapitre présente des simulations par MATLAB sur le système de transmission VSC-HVDC (comparaison entre PI et PI adaptatif) et interprétations des résultats.

Enfin, on termine ce travail par une conclusion générale dans laquelle nous donnerons quelques commentaires et quelques points de vue sur notre travail qui peuvent suivre cette recherche.

# Chapitre I

## **Etat De L'art Et Généralités Sur Les Systèmes HVDC**

**I.1. Introduction**

Dans ce chapitre nous allons parler de l'historique du développement du transport à courant continu en haute tension (HVDC), suivi de ses principaux intérêts par rapport aux systèmes alternatifs et son domaine d'application, ce chapitre contient aussi les différents types et configurations des convertisseurs et topologies avant de faire une comparaison entre les configurations et les principes composants des systèmes VSC-HVDC.

**I.2. Système de transmission d'énergie électrique HVAC**

La technologie de transmission de haute tension à courant alternatif (HVAC) est le système le plus utilisé depuis le début de XX siècle, elle est utilisée pour transporter l'énergie électrique entre les centrales de production de l'énergie électrique et les consommateurs. Le système de transmission HVAC utilise les câbles aériens, souterrains ou sous-marins, Les lignes à haute tension aériennes sont composées de câbles conducteurs, généralement en alliage d'aluminium, suspendus à des supports, pylônes ou poteaux. Le système de transmission HVAC présente des avantages et des inconvénients comme les autres systèmes dans l'industrie, Ces avantages et inconvénients sont mentionnés dans les sections suivantes [5], [6] et [7] [8].

**Avantages**

1. La perte d'énergie électrique est faible sur de courtes distances.
2. Le système de transmission HVAC ne nécessite pas de groupes électrogènesauxiliaires.

**Inconvénients**

1. La perte d'énergie électrique dans de grandes distances.
2. Il utilise plusieurs câbles pour transporter des grandes puissances d'énergie électrique
3. Les câbles aériens, souterrains ou sous-marins génèrent des quantités importantes de puissance réactive.
4. L'impossibilité d'utilisation dans l'énergie éolienne offshore, ce qui est possible dans les mers, les océans et les grandes rivières.
5. Il est caractérisé par l'encombrement, en particulier dans les grands parcs éoliens.
6. Difficile à entretenir, surtout dans des conditions météorologiques. Cependant, cela pose un risque pour les ouvriers d'entretien.
7. Pour ses inconvénients, on a abouti à un nouveau système de transport développé par les chercheurs appelé HVDC

### **I.3. Définition du HVDC**

Un système de transport d'énergie à courant continu HVDC est un ensemble d'équipement d'électronique de puissance utilisé pour le transport d'électricité en courant continu haute tension. Le nom est le sigle anglais : High Voltage Direct Current, c'est à dire courant continu à haute tension [9].

### **I.4. Historique sur le développement du transport en HVDC**

Bien que l'industrie de l'époque ait opté pour le courant alternatif, la technologie HVDC à beaucoup évolué depuis sa naissance. Nous présenterons les étapes avec les dates clés de son développement.

En 1941 les allemands ont construit la première liaison HVDC. Il s'agissait d'une liaison 200 kV de type CSC avec diodes à vapeur de mercure, offrant un transport de puissance de 60 MW sur 115 km de câble entre Berlin et Elbe [10]. Le projet est achevé en 1945, mais n'a jamais été mis en marche.

En 1954 la première liaison HVDC commerciale a permis de relier l'île Gotland avec la Suède continentale. Elle était réalisée par l'intermédiaire d'un câble sous-marin de 96 km de long, offrant un transport de puissance de 20 MW avec une tension nominale de 100 kV. Son développement fut dirigé par Uno Lamm, que l'on considère encore aujourd'hui comme (le père de l'HVDC) [11]. Il s'agit également de la première liaison sous-marine.

En 1972, la première liaison utilisant uniquement des thyristors (le projet EeL River) à permis de faire le lien entre deux zones asynchrones le Québec et le Nouveau-Brunswick [12]. C'est une connexion de type dos à dos (back-to-back) [13].

En 1978, la première liaison à l'échelle du Méga volt (le projet de Cahora Bassa) relie une station hydroélectrique sur le Zambèze et la ville de Johannesburg via une liaison de 533 kV [2]. Ce projet est important pour plusieurs raisons, la tension sur sa ligne est la plus haute à l'époque, que ce soit sur des liaisons AC ou DC [15]. La longueur de la ligne (1360 km) est aussi un record, et il s'agit de la première liaison HVDC sur le continent africain.

Le premier projet utilisant ces techniques (le projet Nelson River Bipole 2), donna lieu à une globalisation de l'utilisation de ces thyristors [2].

En 1986, le projet Itaipu est une liaison qui fait le lien entre la centrale hydro-électrique du barrage d'Itaipu et la ville de São Paulo. La mise en évidence de cette installation reste la plus importante liaison HVDC durant de nombreuses années (Puissance nominale de 6300 MW et tension 600 kV) [16].

Tout d'abord en matière de tension, elle ne fut dépassée qu'en 2010 par la liaison Yunnan-Guangdong et sa tension de 800 kV [17]. Puis en puissance nominale, par la liaison Xiangjiaba – Shanghai et ses 6400 MW [15].

En 1986, l'installation du premier HVDC multi-terminal, a permis de relier la production d'Hydro-Québec avec plusieurs villes.

En 1986, la première liaison de type VSC offre une panoplie de nouvelles possibilités. Tel que le contrôle indépendant des puissances actives et réactives et l'alimentation d'un réseau faible [13].

La première liaison de type MMC, (le projet Trans Bay Cable) à San Francisco, est le premier à utiliser un type spécifique de VSC qui est une nouvelle topologie utilisant les convertisseurs multi-niveaux modulaires (MMC). Elle permet notamment de diminuer les pertes et les besoins de filtres.

Aujourd'hui, la plupart des constructeurs de liaisons HVDC proposent des solutions VSC basées sur la technologie MMC [18]. La liaison Trans Bay Cable permet de transmettre 400 MW avec une tension DC de 200 kV et des convertisseurs comportant 216 sub-modules par bras.

En 2015, a été réalisé l'interconnexion HVDC France-Espagne : INELFE (Interconnexion Electrique entre la France et l'Espagne).

Cette interconnexion se fait à l'aide de câbles souterrains, constituée de deux liaisons indépendantes de 1000MW chacune de technologie VSC-MMC [17]. Le contrat de construction des convertisseurs a été octroyé à SIEMENS et les câbles ont été fournis par PRYSMIAN CABLES AND SYSTEMS.

Actuellement plus de 200 GW de capacité électrique dans 210 projets sont transportés par les lignes HVDC [19].

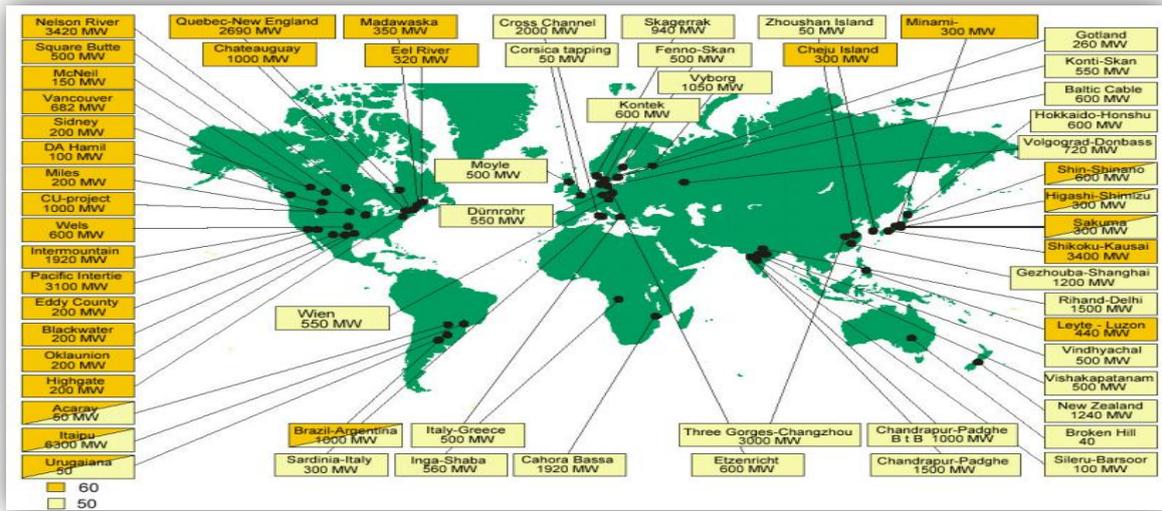
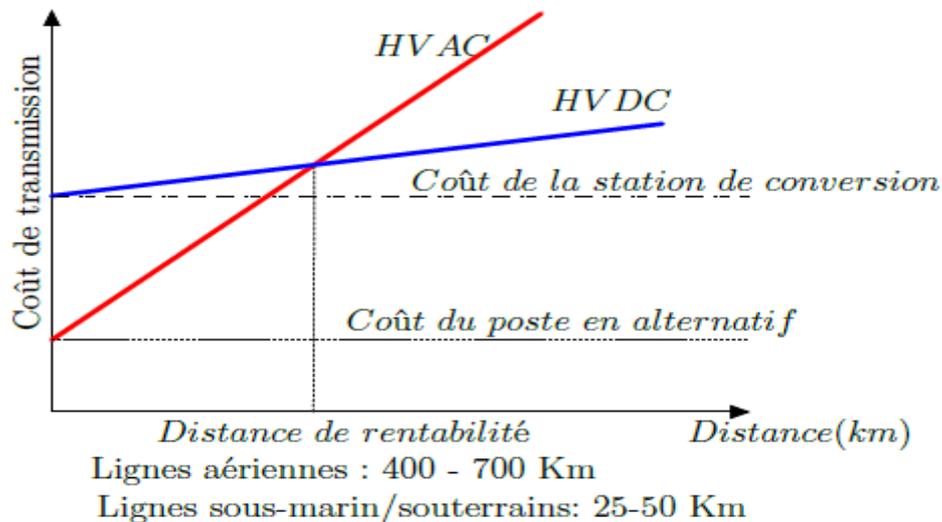


Figure I. 1: Liaisons HVDC dans le monde

**I.5. Intérêts des systèmes HVDC par rapport aux systèmes alternatifs**

Pour des raisons environnementales et techniques, l’installation des systèmes de transport par la liaison de haute tension à courant continu (HVDC : High Voltage Direct Current) est privilégiée par rapport aux systèmes HVAC (deux conducteurs sont nécessaires seulement au lieu de trois en tension alternative, et un seul conducteur si on utilise la terre ou l’eau de la mer comme deuxième conducteur). Économiquement, l’utilisation de la liaison HVDC pour transporter des grandes puissances sur de longues distances est moins coûteuse par rapport au transport par la liaison HVAC. Le seuil de rentabilité de l’utilisation de la liaison HVDC est interpréter entre 25 et 50 km pour l’interconnexion par câble (câble sous-terrain et/ou câble sous-marin) et entre 400 et 700 km pour les interconnexions par des lignes aériennes. À titre de comparaison, la Figure 1.2 montre le choix d’utilisation entre ces deux systèmes de transport d’énergie AC ou DC, en fonction du coût et de la distance [7].



**Figure I. 2:** Coûts relatifs comparés d'une liaison à courant continu et d'une liaison à courant alternatif

## I.6. Applications HVDC

### I.6.1. Liaisons souterraines ou sous-marines

Le transport à très haute tension par câbles sous-marins ou souterrains constitue une solution toujours très onéreuse à laquelle on n'a recours que lorsque le transport par lignes aériennes s'avère impossible. C'est le cas des liaisons sous-marines et des liaisons souterraines dans les zones fortement urbanisées, protégées ou dans lesquelles l'opinion publique s'oppose à la construction de nouveaux ouvrages de transport aériens [20].

### I.6.2. Lignes aériennes de grande longueur

L'exploitation de certaines ressources énergétiques naturelles (hydraulique, photovoltaïque, éolienne, géothermique...) nécessite un transport d'énergie sur de grandes distances vers les centres de consommation. Lorsque la distance est importante (au-delà d'environ 600km), le transport à courant continu est souvent la solution la plus économique car le gain réalisé sur le coût des lignes et des installations de compensation de puissance réactive dépasse le coût des stations de conversion aux extrémités [20].

### I.6.3. Interconnexions transfrontalières

Lorsque cela est possible (proximité géographique, règles d'exploitation communes), les réseaux de transports sont interconnectés en courant alternatif. Ces interconnexions permettent le secours mutuel en cas de perte d'un ouvrage, la mutualisation de la réserve primaire, le foisonnement en cas de décalage des pointes de consommation, les échanges commerciaux fondés sur des différences tarifaires.

Réalisée en courant alternatif, une interconnexion rend les deux réseaux qu'elle relie intimement dépendants, notamment en termes de maintien du synchronisme entre les différentes machines. Le transit de puissance sur l'interconnexion est par nature aléatoire et varie autour d'une valeur objective [20].

#### **I.6.4. Interconnexions entre réseaux asynchrones**

L'interconnexion de deux réseaux asynchrones (fréquences ou règles d'exploitation différentes) est impossible en courant alternatif. On utilise pour cela des convertisseurs AC/DC/AC dits « dos-à-dos » (ou back-to-back) qui sont des liaisons continues de longueur négligeable (quelques mètres). Cependant, certaines liaisons continues reliant des réseaux asynchrones assurent, en plus du transport de puissance, la fonction d'adaptation de fréquence.

#### **I.6.5. Augmentation de la capacité de transit**

La conversion de lignes de transport existantes en liaisons à courant continu permet d'augmenter fortement la capacité de transit. Cela pourrait constituer dans l'avenir, face aux pressions visant à préserver l'environnement, une solution d'ultime recours quand il faut nécessairement augmenter la capacité d'un couloir de lignes dans une région donnée.

#### **I.6.6. Stabilité du système de transmission**

Les liaisons HVDC peuvent être utilisées dans les systèmes AC synchrones pour améliorer le contrôle du flux de puissance d'une partie du système à l'autre et, par conséquent, pour éviter de grands défauts en cascade ou même des pannes d'électricité (blackouts) dans le réseau.

La stabilité du système peut être améliorée puisque la liaison HVDC fournit un couple d'amortissement important [20].

### **I.7. Configurations des systèmes HVDC**

Les ponts convertisseurs HVDC ainsi que les lignes ou les câbles peuvent être arrangés en plusieurs configurations comme il est indiqué dans la figure I.3 et la figure I.4.

#### **I.7.1 Liaison monopolaire**

Dans la configuration monopolaire, deux convertisseurs sont connectés par une ligne unipolaire et une tension continue positive ou négative est utilisée.

Dans la figure I.3 (a), un seul conducteur de transmission isolé est installé et la terre ou la mer fournit le chemin pour le courant de retour. Par exemple, le projet Konti-Skan (1965) et le projet Sardaigne - Italie (continentale) (1967) utilisent des liens monopolaires [21]. Il est également possible d'utiliser un conducteur de retour métallique comme voie de retour.

### I.7.2 Liaison Bipolaire

La configuration bipolaire, illustrée à la figure I.3 (b), utilise deux conducteurs isolés comme pôles positif et négatif. Les deux pôles peuvent fonctionner indépendamment

Si les deux neutres sont mis à la terre. La configuration bipolaire augmente la capacité de transfert de puissance.

En fonctionnement normal, les courants circulant dans les deux pôles sont identiques et il n'y a pas de courant de terre. En cas de défaillance d'un pôle, la transmission de puissance peut se poursuivre dans l'autre pôle, ce qui augmente la fiabilité.

La plupart des systèmes de transmission HVDC par ligne aérienne utilisent la configuration bipolaire [21].

### I.7.3 Liaison Homopolaire

La configuration homopolaire, illustrée à la figure I.3 (c), utilise deux conducteurs ou plus ont une polarité généralement négative et peuvent être exploités avec un retour par la terre ou un retour métallique. Cependant, le grand courant de retour à la terre est le principal inconvénient [22].

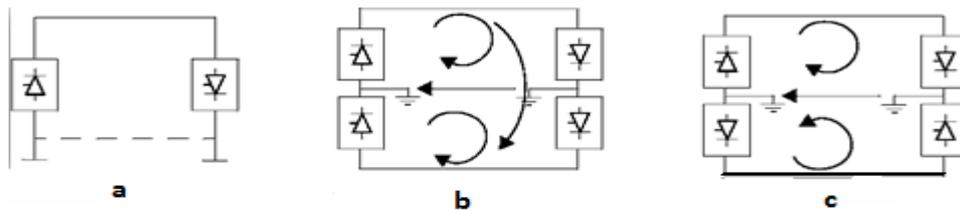


Figure I. 3: Des systèmes HVDC Monopolaire (a), bipolaire (b) et homopolaire (c)

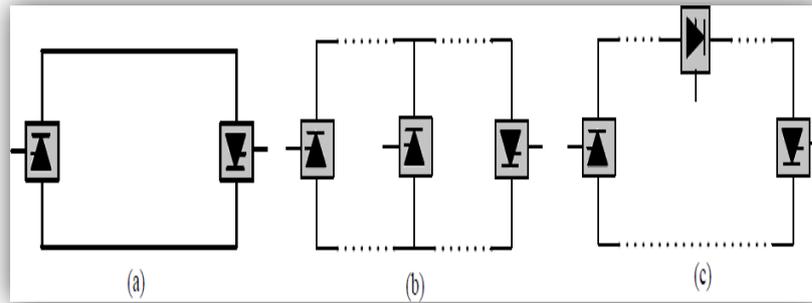
### I.7.4 Liaison Dos à Dos (back to back)

Cette configuration est commune pour connecter deux systèmes asynchrones AC adjacents. Deux stations de conversion sont situées sur le même site et la ligne ou le câble de transmission n'est pas nécessaire.

Un schéma fonctionnel d'un système dos à dos est illustré à la figure I. 4 (a) Les deux systèmes à courant alternatif interconnectés peuvent avoir des fréquences nominales identiques ou différentes, c'est-à-dire 50Hz et 60Hz. On peut trouver des exemples d'une telle configuration de système au Japon et en Amérique du Sud [23].

### I.7.5 Liaison Multi-terminaux

La configuration multi-terminale est caractérisé par existence de trois stations de conversion HVDC ou plus sont géographiquement séparées et interconnectées par des lignes ou des câbles de transmission.



**Figure I. 4:** Des systèmes HVDC dos-à-dos (a), parallèle multi-terminal (b) et série multi-terminal(c)

Le système peut être soit en parallèle où toutes les stations de conversion sont connectées à la même tension comme indiqué à la figure I.4(b), soit en série où une ou plusieurs stations de conversion sont connectées en série dans l'un ou les deux pôles comme indiqué à la figure I.4 (c) [24, 25].

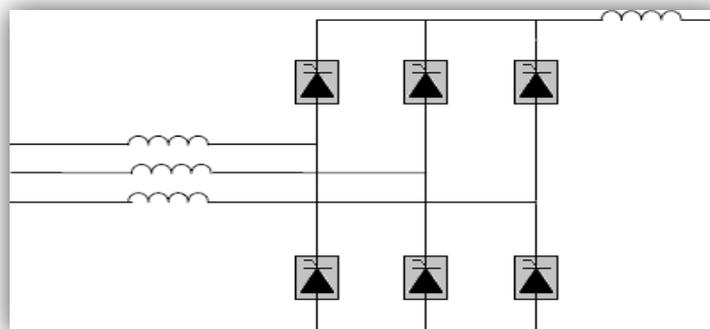
### I.8.Types des convertisseurs dans liaison HVDC

Il existe deux types de convertisseur utilisé dans la liaison HVDC, le convertisseur source de courant CSC "Current Source Converter" et le convertisseur VSC "Voltage Source Converter"

La technologie HVDC peut être soit VSC-HVDC ou CSC-HVDC selon le type de convertisseur utilisé.

#### I.8.1. Convertisseurs CSC

Un convertisseur source de courant CSC "Current Source Converter" ou Line Commutated Converter (LCC) utilise des thyristors pour la commutation, CSC- HVDC convient pour les projets de transport de longues distances et de très grande puissance. Les convertisseurs CSC-HVDC peuvent transmettre à peu près 6000MW avec une tension DC de  $\pm 800$  kV [26].



**Figure I. 5:** Un convertisseur source de courant CSC

### I.8.2. Convertisseurs VSC

Un convertisseur VSC "Voltage Source Converter" est un convertisseur source de tension à commutation forcée qui utilise des transistors IGBT "Insulated Gate Bipolar Transistor" et qui peut librement s'allumer et s'éteindre via un signal de commande. Qui est généré généralement par la modulation en largeur d'impulsion MLI (PWM, Pulse-Width Modulation) .Les convertisseurs VSC-HVDC ont une puissance nominale jusqu'à 1200MW avec une tension DC de  $\pm 320$ kV pour les câbles et jusqu'à 2400MW avec une tension DC de  $\pm 320$ kV pour les lignes aérienne [26].

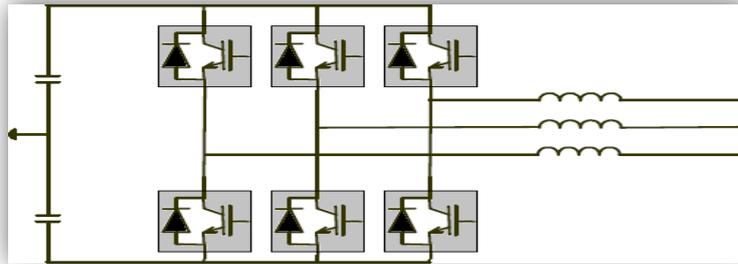


Figure I. 6 : Un convertisseur source de tension VSC

### I.9. Avantage des systèmes VSC-HVDC

Avec la venue des nouvelles technologies les liaisons de type VSC à base de composants IGBT, plusieurs possibilités sont offertes pour la transmission efficace dans les systèmes HVDC. Ce progrès donne beaucoup d'avantages et de possibilités pour l'industrie de l'énergie en utilisant des convertisseurs en source de tension (VSC).

Le système VSC-HVDC présente les avantages suivants par rapport aux systèmes CSC-HVDC [27.28] :

1. Le contrôle indépendant des puissances active et réactive.
2. L'inversement du flux de puissance plus simple (polarité des tensions ne change pas).
3. La commutation seulement par la présence des impulsions de gâchettes sur les IGBT. Elle ne nécessite pas de source alternative pour la commutation naturelle comme c'est le cas des thyristors.
4. La taille du convertisseur est plus petite que dans la liaison CSC-HVDC.
5. La facilité de mise en œuvre pour des systèmes à plusieurs terminaux, parce que la polarité du côté DC est la même du côté redresseur que du côté onduleur.
6. Contrairement à la technologie conventionnelle, il n'y a pas de communication entre chaque côté de la liaison, car le système de commande sur le redresseur et l'onduleur est fait indépendamment. Cet avantage peut améliorer la vitesse et la fiabilité du système de contrôle.
7. Le temps de réponse rapide grâce à une fréquence de commutation élevée avec la commande PWM.

8. Une offre dynamique plus élevée et, à la faveur des commandes de type MLI (les filtres sont plus réduits).

### I.10. Inconvénients de la technologie VSC-HVDC par rapport à la technologie CSC-HVDC

1. L'utilisation des IGBT, rend la liaison VSC-HVDC plus chère que la liaison CSC-HVDC.
2. Les défauts des lignes mises à la terre sont très problématiques.
3. En raison de la fréquence élevée de la PWM, les pertes sont plus grandes que dans la liaison CSC-HVDC [27.28].

### I.11. Composants élémentaires des systèmes VSC-HVDC

Les systèmes VSC-HVDC sont composés des liaisons entre plusieurs éléments tels que: transformateurs, filtres, convertisseurs, lignes de transmission, charges, et réseau. Par conséquent, nous pouvons les décrire comme un ensemble d'interconnexions entre des quadripôles. Seuls les transformateurs sont situés à l'extérieur du bloc de conversion. En suivant le flux de puissance à partir du réseau de départ figure I.7 on trouve les éléments constitutifs suivants :

#### I.11.1. Transformateurs de conversion

Le transformateur est un élément important dans un système HVDC. Il est utilisé pour transformer un système de tension et courant alternatif en un autre système de tension et courant de valeurs généralement différentes, à la même fréquence, dans le but de transmettre la puissance électrique d'un réseau à un autre.

#### I.11.2. Filtres alternatifs (AC)

Ces filtres ont pour fonction de réduire la perturbation harmonique dans le réseau en tension alternative en amont du poste de départ et en aval du poste d'arrivée. Les filtres AC sont constitués d'éléments passifs (condensateurs, inducteurs) dont le dimensionnement et les valeurs nominales sont calibrés en fonction des caractéristiques de la connexion.

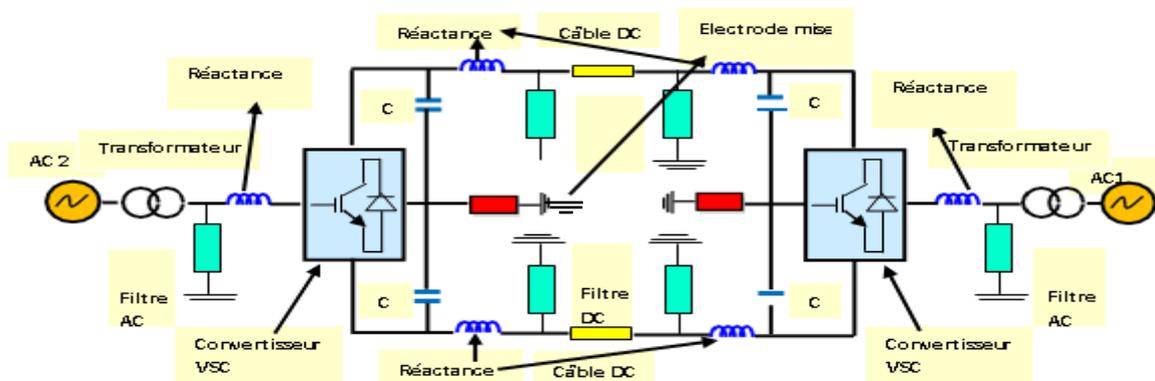


Figure I. 7: Schéma des éléments d'un système VSC-HVDC

#### I.11.3. Convertisseurs VSC

Le composant de base du convertisseur est un interrupteur statique capable d'établir et de couper un courant (contrairement au thyristor qui n'est capable que d'établir un courant). L'IGBT est couramment utilisé. Une diode de roue libre est connectée en antiparallèle avec cet interrupteur unidirectionnel en courant pour assurer le passage du courant dans les deux sens.

#### **I.11.4. Condensateurs DC**

Les condensateurs à courant continu stabilisent la tension côté DC du convertisseur. Ils sont des éléments les plus importants dans le circuit DC, dont les fonctions principales sont :

1. Servir comme accumulateur d'énergie.
2. Réduire les harmoniques et les ondulations de la tension continue.
3. Limiter les variations de tension.

#### **I.11.5. Réactances de phase**

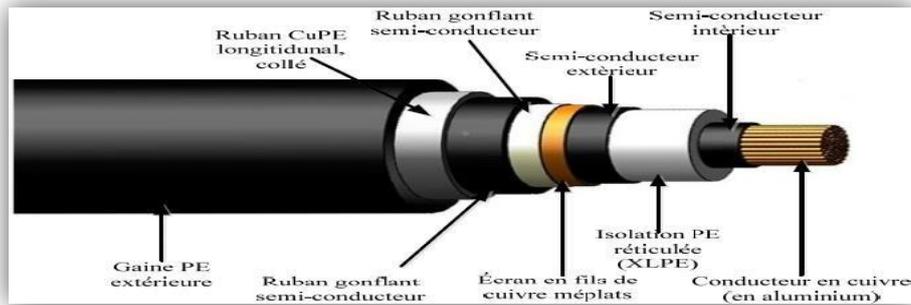
C'est l'élément AC le plus important dans le fonctionnement et la modélisation du système VSC-HVDC du côté AC du convertisseur. L'inductance de phase est constituée de bobines (éléments inductifs avec une faible résistance) pour chaque phase. Elle sert à atténuer les courants harmoniques de haute fréquence et limiter les courants de court-circuit. En outre, elle contrôle la puissance active et réactive. La taille de la réactance en phase détermine le comportement dynamique du côté AC du convertisseur

#### **I.11.6. Filtres DC**

Les filtres du côté DC permettent la réduction du bruit harmonique sur les lignes (câbles) en courant continu. En général, le condensateur du côté DC et la réactance de ligne de lissage sont utilisés pour bloquer les harmoniques dans le côté DC. Mais dans certaines circonstances (interférences avec d'autres câbles comme les câbles de communication), on peut installer un filtre DC.

#### **I.11.7. Câbles DC**

Dans les systèmes de transmission VSC-HVDC, les câbles souterrains présentent un grand nombre d'avantages significatifs par rapport aux lignes aériennes. Généralement ces conducteurs en aluminium ou en fils de cuivre ronds à brins concentriques. Le câble sous-marin XLPE comprend une couche d'isolation, une gaine métallique, une enveloppe, une armure, et une gaine extérieure servant de deux couches de fils de polypropylène [30]. La figure I.8 [29] représente un schéma d'un câble sous-marin unipolaire utilisé dans la transmission VSC-HVDC.



**Figure I. 8:** Schéma d'un câble sous-marin unipolaire d'un système VSC-HVDC

### I.12. Domaines d'application des systèmes VSC-HVDC

Les principaux domaines d'application de la technologie VSC-HVDC sont les suivants [31] :

1. La connexion de sources d'énergie renouvelables telles que les éoliennes.
2. L'acheminement de l'électricité vers des îles.
3. L'apport d'énergie à des grandes villes qui sont soumises à des contraintes environnementales et de sécurité.

### I.13. Evolution des topologies des convertisseurs VSC

L'utilisation des convertisseurs en source de tension est très intéressante dans des plateformes en mer (station offshore) et ceci due au fait que les convertisseurs VSC produisent moins d'harmoniques permettant de réduire le nombre de filtres passifs nécessaires. Il en résulte un gain du coût de l'installation.

Un système de transmission de type VSC-HVDC contient essentiellement deux blocs VSC situés de part et d'autre d'un câble DC, ou bien montés en tête bêche. Ces blocs sont en fait constitués de modules élémentaires assemblés selon une topologie variable.

On peut distinguer de façon générale, des topologies à 2 niveaux, 3 niveaux ou bien multi niveaux MMC (Modular Multi-level Converter).

Les premières installations, sur une topologie à deux ou trois niveaux, suivant les constructeurs, utilisaient la technologie MLI (Modulation par Largeur d'Impulsions). La MLI consiste à générer les signaux de commande des semi-conducteurs en comparant un signal de consigne avec un signal de type porteuse triangulaire (ou en dents de scie).

L'onde à la sortie du convertisseur est un signal fortement découpé, mais sa composante fondamentale a la même allure que le signal de référence avec la propriété de repousser les harmoniques autour de la fréquence de découpage.

Toutefois, des filtres doivent être construits pour éliminer les harmoniques. Ils prennent beaucoup de place, environ la moitié de la surface de la station, et restent coûteux [32] [33].

#### I.13.1. Topologie à deux niveaux

Les convertisseurs à deux niveaux sont la variante la plus simple de la technologie VSC. Ils reprennent les fondamentaux de la technologie LCC, c'est-à-dire les thyristors en les remplaçant par des IGBT, auxquels sont ajoutés des diodes antiparallèles pour la réversibilité du courant. Les interrupteurs sont contrôlés par la modulation de largeur d'impulsion (MLI) et les pertes de commutation sont réduites à un niveau plus bas.

Pour le convertisseur LCC, la bobine de lissage utilisée pour lisser le courant est remplacée par des capacités de filtrage de la tension, pour recréer une tension alternative avec seulement deux niveaux de tension [34].

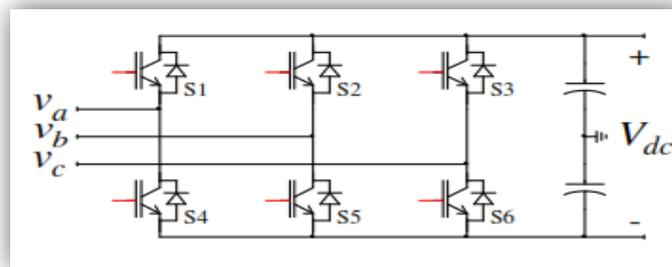


Figure I. 9: Convertisseur VSC-HVDC à deux niveaux

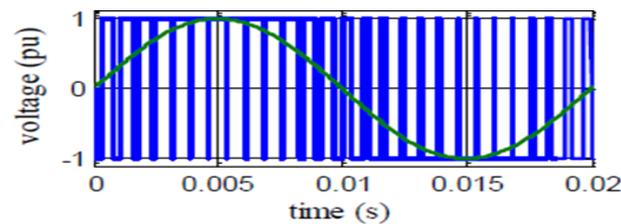


Figure I. 10: Forme d'onde de la tension

### I.13.2. Topologie à trois niveaux

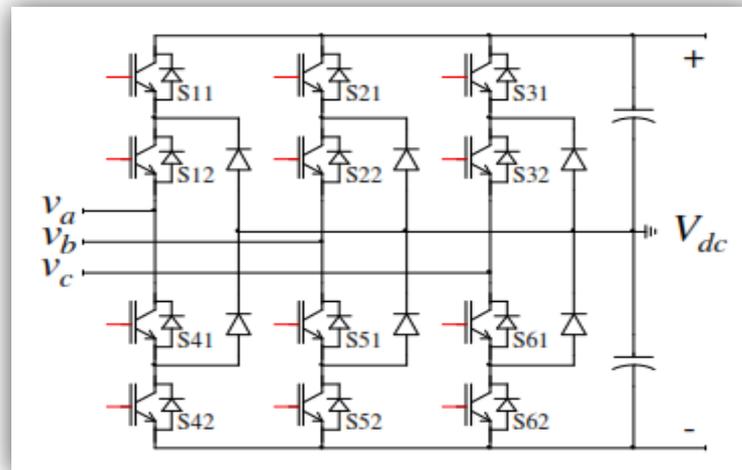
Une façon de réduire les harmoniques sans augmenter les pertes de commutation est de séparer la tension continue en plusieurs niveaux de tensions. Cette topologie, appelée NPC (Neutral Point Clamped), est constituée de deux diodes insérées dans chaque phase, ce qui permet de diviser la tension  $V_{dc}$  en deux. Cette structure multi-niveau permet de réduire les pertes globales et les harmoniques. Toutefois, en raison de la complexité du processus de commutation, l'équilibrage des tensions des condensateurs et des limites pratiques, les installations de systèmes HVDC basées sur la topologie NPC ont été limitées à trois niveaux. La figure I.11 montre un convertisseur VSC-HVDC à trois niveaux.

Cette topologie présente des avantages tels que :

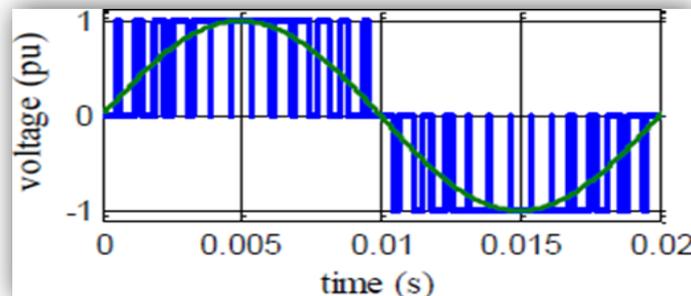
1. Raisonnablement petits condensateurs à courant continu.
2. Faible encombrement.
3. Bonne forme d'onde CA.

Par contre, les inconvénients sont :

1. La difficulté de stabiliser les tensions CC du condensateur.
2. La complexité des circuits augmente en fonction du nombre de niveaux. De même que le convertisseur a deux niveaux, la figure I.12 présente la tension de référence désirée (en vert) et la tension actuellement réalisée côté AC (en bleu) [34].



**Figure I. 11 :** Convertisseur VSC-HVDC à trois niveaux



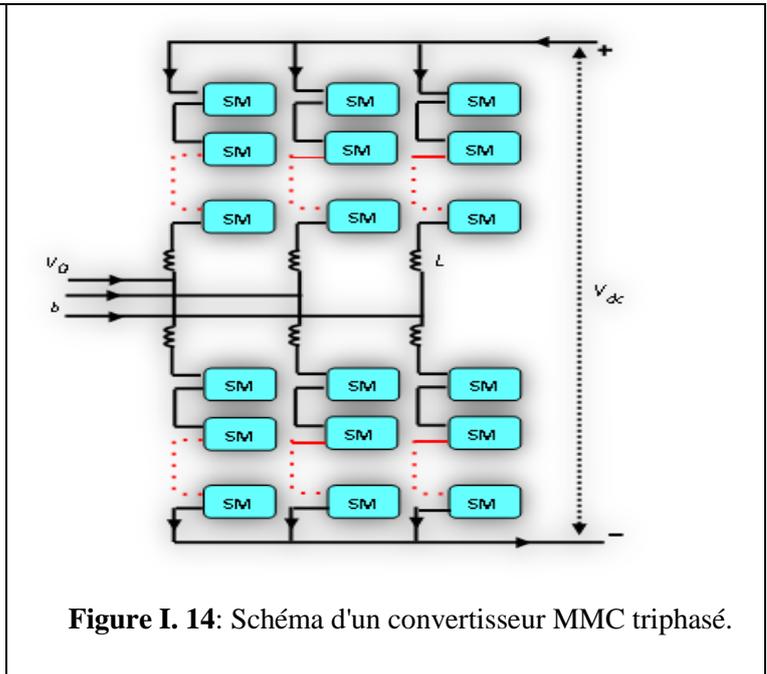
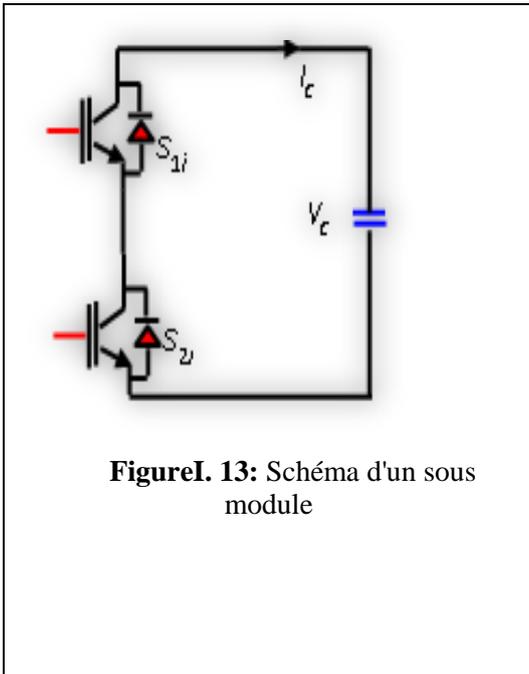
**Figure I. 12:** Forme d'onde de la tension

### I.13.3. Topologie MMC

La technologie VSC-HVDC est relativement récente. Sa structure n'a cessé d'évoluer, utilisant à ses débuts la MLI, d'abord sur une base à 2 niveaux, puis à 3 niveaux, mais avec la difficulté d'assembler des centaines de IGBT et de diodes en série pour former des valves à très haute tension et le besoin de maîtriser les pertes par commutation dissipées dans ses convertisseurs, les constructeurs ont privilégié des structures modulaires où de nombreux modules sont connectés en cascade. On parle donc de convertisseurs à multi-niveaux MMC (Modular Multilevel Converter) allant de quelques dizaines de niveaux à plusieurs centaines en fonction de la technologie et du

niveau de tension [34].

La figure I.14 montre un schéma structurel du convertisseur de la topologie MMC



**I.14. Conclusion**

Les systèmes HVDC d'aujourd'hui sont d'une technologie très mature et évoluent rapidement pour des tensions plus élevées d'une grande puissance et avec une grande flexibilité. Le monde est confronté à d'énormes défis pour fournir de l'énergie à une population croissante d'où le HVDC joue un rôle important.

Dans ce qui suit nous nous intéresserons à la modélisation et au contrôle des systèmes VSC-HVDC, qui sera le sujet principal de ce chapitre.

# **Chapitre II**

## **Modélisation Et Contrôle Des Systèmes VSC-HVDC**

**II.1. Introduction**

Le développement de nouvelles topologies, de nouvelles techniques de commande et de contrôle sont les principaux objectifs des chercheurs. Ces développements se concentrent sur l'amélioration de la stabilité, la minimisation des pertes et l'amélioration du rendement du système global. [35]

Dans ce chapitre, il est important de commencer la modélisation des différents éléments du réseau.

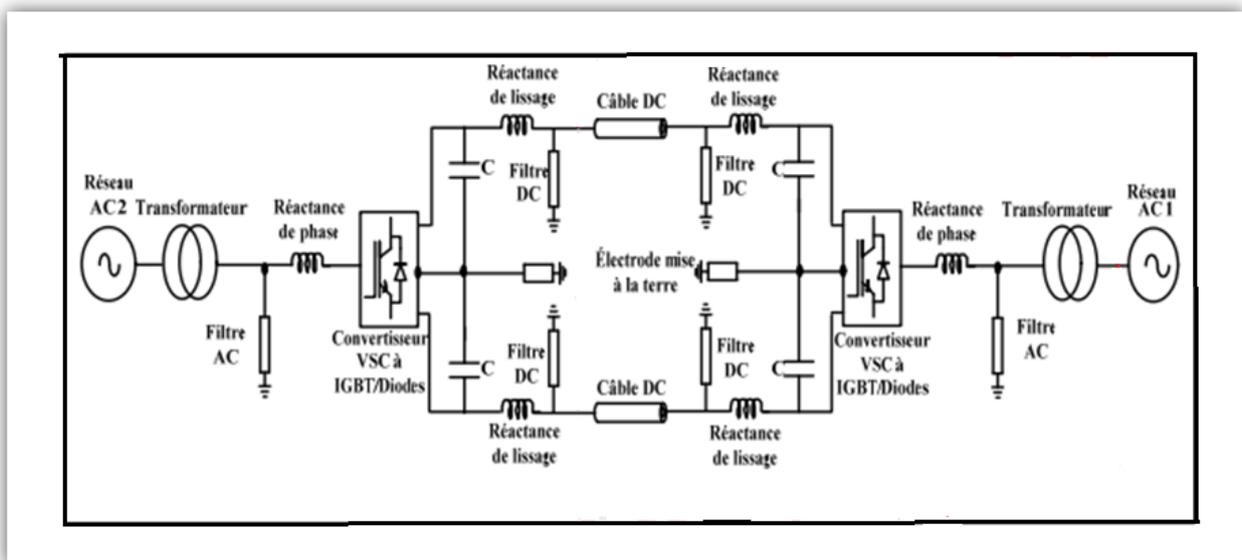
Nous décrivons ensuite la liaison VSC-HVDC et son principe de fonctionnement avec la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI).

Enfin, nous contrôlons notre système à travers plusieurs régulateurs classique et pour améliorer les performances et atteindre la rentabilité et optimiser le transfert d'énergie on applique une commande adaptative sur notre système VSC-HVDC.

**II.2. Modélisation des éléments du réseau**

Dans un système de transmission de puissance CC (dos à dos), le redresseur et l'onduleur sont d'une part localisée dans une même station et sont liés par une ligne continue de quelques mètres. D'autre part, ils sont reliés par l'intermédiaire d'une inductance en série pour les convertisseurs CSC (Flourentzou, Agelidis et Demetriades, 2009). Ou d'un condensateur en parallèle pour les convertisseurs VSC (Xiaoguang et Guangfu.) Figure II.1 qu'est notre cas.

Le système VSC-HVDC nécessite des équipements présentés à la Figure II.1



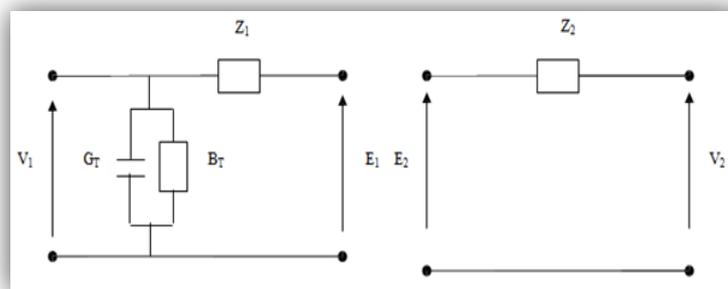
**Figure II. 1 :** Schémas des éléments de SVC-HVDC

### II.2.1. Transformateurs

Les deux stations, redresseur et onduleur, ont une structure identique.

Le premier élément en lien avec le réseau est un transformateur Yg-D de puissance nominale  $S_n = 200\text{MVA}$ , qui permet de faire le lien avec la tension du réseau (230 kV) et une tension acceptable pour le convertisseur (100kV). La tension DC vaut quant à elle -100/+100 kV.

Le transformateur est un convertisseur statique à induction électromagnétique, qui permet de transformer une tension sinusoïdale en une autre tension sinusoïdale de valeur efficace différente ou égale. (Cas de transformateur d'isolement). Le schéma équivalent monophasé d'un transformateur triphasé est monté dans la figure (II. 2).



**Figure II. 2:** Schéma équivalent monophasé d'un transformateur triphasé

Où :

$Z_1 = R_1 + j.X_1$  : est l'impédance de l'enroulement primaire.

$Z_2 = R_2 + j.X_2$  : est l'impédance de l'enroulement secondaire.

$Y_T = G_T + jB_T$  : est l'admittance du transformateur (représentant les pertes fer) [36].

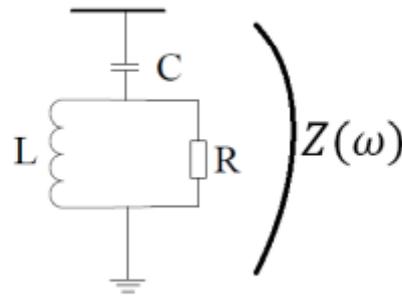
### II.2.2. Filtres

Les structures utilisées sont différentes suivant le type de convertisseur. Dans ce chapitre, nous ferons l'inventaire des différents filtres utilisés pour chaque type de liaison HVDC. Les filtres permettent de préserver la qualité de la tension en minimisant l'impact des harmoniques produits par le convertisseur. Ils peuvent également jouer un rôle de compensation en puissance réactive. En effet, produire de la puissance réactive localement, proche des convertisseurs (et donc des impédances de liaisons qui en consomment) permet de corriger le facteur de puissance. C'est utile pour pouvoir réduire la puissance apparente, et donc permettre un plus grand transit de puissance active.

#### II.2.2.1. Filtres AC

Afin d'éliminer les harmoniques produites par le convertisseur, deux filtres sont placés en

parallèle dans le circuit. Ces filtres sont de type passe-haut du second ordre.



**Figure II. 3:** Filtre passe-haut du second ordre

Soient :

- $\omega_0$  la fréquence fondamentale
- $V$  la tension AC appliquée au filtre [pu]

Pour caractériser les filtres, on utilise les 3 paramètres suivant : le facteur de qualité ( $Q_{ual}$ ), l'ordre harmonique de coupure  $h_c$  et l'apport de puissance réactive  $Q$  définis comme suit :

$$Q_{ual} = \frac{R}{\sqrt{\frac{L}{C}}} \quad \text{II. 1}$$

$$h_c \cdot \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \quad \text{II. 2}$$

$$Q_{ual} = I_m \left( \frac{V^2}{Z(\omega_0)} \right) \quad R \rightarrow \infty \quad \text{II. 3}$$

Ces paramètres sont choisis en fonction des besoins. Nous pouvons maintenant dimensionner  $C$ ,  $L$  et  $R$  en fonction

$$C = \frac{(h^2 - 1) \cdot Q_{ual}}{h^2 \cdot \omega_0 \cdot V^2} \quad \text{II. 4}$$

$$L = \frac{1}{c \cdot h^2 \cdot \omega_0^2} \quad \text{II. 5}$$

$$R = Q_{ual} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{II. 6}$$

### II.2.2.2. Filtre DC

Dans le cas des liaisons VSC-HVDC, on utilise des condensateurs pour minimiser l'ondulation de la tension DC. Mais ces capacités ont aussi un rôle dans la transmission de puissance. Il faut dès lors faire un compromis entre une taille maximale pour cette capacité de

manière à avoir un contrôle de puissance assez rapide, et une taille minimale pour ne pas avoir une ondulation trop importante de la tension DC. Ce qui nous donne les bornes suivantes

$$(C_{DC})_{\min} = \frac{S_N}{2 \cdot \omega_0 \cdot u_{DC,n} \cdot (\Delta u_{DC})_{\max}} \quad \text{II. 7}$$

Avec  $S_N$  la puissance apparente nominale,  $u_{DC,n}$  la tension DC nominale,  $(\Delta u_{DC})_{\max}$  l'ondulation maximale acceptable (crête à crête) et  $\omega_0$  la fréquence électrique fondamentale.

$$(C_{DC})_{\max} = \Gamma \cdot \frac{S_N}{u_{DC,n}^2 / 2} \quad \text{II. 8}$$

Avec  $\tau$  la constante de temps correspondant à la durée nécessaire pour charger la capacité jusqu'à la tension  $u_{DC, n}$ , quand une puissance  $S_N$  transite à travers le convertisseur. Cette constante doit être suffisamment petite pour assurer un contrôle de puissance assez rapide. Ces capacités sont placées près des convertisseurs, à chaque extrémité du lien DC, une entre le pôle positif et la masse, et une autre entre le pôle négatif et la masse, comme représenté dans la figure II.4

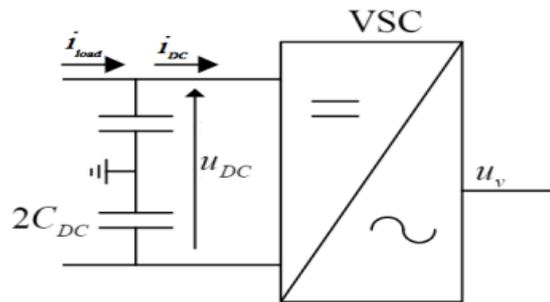


Figure II. 4 : Condensateur  $u_{DC}$

### II.2.3. Modélisation des lignes

Les lignes sont représentées par un quadripôle symétrique donné par un schéma de type en  $\pi$ . La figure (II. 5), illustre le schéma en  $\pi$  de la ligne, où  $r_{ij}$ ,  $x_{ij}$  et  $b_{ij}$  sont représentés respectivement par la résistance, la réactance et la demi-susceptance transversale (coté i) de la ligne i-j [37].

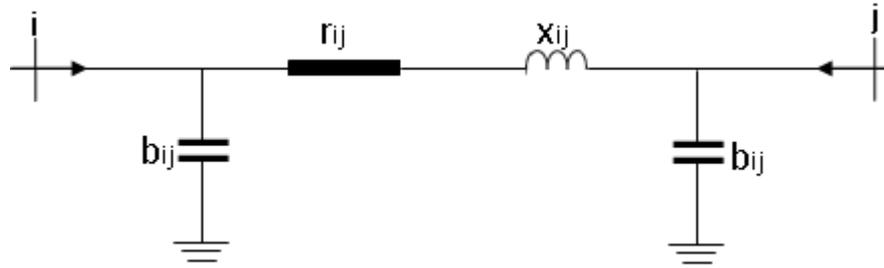


Figure II. 5: Schéma en  $\pi$  d'une ligne de transmission.

L'admittance élémentaire de la ligne i-j est donnée par la relation :

$$Y_{Li} = \frac{1}{r_{ij} + jX_{ij}} \quad \text{II. 9}$$

#### II.2.4. Modélisation des charges

Le modèle équivalent d'une charge est représenté par une admittance Y définie par :

$$Y_i = \frac{P_i - jQ_i}{v_i^2} \quad \text{II. 10}$$

$V_i$  : Tension aux bornes de la charge ;

$P_i, Q_i$  : puissances actives et réactives consommées par la charge i ;

$Y_i$  : admittance de la charge [3,38].

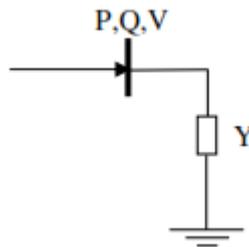


Figure II. 6: Schéma équivalent d'une charge

#### II.2.5. Modélisation des éléments shunt

Les dispositifs shunt, généralement utilisés pour la compensation réactive et le maintien de la tension, sont modélisés par des admittances  $Y_{i0}$  de la forme :

$$Y_{i0} = g_{i0} + jb_{i0} \quad \text{II. 11}$$

Le système général représentant un élément shunt, est donné à la figure (II.7.a), la susceptance  $b_{i0}$  peut être inductive ou capacitive. Dans le premier cas, l'élément consomme de la puissance réactive figure (II.7.b), alors qu'il en fournit au système dans la seconde figure (II.7.c). [37].

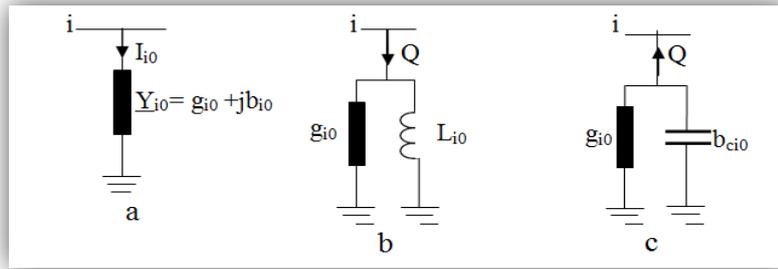


Figure II. 7: Modèle des éléments shunt : a) symbole, b) élément inductif, c) élément capacitif

II.2.6. Modélisation VSC

La seconde génération d’HVDC utilise la technologie VSC. La différence principale par rapport aux CSC consiste à utiliser d’autres composants à la place des thyristors. La plupart du temps, on utilise des IGBT associés à des diodes antiparallèles, mais on peut également utiliser des thyristors GTO [39].

Il s’agit d’une mise en série d’interrupteurs IGBT/diode. Étant donné que les IGBT ne peuvent pas supporter une trop grande tension et que le lien DC est directement relié à ce groupe, le nombre d’interrupteurs mis en série dépendra de l’ordre de grandeur de  $u_{dc}$ . Tous les interrupteurs d’un groupe sont activés et désactivés simultanément, en fonction de la commande générée par le générateur PWM, Le fonctionnement d’un groupe est similaire à celui d’un seul couple IGBT/diode [35].

Dans notre cas on utilise un VSC à trois niveaux comme montre la figure II.8

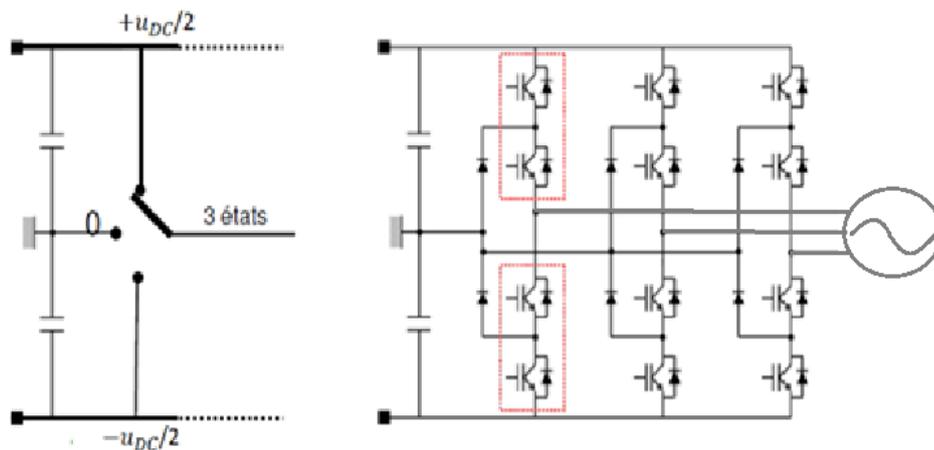


Figure II. 8: Convertisseur à trois niveaux (diode parallèle)

Les avantages de la topologie à multi-niveaux sont :

- Raisonnablement petits condensateurs à courant continu ;
- Faible encombrement ;
- Bonne forme d'onde CA.

Par contre, les inconvénients de la topologie multi-niveaux sont :

- La difficulté de stabiliser les tensions CC du condensateur ;
- La complexité des circuits augmente en fonction du nombre de niveaux.

Cette topologie a été présentée la première fois par Nabae et Akagi (1981). Elle avait pour but d'ajouter un niveau de tension intermédiaire à la tension de sortie d'un onduleur afin de réduire les harmoniques. La figure II.9 montre un convertisseur NPC trois niveaux ainsi que les séquences de fonctionnement du convertisseur.

| Etat     | T <sub>x1</sub> | T <sub>x2</sub> | T <sub>x3</sub> | T <sub>x4</sub> |
|----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Positive | 1               | 1               | 0               | 0               |
| Zéro     | 0               | 1               | 1               | 0               |
| Négative | 0               | 0               | 1               | 1               |

Tableau II. 1 : Table de commutation du convertisseur NPC 3 niveaux [50].

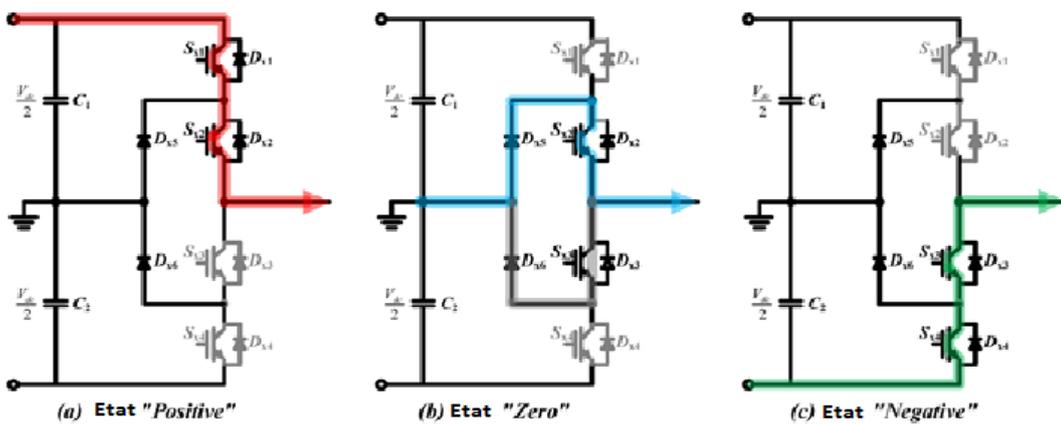
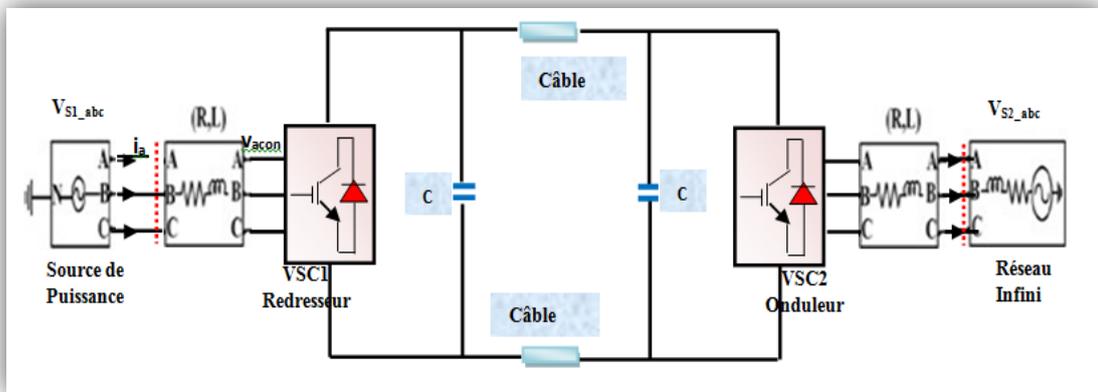


Figure II. 9: Tensions produites par le convertisseur NPC 3 niveaux [50].

### II.3. Principe de fonctionnement et configuration d'un système VSC-HVDC

Le principe de fonctionnement peut être résumé comme suit : Le système VSC-HVDC se compose de deux convertisseurs de type VSC (IGBT) à base de semi-conducteurs, dont l'un agit

comme un redresseur pour injecter de la puissance active dans le système CC. L'autre fonctionne comme un onduleur en extrayant la puissance active de la liaison HVDC et en l'injectant dans le réseau AC. Ces rôles peuvent être inversés en changeant le sens du courant. Les deux convertisseurs sont reliés par un bus à courant continu. La figure II.10 montre la puissance continue transitée par l'intermédiaire d'un câble de transmission. Le VSC peut fonctionner de manière capacitive ou inductive selon deux modes : onduleur ou redresseur. Le système VSC-HVDC peut améliorer la stabilité de transmission, réduire les pertes du réseau et empêcher la propagation des défauts. Le principal avantage de la transmission VSC est sa capacité à contrôler indépendamment la puissance réactive des deux terminaux.



**Figure II. 10:** Schéma d'un système VSC-HVDC

La direction du flux de puissance est déterminée par la direction du courant continu.

#### II.4. Contrôle

Sur la figure II.11, on observe la structure de contrôle d'une liaison VSC-HVDC. Cette liaison est contrôlée par les deux convertisseurs aux extrémités du bus DC. L'un des deux se charge de contrôler la tension du bus DC, tandis que l'autre se charge de contrôler le flux de puissance active ou la fréquence. La tension doit toujours être maintenue à une valeur de référence, et sa polarité ne peut en aucun cas s'inverser [41]. On inverse le flux de puissance en changeant le sens du courant DC [42]. Parallèlement à cette commande de tension DC/puissance active, chaque poste peut aussi être commandé pour débiter une certaine puissance réactive ou sortir une certaine tension AC, en fonction des besoins.

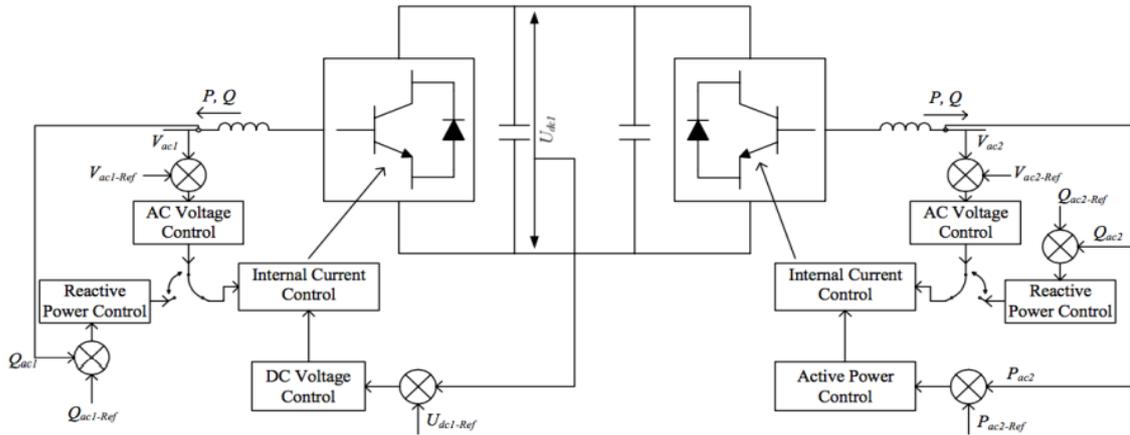


Figure II. 11: Structure de contrôle d'une liaison VSC- HVDC

En sortie du convertisseur, on observe une tension  $u_v$  et un courant sortant  $i_v$

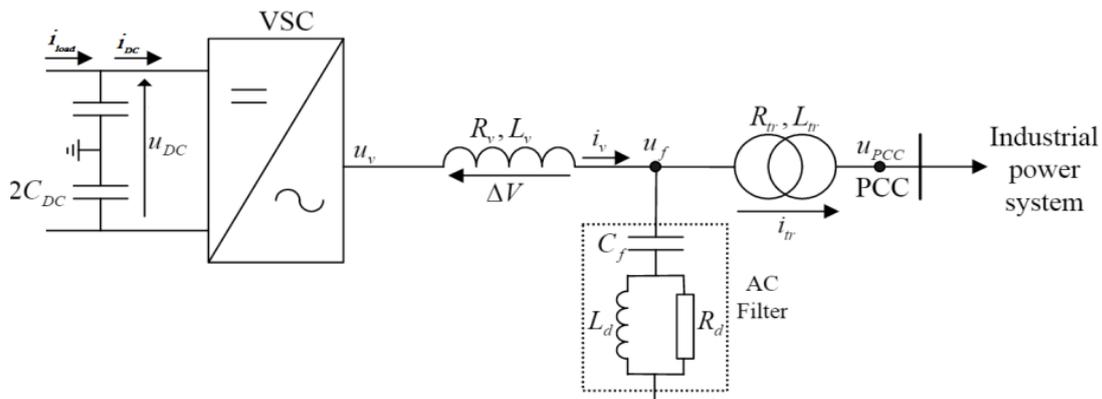


Figure II. 12: Structure de contrôle d'une station VSC-HVDC

Le contrôle des VSC-HVDC consiste en une boucle de contrôle interne (rapide) commandée par une boucle de contrôle externe (plus lente). Comme montre La Figure II.13

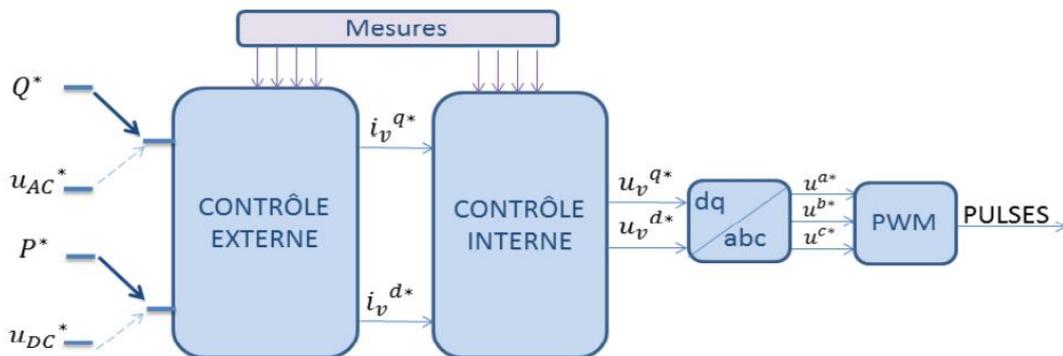


Figure II. 13: Structure de contrôle d'une station VSC-HVDC

Les valeurs de référence  $Q^*/u_{AC}^*$  et  $P^*/u_{DC}^*$  sont renseignées à la boucle de contrôle externe. Ce contrôle génère la référence pour le courant  $i_v$ , exprimée dans un système dq0. Le contrôle interne se charge ensuite de générer le signal de référence pour la tension  $u_v$ .

Enfin il faut la traduire dans le repère abc pour la renseigner à la PWM qui se charge ensuite de contrôler les IGBT.

#### II.4.1. Contrôle du VSC

On considère le circuit simple à deux bus illustrés à la figure II. 14. Les puissances active et réactive sont déterminées par l'inductance équivalente  $X$  entre la source et le convertisseur et l'amplitude et l'angle entre les deux vecteurs de tension [6].

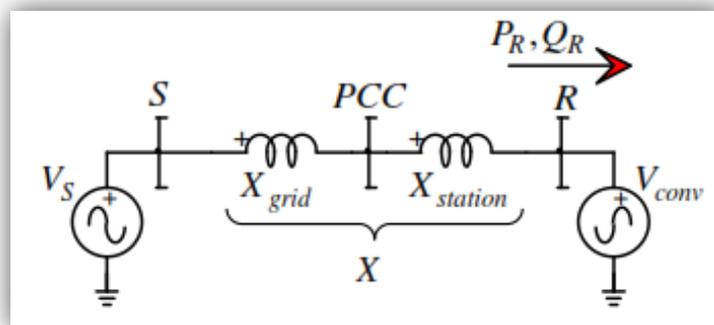


Figure II. 14: Schéma de principe d'un VSC.

À partir de la source vers le convertisseur, les puissances actives et réactives transférées sont données par les relations suivantes :

$$P_R = \frac{V_S V_{conv}}{X} \sin(\delta) \quad \text{II.12}$$

L'équation (II.12) décrit la puissance active échangée entre le convertisseur VSC et le réseau AC.

Où :

$V_S$  est la tension de la source du système AC,

$V_{conv}$  est la tension aux bornes du convertisseur VSC,

$X$  est la réactance reliant le système AC au VSC

$\delta$  indique l'angle de tension entre le système AC et le VSC.

La puissance réactive échangée entre le convertisseur VSC et le réseau AC est décrite par l'équation :

$$Q_R = \frac{V_S V_{conv} \cos(\delta) - V_{conv}^2}{X} \quad \text{II.13}$$

En supposant que l'angle  $\delta$  est petit, les équations (II.13) peuvent être linéarisées :

$$P_R = \frac{V_S V_{conv}}{X} \delta \quad \text{II.14}$$

$$Q_R = \frac{V_{conv}(V_S - V_{conv})}{X} \quad \text{II.15}$$

Il ressort de la formule (II.15) on peut voir qu'à travers le contrôle de l'angle de déphasage et l'amplitude de la tension du convertisseur, il est possible de réguler les puissances active et réactive respectivement, à un point de fonctionnement désiré [6].

#### II.4.2. Techniques de modulation

La modulation désigne l'ensemble des techniques qui permettent de générer un signal quantifié, image du signal de référence continu. La modulation a pour objectif de générer la représentation la plus proche du signal de référence à partir d'un nombre de niveaux de tensions fixé. Elle ne nécessite pas la connaissance de la topologie du convertisseur qui va appliquer cette représentation à la charge, au contraire de la commande qui applique la représentation obtenue au convertisseur, et ce qui nécessite la connaissance précise de la topologie et de son fonctionnement. Le signal de référence est l'image du signal qu'il faudrait idéalement appliquer au convertisseur.

##### II.4.2.1. Modulation de largeur d'impulsion (MLI)

La technique de commande par modulation de largeur d'impulsion appliquée à la commande d'un convertisseur VSC consiste à générer un signal de déclenchement semi-conducteur en comparant un signal de consigne ou de référence à un signal de type porteuse triangulaire ou en dents de scie [12], comme le montre la figure II. 15. L'onde en sortie du convertisseur est un signal fortement haché, mais sa composante fondamentale a la même allure que le signal de référence. Ce processus de modulation est utilisé pour éliminer les harmoniques et réduire les pertes de conversion. Le convertisseur peut réduire la commutation des commutateurs lorsque le courant est élevé.

À mesure que la fréquence augmente, les harmoniques deviennent plus atténuées, mais l'efficacité du convertisseur diminue également, et il y a une augmentation des pertes et des

problèmes de conception du dissipateur thermique. Par conséquent, le choix de la fréquence est l'une des décisions les plus importantes dans la technologie VSC-HVDC [38].

Deux paramètres caractérisent cette commande :

L'indice de modulation ( $m$ ) qui définit le rapport entre la fréquence du signal porteur ( $f_p$ ) et la fréquence du signal de référence ( $f_{ref}$ ).

$$m = \frac{f_p}{f_{ref}} \tag{II.16}$$

Le taux de modulation ( $r$ ) qui donne le rapport de l'amplitude de la modulante ( $v_{ref}$ ) et la valeur crête du signal porteur ( $v_p$ ).

$$r = \frac{v_{ref}}{v_p} \tag{II.17}$$

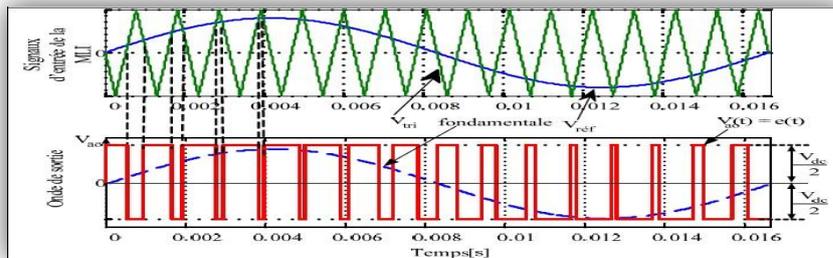


Figure II. 15: Exemple technique de la Modulation de Largeur d'impulsion (MLI)

### II.4.3. Notions de systèmes dynamiques - performances

Un système dynamique est un système qui peut subir des variations prévisibles ou non, des grandeurs d'entrée, (consignes ou perturbations).

Les critères d'évaluation de tels systèmes sont la **précision**, la **rapidité** et la **stabilité**. [45].

#### ✓ Précision

Un système est dit précis lorsque la sortie suit l'entrée en toutes circonstances.

On distinguera 2 types de grandeurs suivant que le signal d'entrée est constant (échelon) ou variable (Rampe.) :

- **L'écart statique** noté  $\varepsilon_s$  : caractéristique en régime permanent de l'écart entre la consigne  $e(t)$  et la réponse  $s(t)$  lorsque le système est soumis à une entrée de type échelon  $e(t) = E_0 u(t)$ .

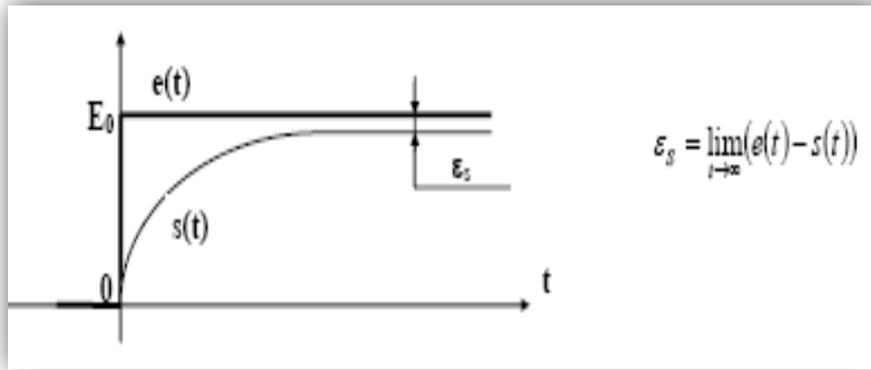


Figure II. 16: Exemple d'un critère de précision

- **L'écart dynamique** noté  $\epsilon_t$  ou  $\epsilon_v$  : caractéristique en régime permanent de l'écart entre la consigne  $e(t)$  et la réponse  $s(t)$  lorsque le système est soumis à une entrée de type Rampe :

$$e(t) = V \cdot t \cdot u(t)$$

Cet écart dynamique est encore appelé **écart de traînage** ou **écart de poursuite**.

On mettra en évidence 3 types de réponses avec :

$$\epsilon_v = \text{constante} \quad (\text{Fig II.17.1})$$

$$\epsilon_v = 0 \quad (\text{Fig II.17.2})$$

$$\epsilon_v \text{ Tendant vers l'infini} \quad (\text{Fig II.17.3})$$

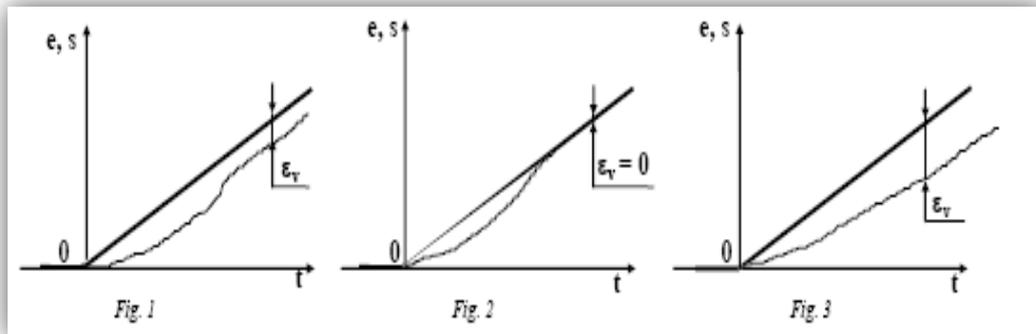


Figure II. 17: Exemple d'un critère

✓ **Stabilité**

Plusieurs types de comportement sont possibles lors de la variation d'une grandeur d'entrée :

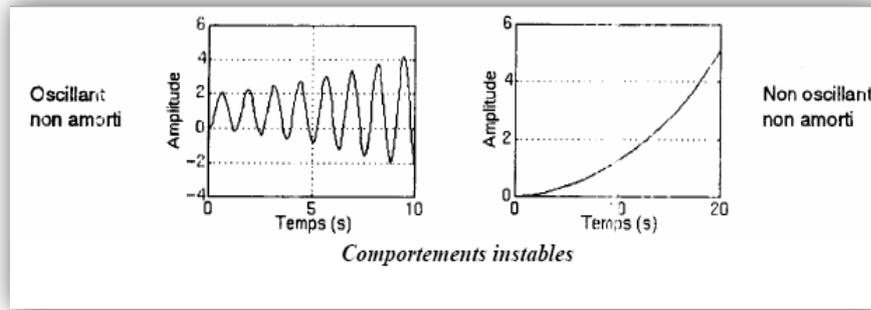


Figure II. 18: Comportements instables

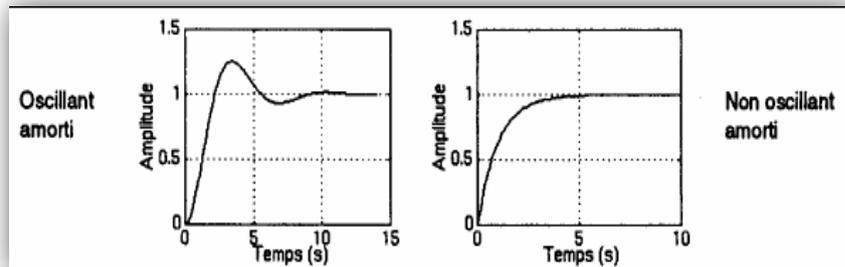


Figure II. 19: Comportements stables

✓ **Rapidité**

La rapidité est caractérisée par le temps que met le système à réagir à une variation brusque de la grandeur d'entrée (temps de réponse). Un système sera dit rapide s'il se stabilise à son niveau théorique en un temps jugé satisfaisant.

En pratique, on mesure ou on calcule le temps que met la réponse pour se stabiliser dans une zone comprise entre plus ou moins 5% de la valeur visée.

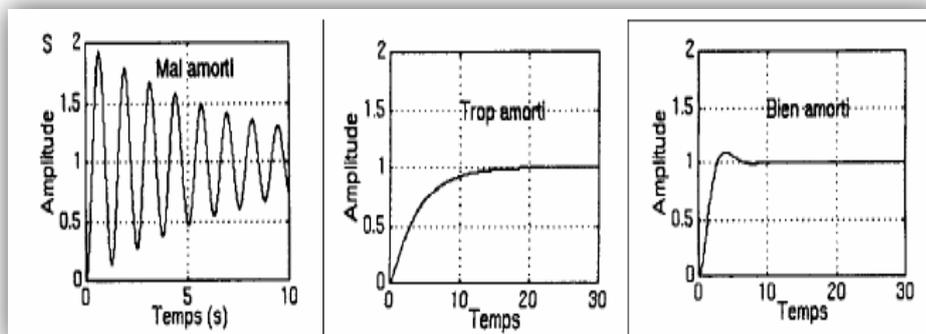


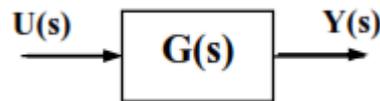
Figure II. 20: Les différents degrés de rapidité

On notera que le temps de réponse n'est pas le temps au bout duquel la réponse atteint 95% de la valeur visée mais le temps au bout duquel la réponse reste définitivement dans la zone  $\pm 5\%$  de la valeur finale.

**II.4.4. Notion de fonction de transfert**

Rappelons que :

Si nous considérons un système quelconque A, le plus général possible, possédant une entrée  $u(t)$  et une sortie  $y(t)$  :



**Figure II. 21:** Représentation d'un système quelconque à 1 entrée – 1 sortie

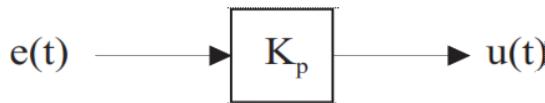
Par définition, la fonction de transfert du système de la figure II.22 est le rapport de la transformée de Laplace de la sortie à la transformée de Laplace de l'entrée quand toutes les conditions initiales sont nulles [45] :  $G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)}$ .

**II.4.5. Les Types Du Régulateurs**

✓ **Régulateur P**

Loi de commande du régulateur P :  $u(t) = K_p \cdot e(t)$  II.18

Fonction de transfert :  $G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p$  II.19



**Figure II. 22:** Schéma fonctionnel du régulateur P

✓ Régulateur PI

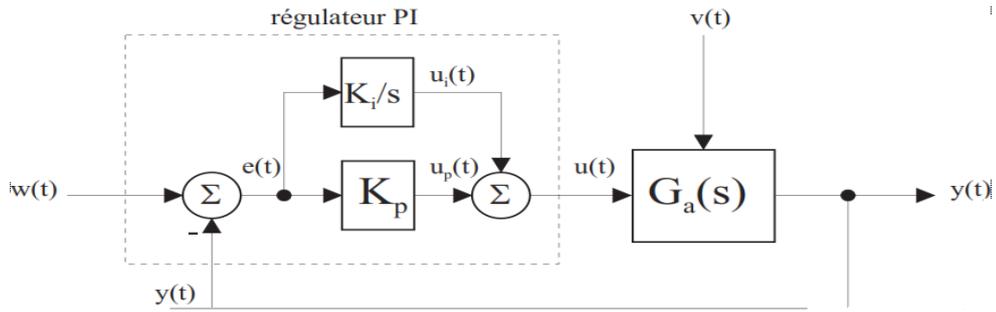


Figure II. 23: Régulateur PI

Loi de commande : 
$$U(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{1}{T_i} \int_{-\infty}^t e(t) \cdot d\tau \quad \text{II.20}$$

Fonction de transfert : 
$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \cdot \frac{1 + S \cdot T_i}{S \cdot T_i} \quad \text{II.21}$$

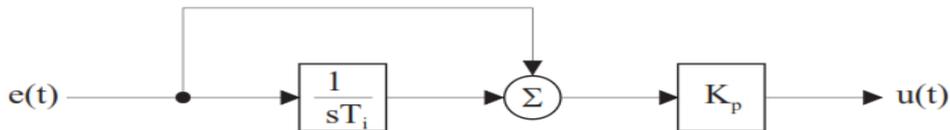


Figure II. 24: Schéma fonctionne du régulateur PI

✓ Régulateur PD :

Loi de commande 
$$U(t) = K_p \cdot \left( e(t) + T_d \cdot \frac{de}{dt} \right) \quad \text{II.22}$$

Fonction de transfert : 
$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \cdot (1 + ST_d) \quad \text{II.23}$$

✓ Régulateur PID :

Loi de commande : 
$$U(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{1}{T_i} \int_{-\infty}^t \left( e(t) \cdot d\tau + T_d \cdot \frac{de}{dt} \right) \quad \text{II.24}$$

Fonction de transfert : 
$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \cdot \frac{1 + S \cdot T_i + S^2 \cdot T_i T_d}{S \cdot T_i} \quad \text{II.25}$$

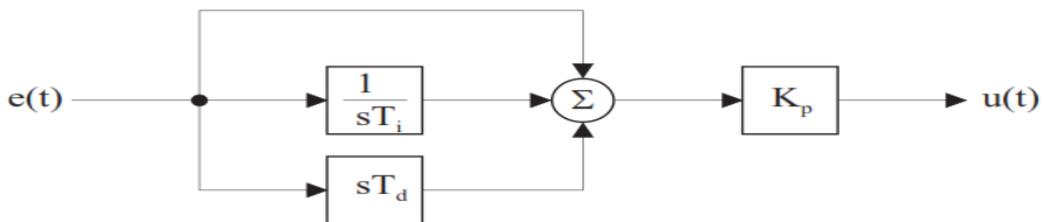


Figure II. 25: Schéma fonctionnel

| Action | Avantage                                                        | Désavantage                                                        |
|--------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| P      | Dynamique                                                       | Ne permet pas d'annuler une erreur statique                        |
| I      | Annulation d'erreur statique, amélioration de la robustesse     | Action lente, ralentit le système effet déstabilisant              |
| D      | Action très dynamique, améliore la rapidité (effet stabilisant) | Sensibilité aux bruits forte sollicitation de l'organe de commande |

**Tableau II. 2** : Résumé des effets respectifs des actions P, I, et D

## II.5. Définition de la Logique Floue

La logique floue est une extension de la logique booléenne formalisée par **Lotfi Zadeh** en **1965**, c'est une technique pour le traitement de connaissances imprécises basées sur des termes linguistiques, elle donne les moyens de convertir une commande linguistique basée sur le raisonnement humain, en une commande automatique, permettant ainsi la commande des systèmes complexes dont les informations sont exprimées d'une façon vague et mal définie [47].

### II.5.1. Principes de la Logique Floue

Afin d'expliquer les principes qui régissent ce flou "théorique", nous allons concevoir au fil de cette section un système d'inférence concret dont l'objectif est de décider si l'exposition d'un individu au risque d'accident vasculaire cérébrale est forte, moyenne ou faible.

### II.5.2. Sous-ensembles flous

La logique floue repose sur la théorie des ensembles flous, qui est une généralisation de la théorie des ensembles classiques comme il est représenté sur figure II.26. Par abus de langage, suivant les abus de la littérature, nous utiliserons indifféremment les termes sous-ensembles flous et ensembles flous. Les ensembles classiques sont également appelées ensemble nets, par opposition à flous, et de même la logique classique est également appelée logique booléenne ou binaire [48].

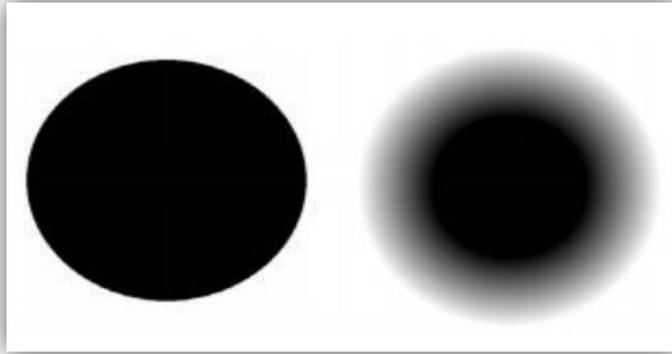


Figure II. 26: Représentation Graphique d'un Ensemble Classique et d'un Ensemble Flou

II.5.3. Degré d'appartenance et fonctions d'appartenance

Le schéma de la figure II.27 montre le degré d'appartenance d'un élément  $x$  à un ensemble flou A.

Selon le type de la fonction d'appartenance, différents types d'ensembles flous sont obtenus [49], [40], [43]. On trouve celles qui sont linéaires telles que les fonctions triangulaires et trapézoïdales, et celles qui sont non linéaires telles que les fonctions gaussiennes et la fonction singleton où un seul point de l'univers prend la valeur 1.

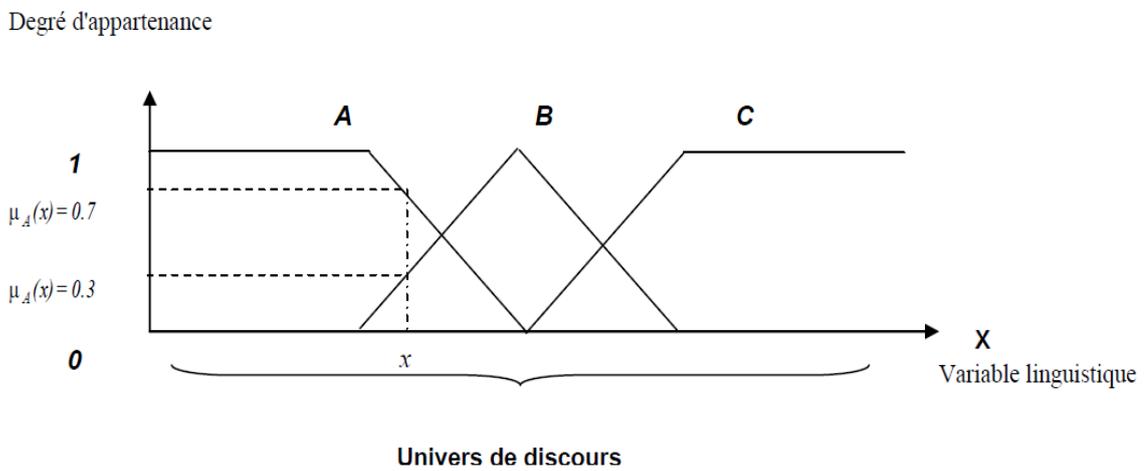


Figure II. 27: Éléments de la logique floue.

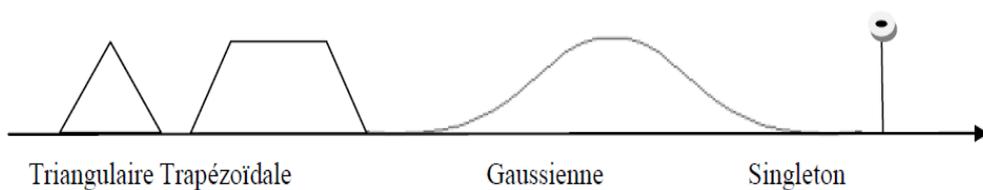


Figure II. 28: Formes de fonctions d'appartenance.

### II.5.4. Contrôleur flou

Un contrôleur flou n'est autre qu'un système flou conçu pour commander un processus. Sa structure générale est traduite par le schéma donné par la figure II.29 [14].

Un contrôleur flou passe généralement par les étapes suivantes :

- Le choix de la stratégie de fuzzification,
- L'établissement de la base des règles,
- Choix de la méthode d'inférence,
- Choix de la stratégie de défuzzification.

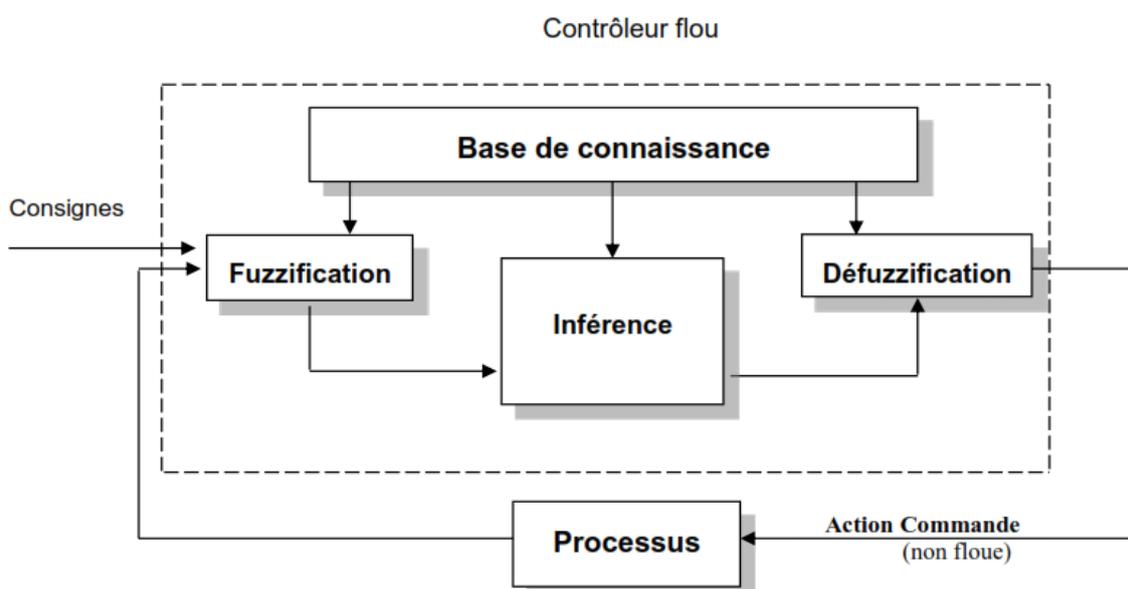


Figure II. 29: Schéma général d'un Contrôleur flou.

### II.6. Application de la commande floue Adaptative

La commande adaptative consiste à utiliser un ensemble de techniques pour l'ajustement automatique en ligne des boucles de commande afin de réaliser et de maintenir de meilleures performances dynamiques au système à commander.

Dans un système réel, il existe des paramètres qui se manifestent à l'intérieur de la même façon que des influences de l'environnement. Ces influences peuvent se présenter sous forme de perturbations généralement non mesurable. Le but de la commande adaptative est donc d'atteindre un certain objectif et le rendre optimal [44].

Deux types de structures de commande sont utilisés d'une manière générale.

Dans le premier on estime les paramètres en ligne par un mécanisme d'adaptation. La loi de commande est calculée à partir des paramètres estimés. Ce type de schéma est appelé indirect.

Dans le deuxième on peut également calculer les paramètres du régulateur à partir du

mécanisme d'adaptation paramétrique. Ce type de commande est appelé direct.

De cela deux approches de commande adaptative sont les plus répandues :

L'approche sel-tuning et l'approche avec modèle de référence [49].

Le schéma de la figure II.30 montre une configuration de la première approche.

Le schéma de la figure II.31 montre Structure du contrôleur flou adaptatif utilisé.

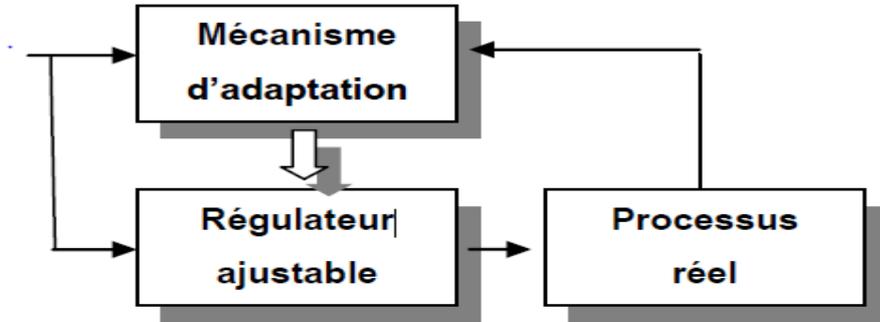


Figure II. 30: Structure de base de la commande adaptative utilisée.

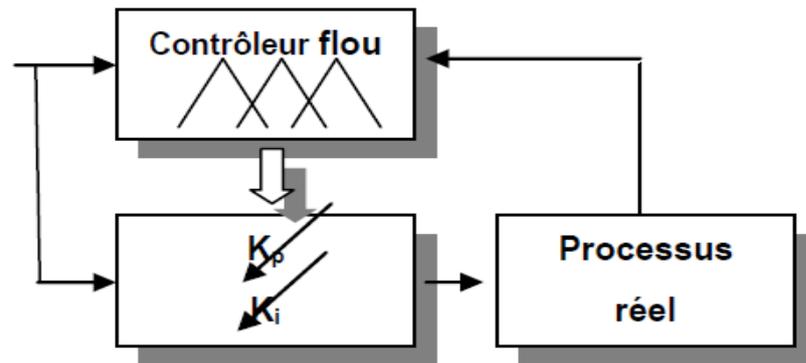


Figure II. 31: Structure du contrôleur flou adaptatif utilisé

II.6.1. Structure générale du régulateur flou adaptatif

II.6.1.1. Bloc de fuzzy

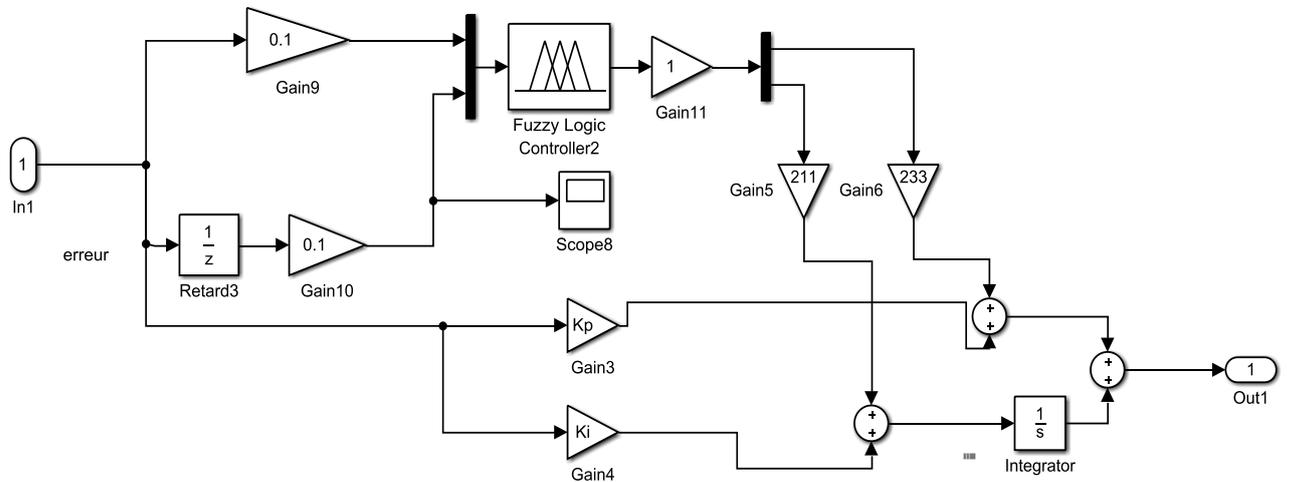


Figure II. 32: Schéma du bloc de Fuzzy

II.6.1.2. Les règles d'un contrôleur flou

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>1. If (e is NL) and (de is NL) then (kp is B)(ki is b) (1)</p> <p>2. If (e is NL) and (de is NM) then (kp is S)(ki is s) (1)</p> <p>3. If (e is NL) and (de is Ns) then (kp is S)(ki is s) (1)</p> <p>4. If (e is NL) and (de is Zr) then (kp is S)(ki is s) (1)</p> <p>5. If (e is NL) and (de is Ps) then (kp is S)(ki is s) (1)</p> <p>6. If (e is NL) and (de is PM) then (kp is S)(ki is s) (1)</p> <p>7. If (e is NL) and (de is PL) then (kp is B)(ki is b) (1)</p> <p>8. If (e is NM) and (de is NL) then (kp is B)(ki is b) (1)</p> <p>9. If (e is NM) and (de is NM) then (kp is B)(ki is b) (1)</p> <p>10. If (e is NM) and (de is Ns) then (kp is S)(ki is s) (1)</p> <p>11. If (e is NM) and (de is Zr) then (kp is S)(ki is s) (1)</p> <p>12. If (e is NM) and (de is Ps) then (kp is S)(ki is s) (1)</p> <p>13. If (e is NM) and (de is PM) then (kp is B)(ki is b) (1)</p> <p>14. If (e is NM) and (de is PL) then (kp is B)(ki is b) (1)</p> <p>15. If (e is Ns) and (de is NL) then (kp is B)(ki is b) (1)</p> <p>16. If (e is Ns) and (de is NM) then (kp is B)(ki is b) (1)</p> <p>17. If (e is Ns) and (de is Ns) then (kp is B)(ki is b) (1)</p> | <p>18. If (e is Ns) and (de is Zr) then (kp is S)(ki is s) (1)</p> <p>19. If (e is Ns) and (de is Ps) then (kp is B)(ki is b) (1)</p> <p>20. If (e is Ns) and (de is PM) then (kp is B)(ki is b) (1)</p> <p>21. If (e is Ns) and (de is PL) then (kp is B)(ki is b) (1)</p> <p>22. If (e is ZR) and (de is NL) then (kp is B)(ki is b) (1)</p> <p>23. If (e is ZR) and (de is NM) then (kp is B)(ki is b) (1)</p> <p>24. If (e is ZR) and (de is Ns) then (kp is B)(ki is b) (1)</p> <p>25. If (e is ZR) and (de is Zr) then (kp is B)(ki is b) (1)</p> <p>26. If (e is ZR) and (de is Ps) then (kp is B)(ki is b) (1)</p> <p>27. If (e is ZR) and (de is PM) then (kp is B)(ki is b) (1)</p> <p>28. If (e is ZR) and (de is PL) then (kp is B)(ki is b) (1)</p> <p>29. If (e is PL) and (de is NL) then (kp is B)(ki is b) (1)</p> <p>30. If (e is PL) and (de is NM) then (kp is B)(ki is b) (1)</p> <p>31. If (e is PL) and (de is Ns) then (kp is B)(ki is b) (1)</p> <p>32. If (e is PL) and (de is Zr) then (kp is S)(ki is s) (1)</p> <p>33. If (e is PL) and (de is Ps) then (kp is B)(ki is b) (1)</p> <p>34. If (e is PL) and (de is PM) then (kp is B)(ki is b) (1)</p> | <p>33. If (e is PL) and (de is Ps) then (kp is B)(ki is b) (1)</p> <p>34. If (e is PL) and (de is PM) then (kp is B)(ki is b) (1)</p> <p>35. If (e is PL) and (de is PL) then (kp is B)(ki is b) (1)</p> <p>36. If (e is PM) and (de is NL) then (kp is B)(ki is b) (1)</p> <p>37. If (e is PM) and (de is NM) then (kp is B)(ki is b) (1)</p> <p>38. If (e is PM) and (de is Ns) then (kp is S)(ki is s) (1)</p> <p>39. If (e is PM) and (de is Zr) then (kp is S)(ki is s) (1)</p> <p>40. If (e is PM) and (de is Ps) then (kp is S)(ki is s) (1)</p> <p>41. If (e is PM) and (de is PM) then (kp is B)(ki is b) (1)</p> <p>42. If (e is PM) and (de is PL) then (kp is B)(ki is b) (1)</p> <p>43. If (e is Ps) and (de is NL) then (kp is B)(ki is b) (1)</p> <p>44. If (e is Ps) and (de is NM) then (kp is S)(ki is s) (1)</p> <p>45. If (e is Ps) and (de is Ns) then (kp is S)(ki is s) (1)</p> <p>46. If (e is Ps) and (de is Zr) then (kp is S)(ki is s) (1)</p> <p>47. If (e is Ps) and (de is Ps) then (kp is S)(ki is s) (1)</p> <p>48. If (e is Ps) and (de is PM) then (kp is S)(ki is s) (1)</p> <p>49. If (e is Ps) and (de is PL) then (kp is B)(ki is b) (1)</p> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Tableau II. 33 : Règles d'un contrôleur flou

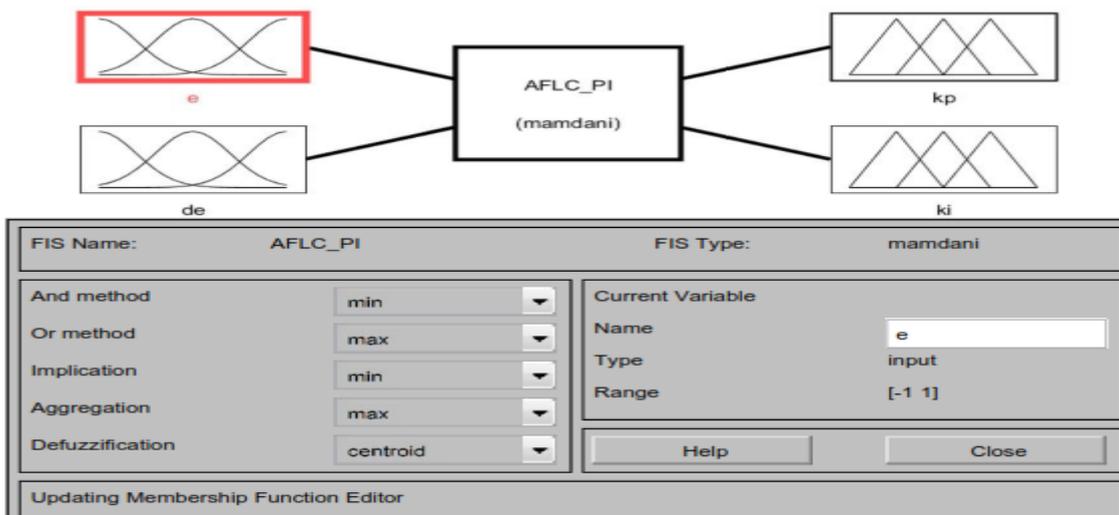


Figure II. 33 : L'entrée (fonctions d'appartenance)

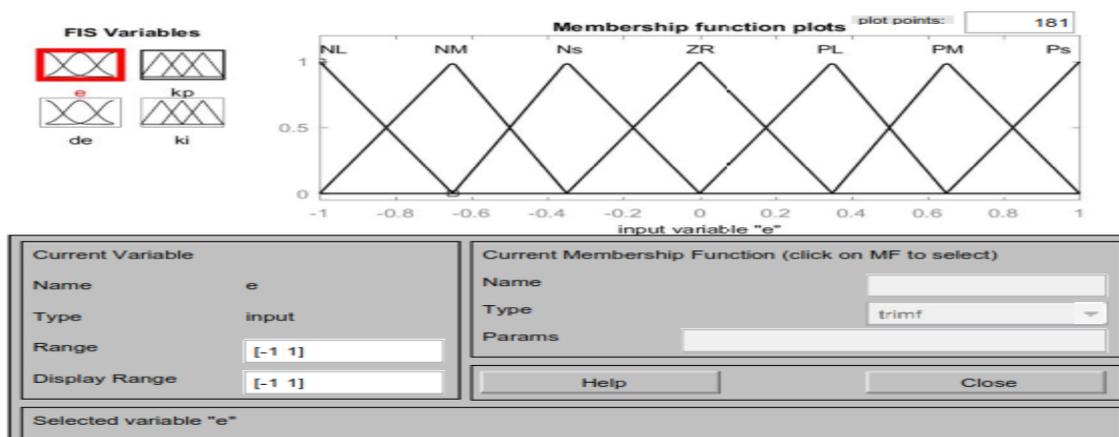


Figure II. 34 : Variables de flou

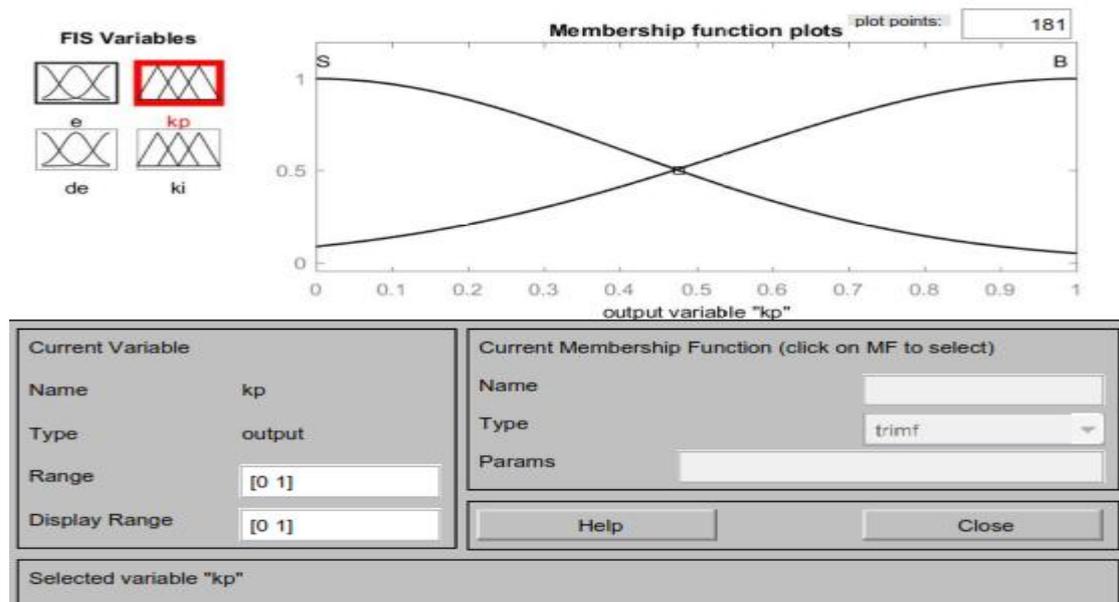


Figure II. 35 : Sortie (fonctions d'appartenance)

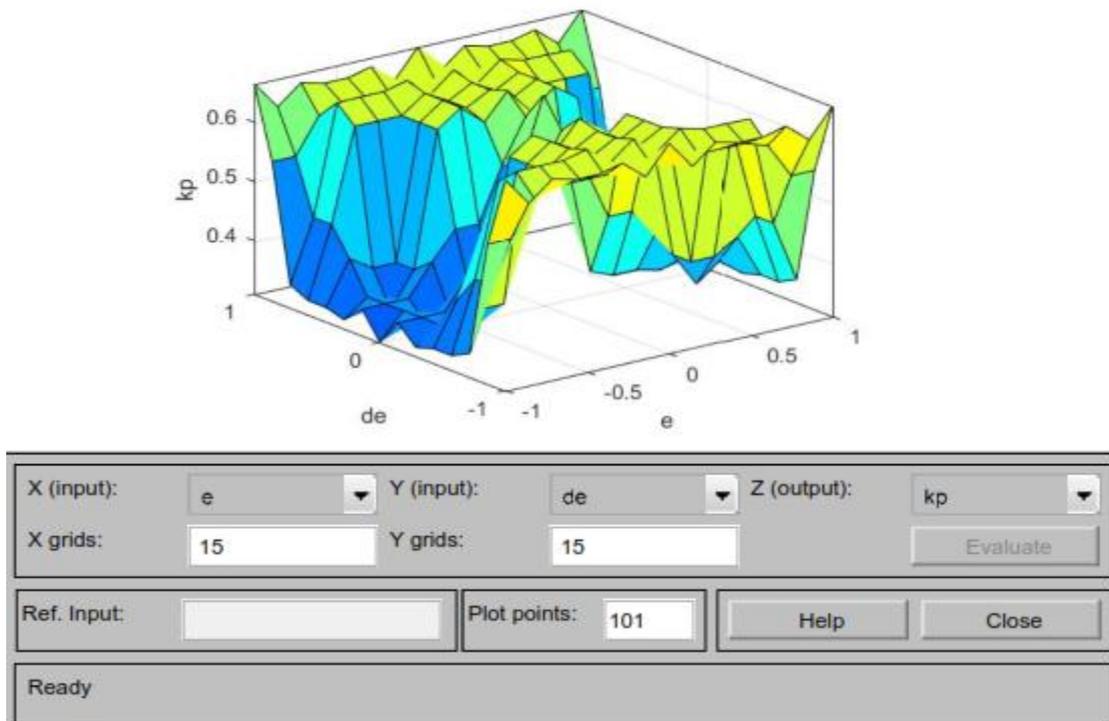


Figure II. 36 : Surface totale.

## II.6.2. Avantage et Inconvénients du réglage par logique floue

### Avantages

1. La possibilité de se passer d'une modélisation du système à régler,
2. La possibilité de captiver des connaissances (linguistique),
3. La tolérance des incertitudes et des non linéarités,
4. Proche du raisonnement humain.
5. La disponibilité de systèmes de développement efficaces soit pour microprocesseurs ou PC

### Inconvénients

1. Le manque de directives précises pour la conception d'un réglage : choix des grandeurs à mesurer, détermination de la fuzzification, des inférences et de la défuzzification.
2. L'approche artisanale et non systématique (implémentation des connaissances de l'opérateur souvent difficile).
3. La garantie de la stabilité du circuit de réglage (en l'absence d'un modèle valable).
4. La possibilité d'apparition de cycles limites à cause du fonctionnement non linéaire.
5. L'apparition de règles d'inférence contradictoires possible [14].

**II.7. Conclusion**

Après avoir fait la modélisation des éléments de notre système HVDC la stratégie de commande est mise en œuvre avec un détail pour la commande proposée floue adaptative tout en souhaitant limiter l'influence des variations paramétriques et en éliminant les effets des perturbations de la source sur la sortie du système.

Nous terminons ce chapitre par une série de tests pour vérifier le bon fonctionnement du système d'une part et la robustesse de chaque loi de commande implantées d'autre part ou les résultats sont présentés dans le chapitre suivant plus une comparaison entre les deux régulateurs

# Chapitre III

## **Simulation et Interprétation des Résultats**

III.1. Introduction

Le dernier chapitre est consacré à des simulations réalisées et développées sous l’environnement Matlab/Simulink/Sim power system, après avoir modéliser notre système VSC-HVDC.

Nous venons présenter les résultats obtenus d’un système de transmission VSC-HVDC et les interprétés en utilisant le contrôleur PI et la nouvelle commande à base de PI adaptatif.

Enfin, on a fait une comparaison des deux structures de contrôle (PI, PI adaptatif) appliquées à notre système.

III.2. Modèle générale de simulation

Pour évaluer la structure de contrôle proposée pour le système VSC-HVDC constitué de deux stations (redresseur et onduleur), on va donner une étude par simulation sous L’environnement Matlab/Simulink/Sim power system. Le système VSC-HVDC avec sa configuration de commande globale interne et externe est illustré par les figures suivantes.

III.2.1. Modèle des deux stations de conversion

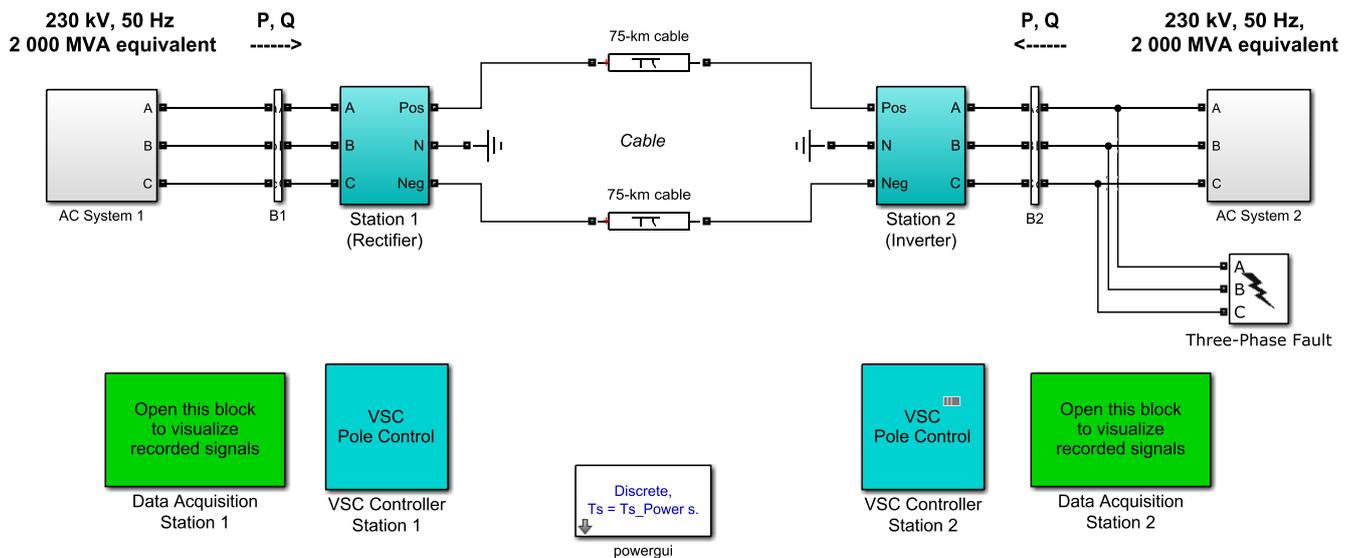


Figure III. 1: VSC-based HVDC transmission link 200 MVA (+/- 100kV).

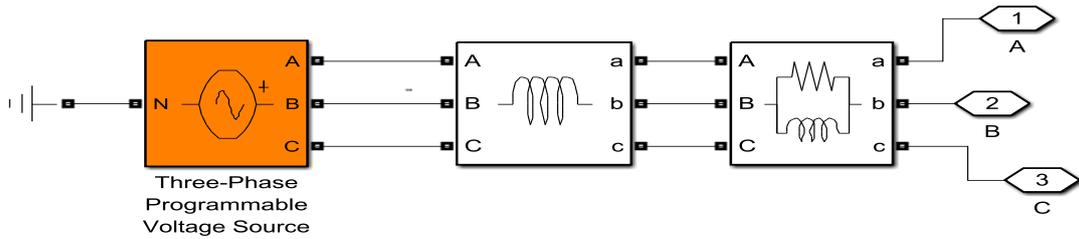


Figure III. 2: Modèle du réseau

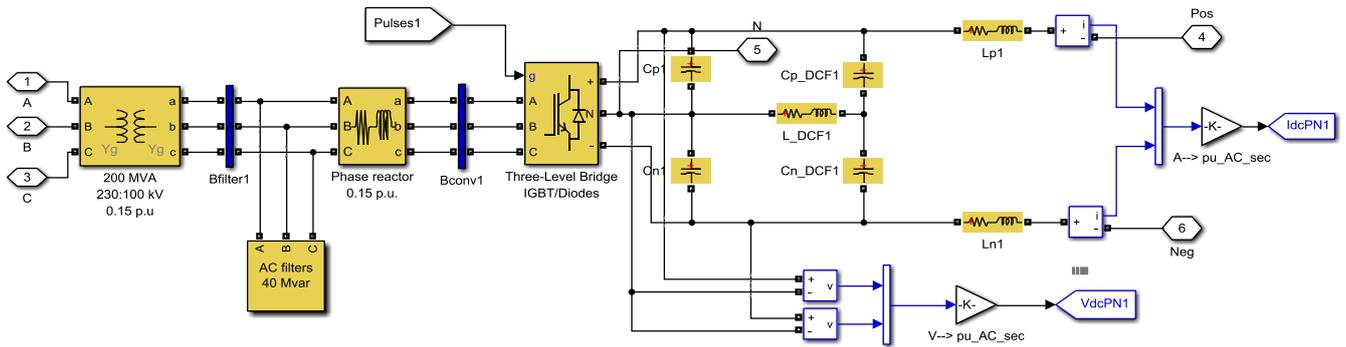


Figure III. 3: Station de conversion

III.2.2. Modèle du Contrôle

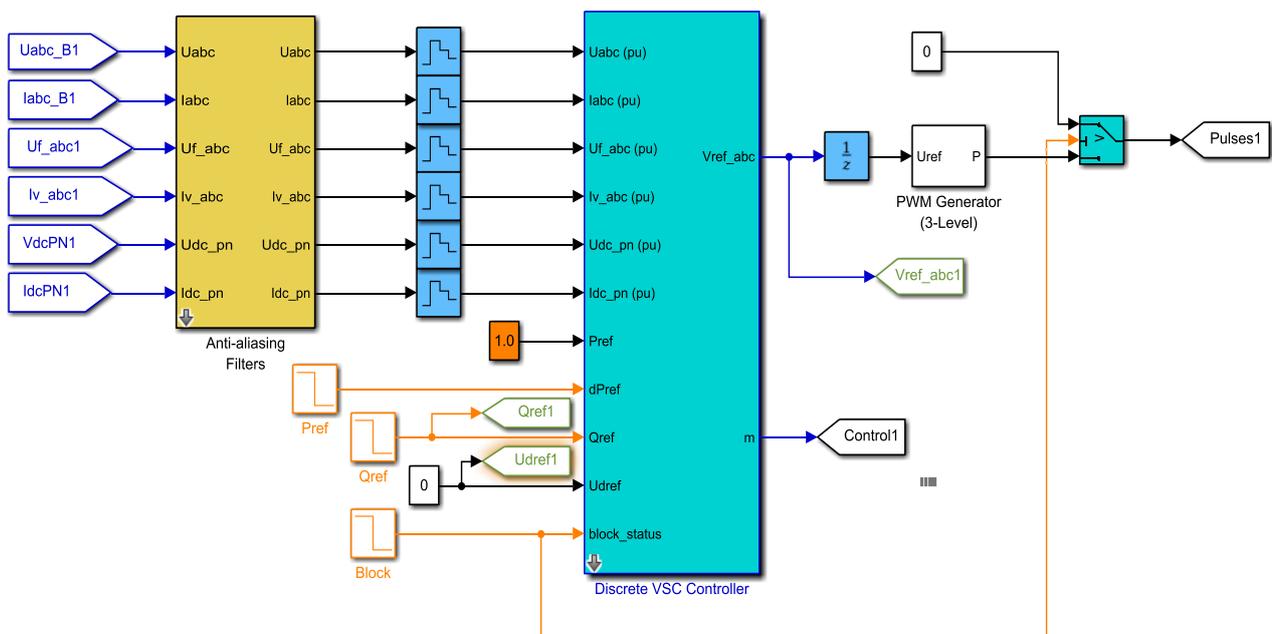


Figure III. 4: Schéma de contrôle d'une station VSC, contrôlée et P et en Q.

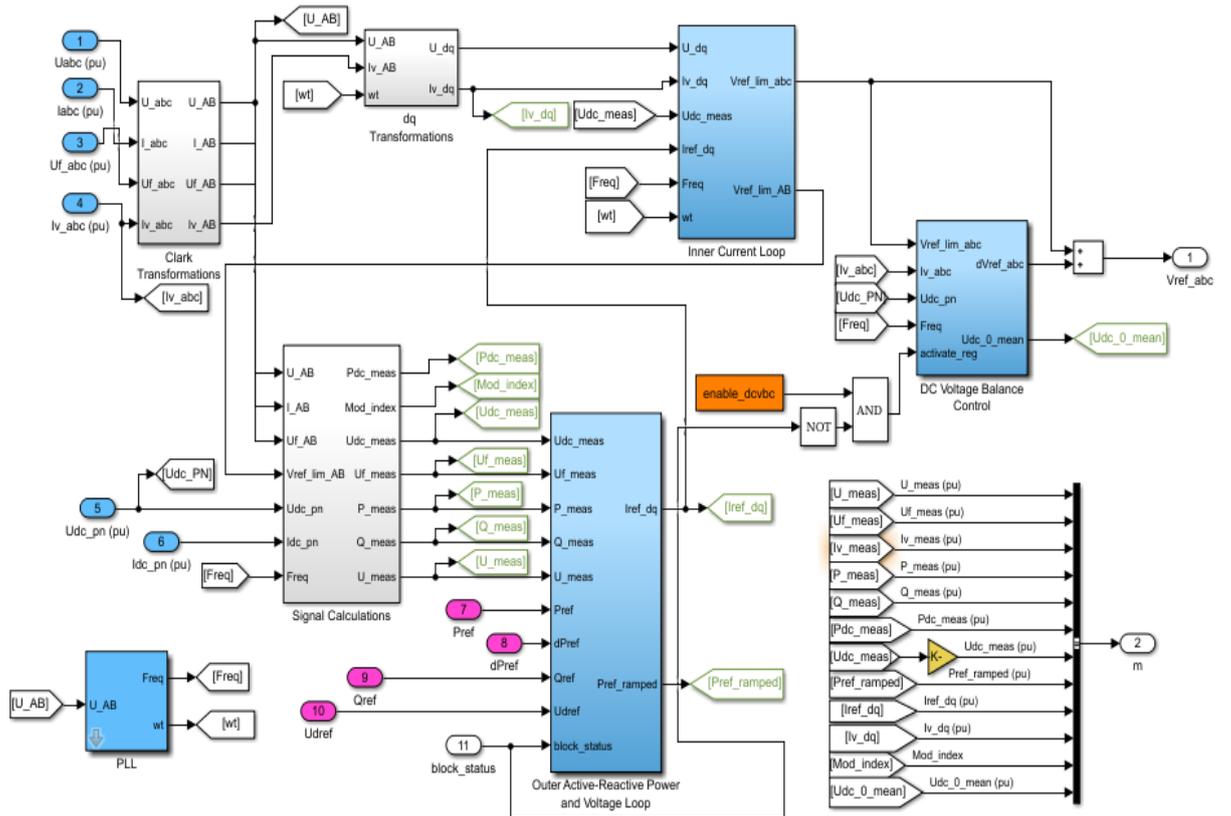


Figure III. 5: Contrôle discret d'une station VSC

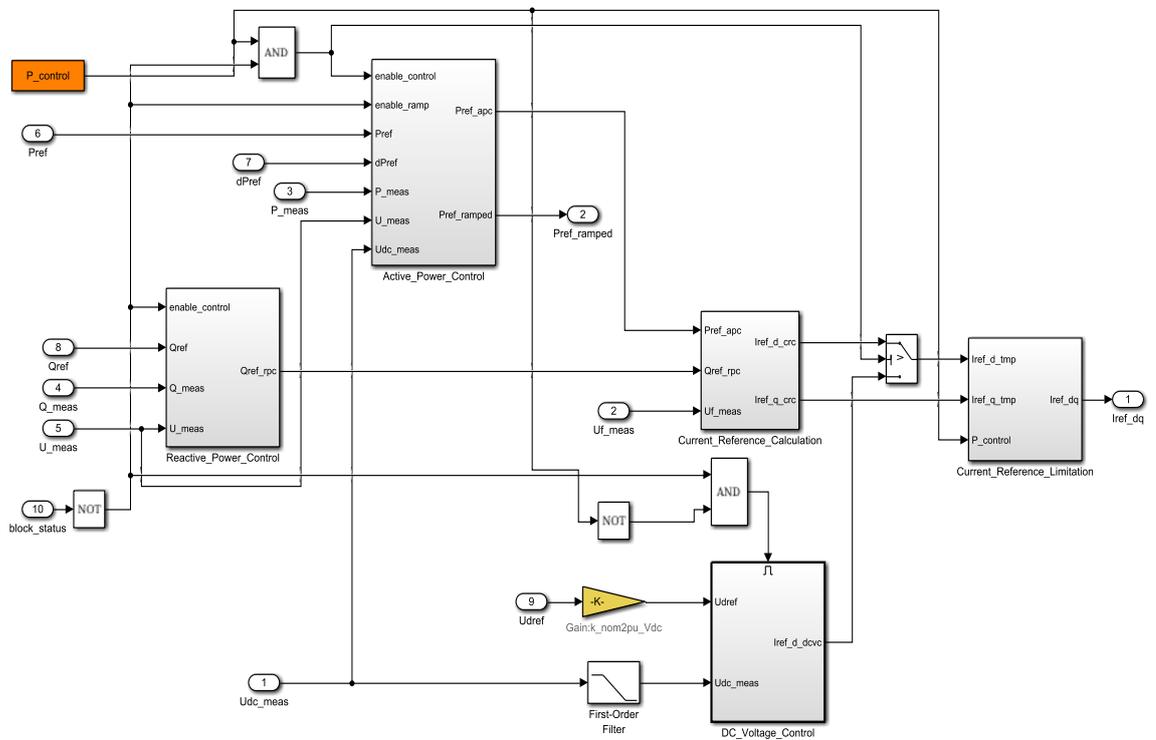


Figure III. 6: Contrôle externe d'une station VSC

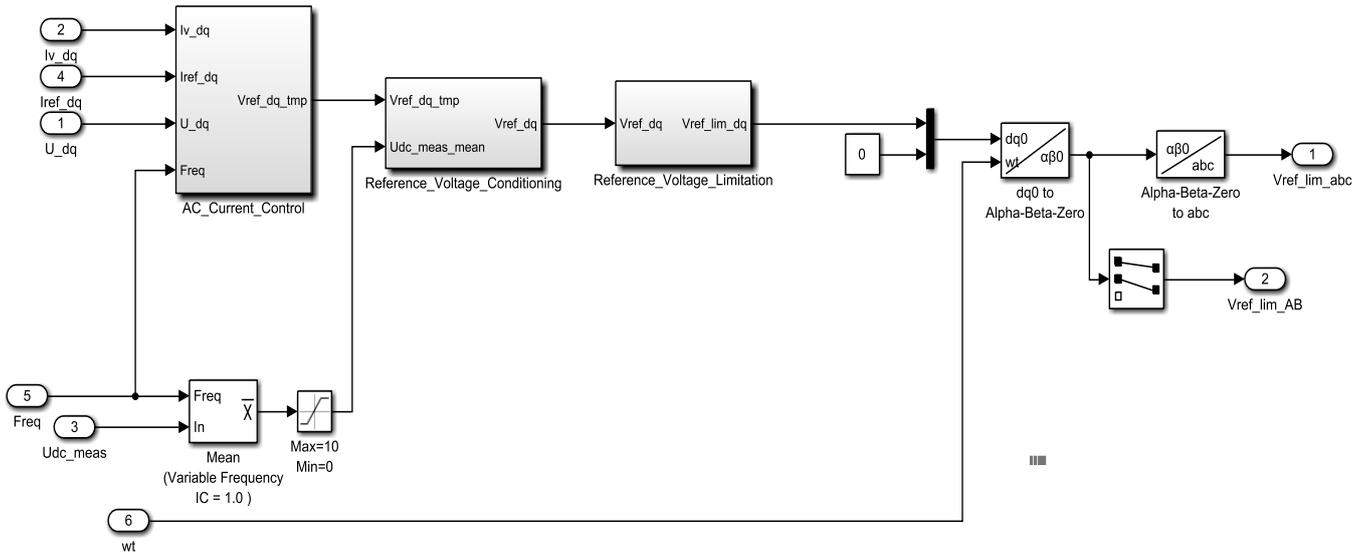


Figure III. 7: Contrôle interne d'une station VSC

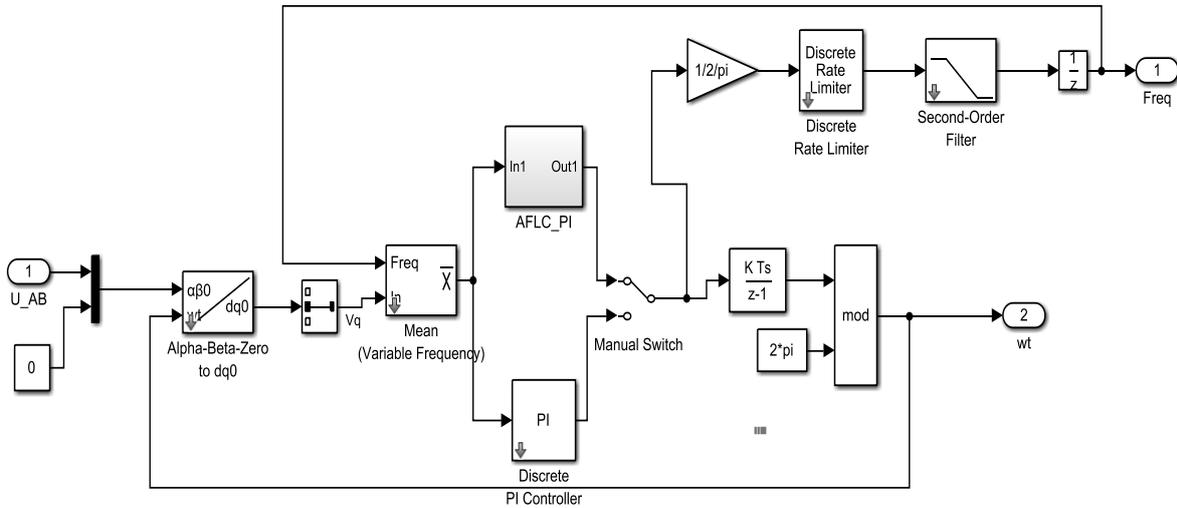


Figure III. 8 : Bloc de PLL

III.3. Résultats de simulation :

III.3.A. Régulation classique PI :

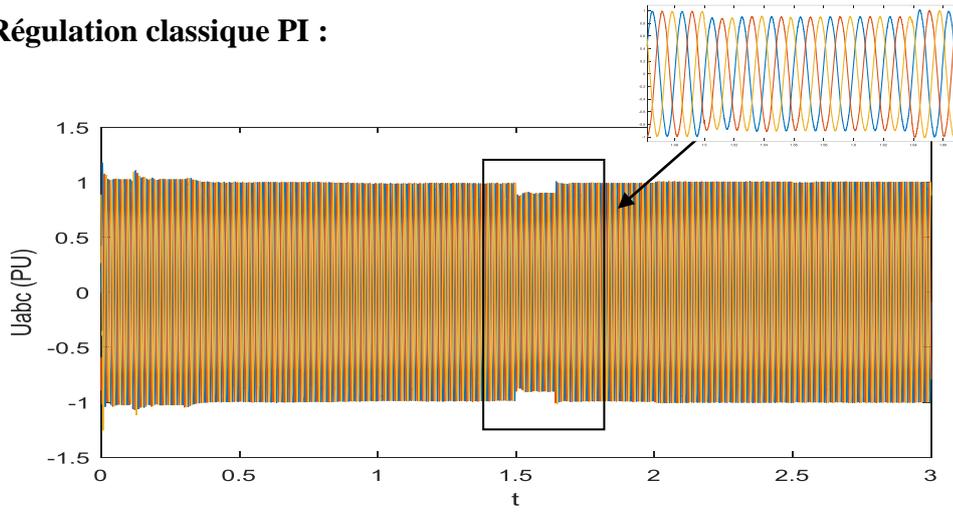


Figure III. 9.1.a : La tension  $U_{abc}$  de régulateur PI

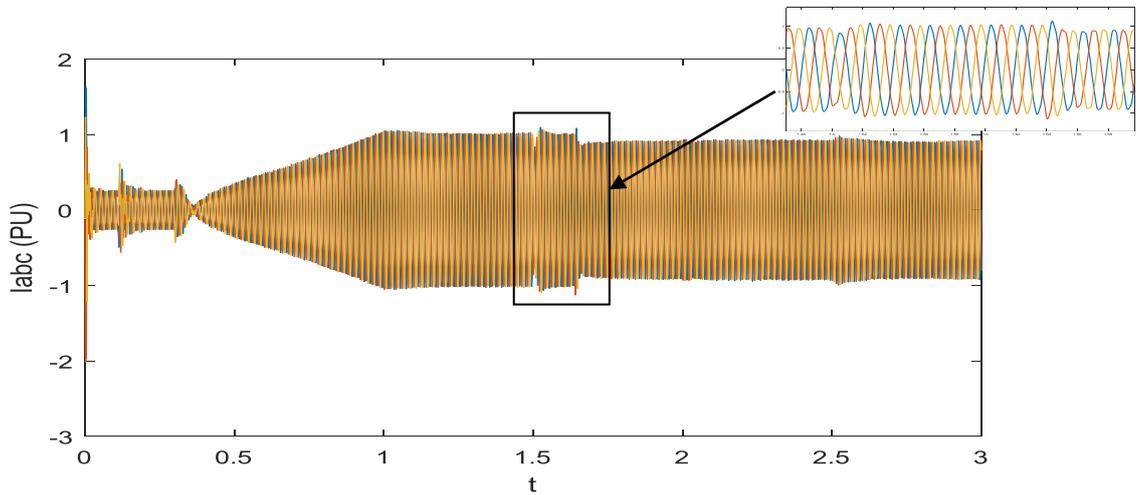


Figure III. 10.2.a : Le courant  $I_{abc}$  de régulateur PI

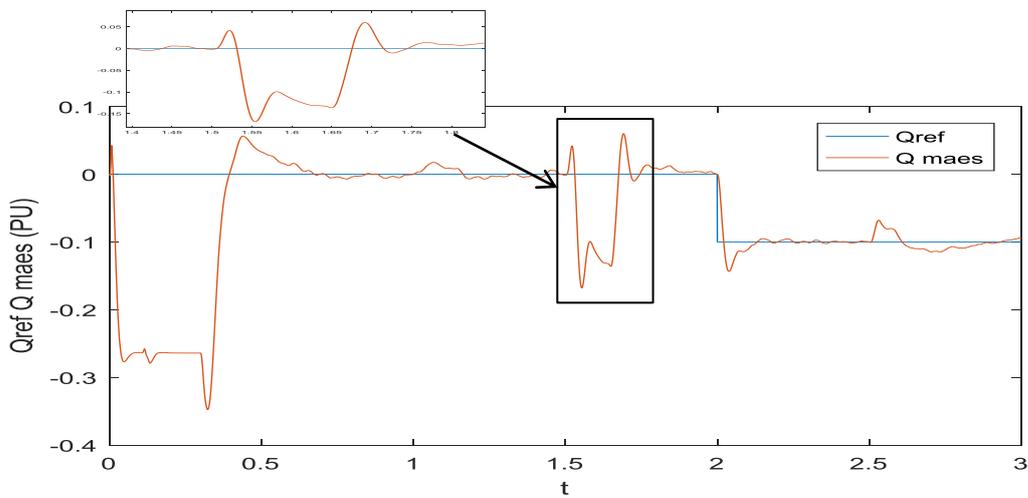


Figure III. 11.3.a : La puissance réactive de régulateur PI

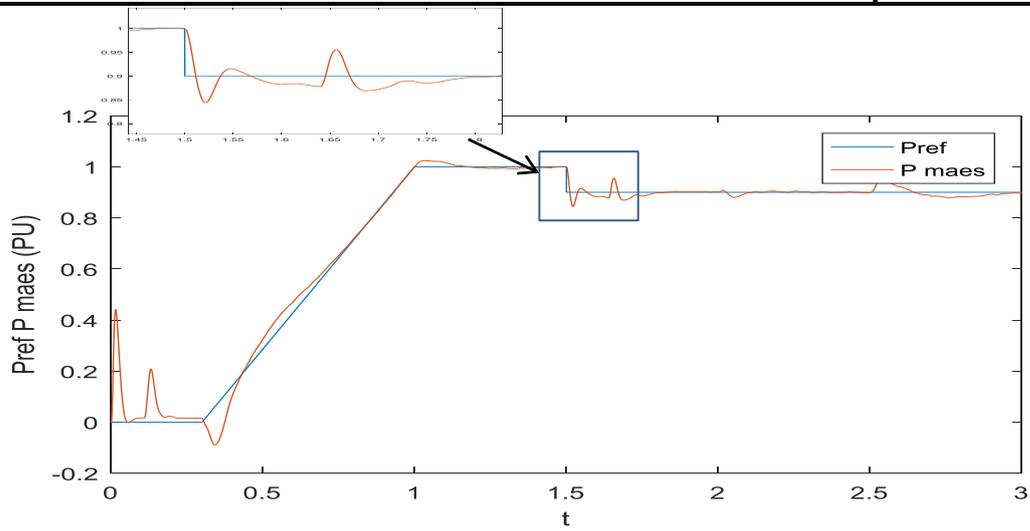


Figure III. 12.4.a : La puissance active de régulateur PI

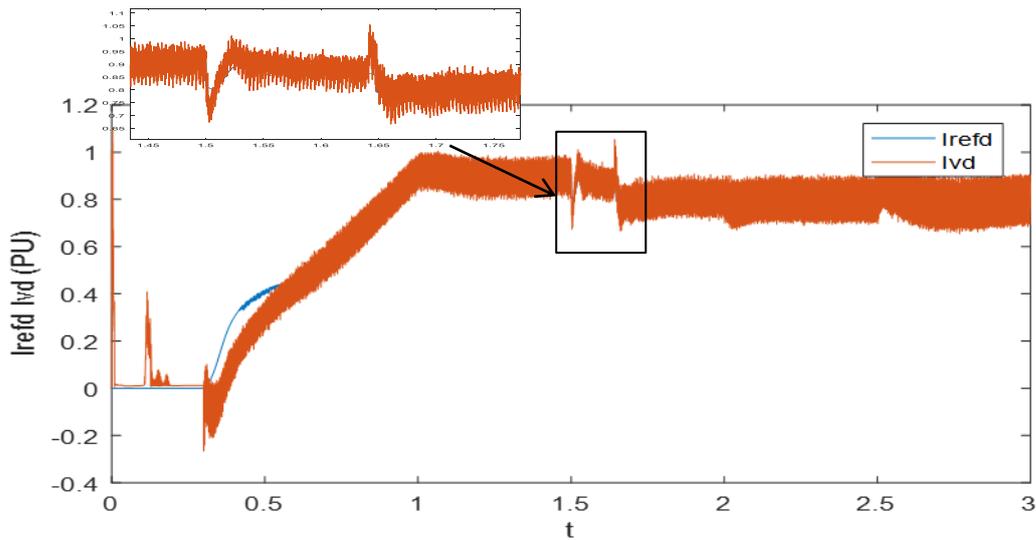


Figure III. 13.5.a : Le courant  $I_{vd}$  de régulateur PI

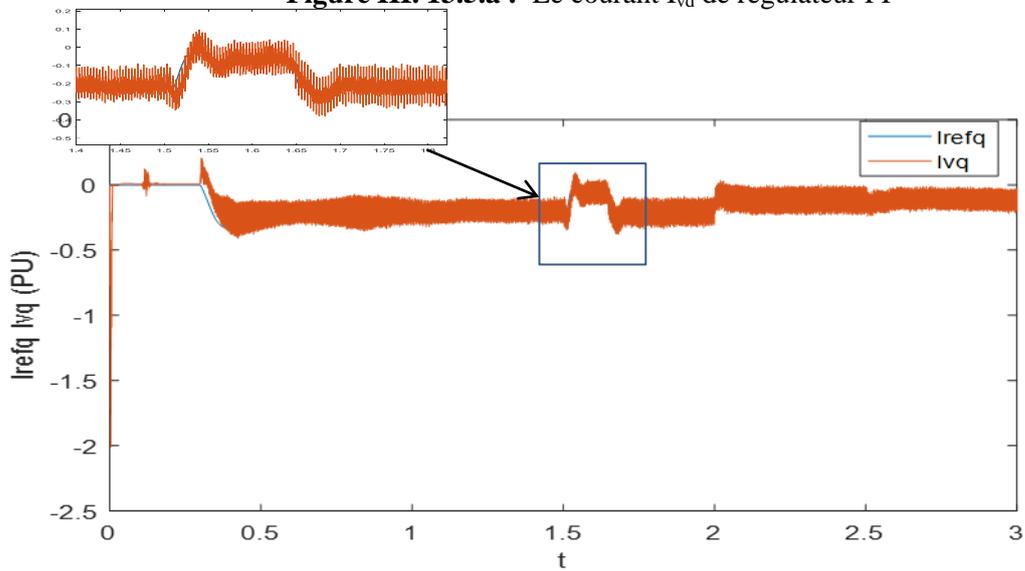


Figure III. 14.6.a : Le courant  $I_{vq}$  de régulateur PI

III.3.B. Régulation PI adaptatif floue :

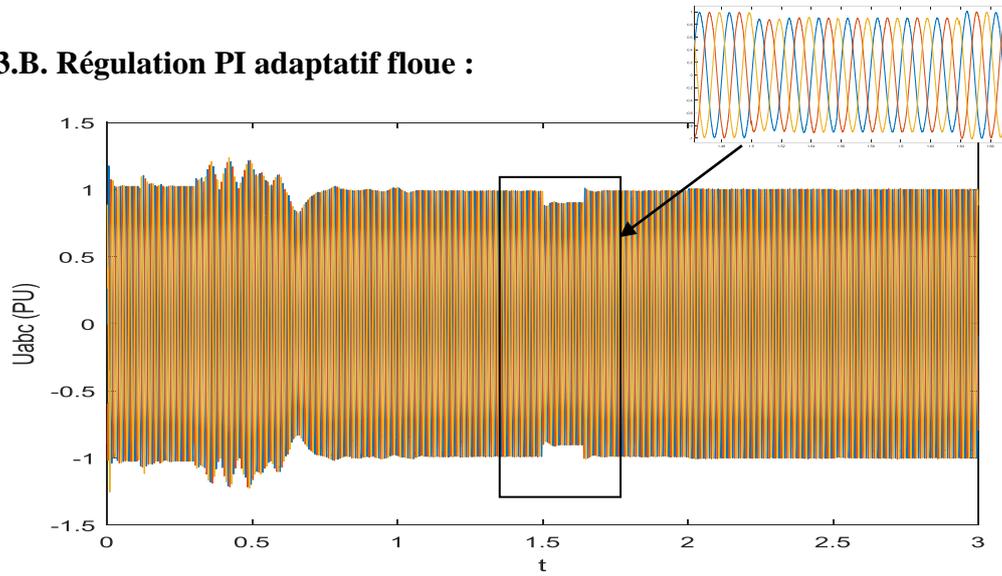


Figure III. 15.1.b : La tension  $U_{abc}$  de PI adaptatif

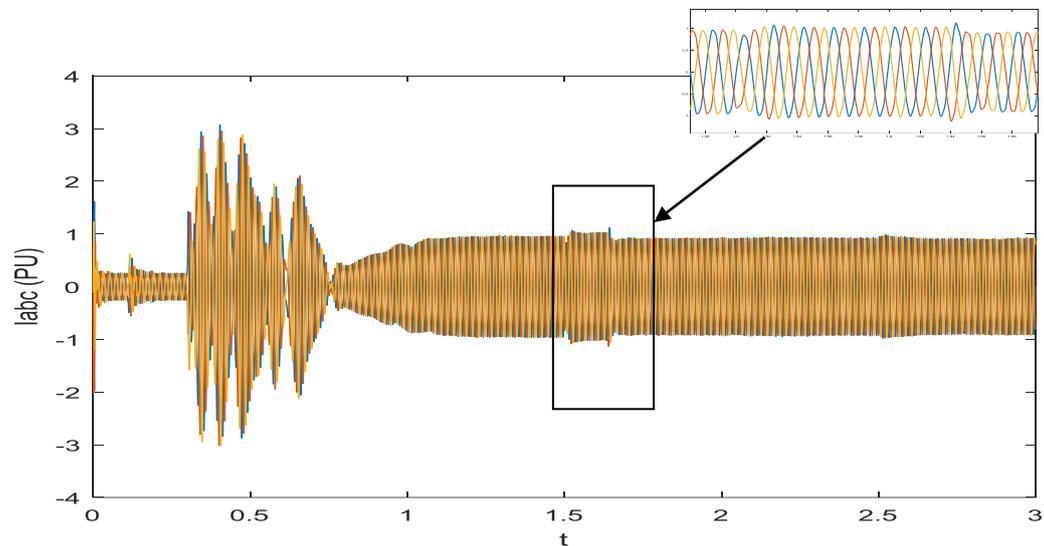


Figure III. 16.2.b : Le courant  $I_{abc}$  de PI adaptatif

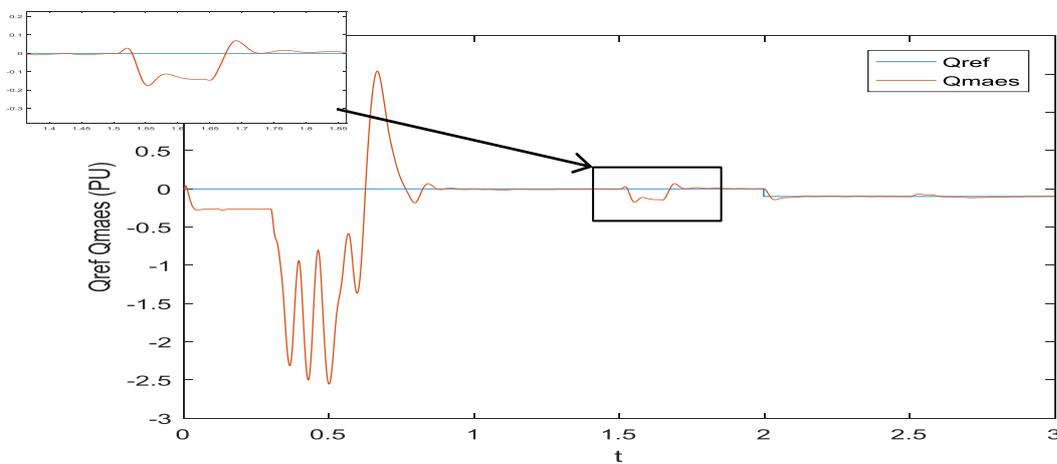


Figure III. 17.3.b : La puissance réactive de PI adaptatif

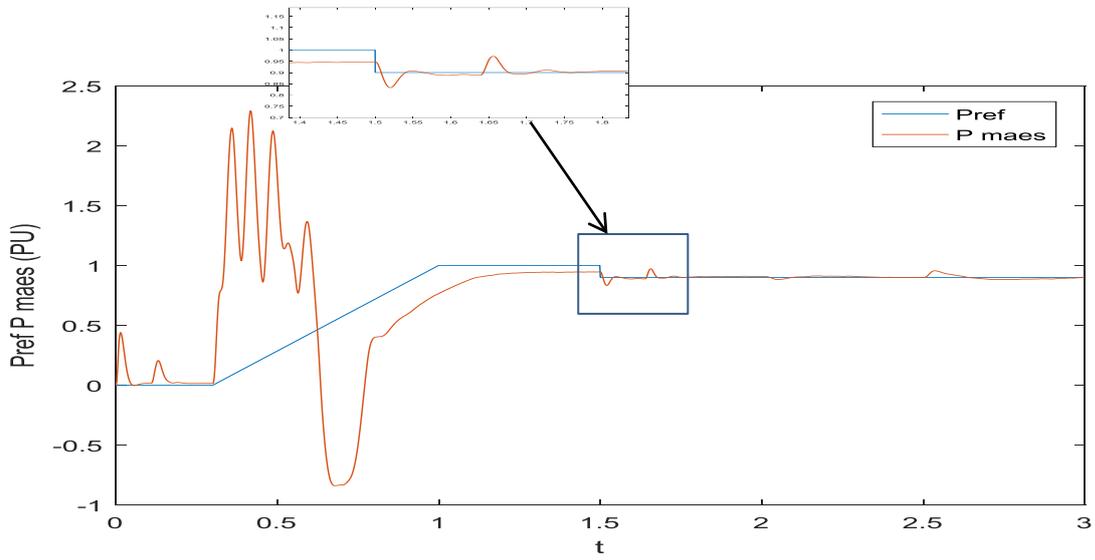


Figure III. 18.4.b : La puissance active de PI adaptatif

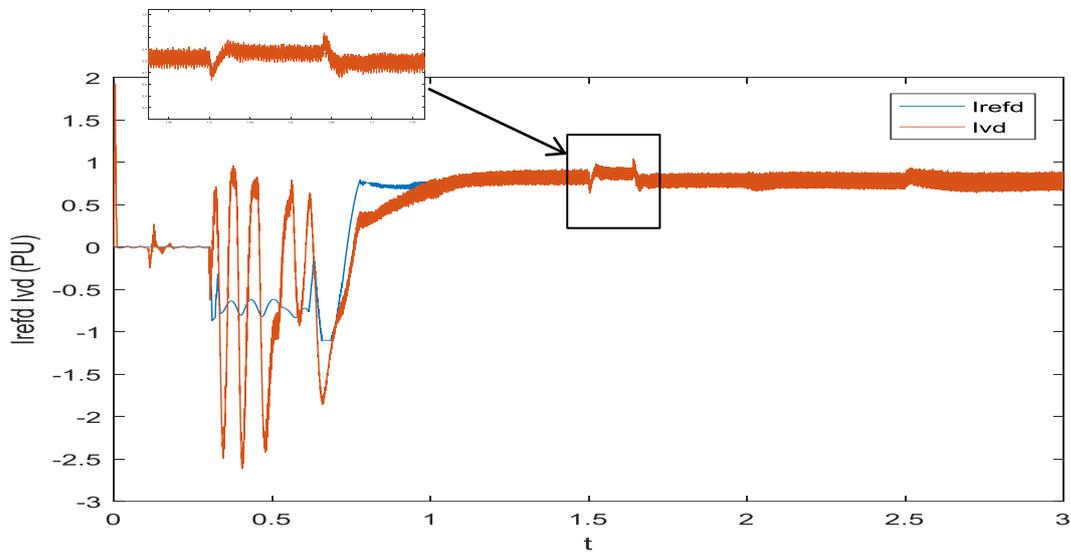


Figure III. 19.5.b : Le courant  $I_{vd}$  de PI adaptatif

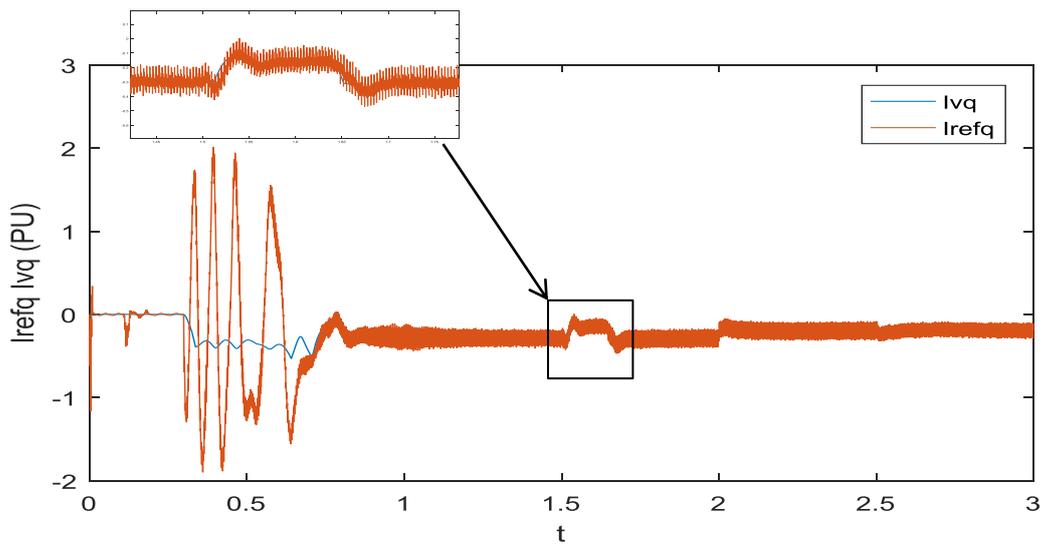


Figure III. 20.6.b : Le courants  $I_{vq}$  de PI adaptatif

**III.4. Interprétations des résultats :**

Les résultats des figures (III.9.1.a, III.10.2.a, III.15.1.b et III.16.2.b) du courant ( $I_{abc}$ ) et de la tension ( $U_{abc}$ ) montrent clairement qu'il y a un dépassement dans le régime transitoire que ce soit dans les résultats de régulateur PI ou par l'utilisation de PI adaptatif par contre dans le régime transitoire les perturbations diminuent.

On observe également que les allures des puissances active et réactive (les figures III.11.3.a, III.12.4.a, III.17.3.b et III.18.4.b) réagies rapidement. Les références sont correctement suivies et il n'y a plus d'erreur sur les puissances. Néanmoins, on peut remarquer des dépassements un peu élevés pendant le démarrage.

Puis on remarque que les allures des courants  $I_{vd}$  et  $I_{vp}$  qui sont illustrés dans les figures (III.13.5.a, III.14.6.a, III.19.5.b et III.20.6.b) contiennent des overshoots beaucoup plus dans le régulateur PI. On voit que le courant mesuré suit sa référence avec une bonne poursuite.

On remarque ainsi que le comportement des deux régulateurs est identique durant les régimes permanents, mais le régulateur PI adaptatif présente moins d'oscillations et moins de perturbations au démarrage qui a considérablement amélioré le fonctionnement de ce dernier. Ces performances montrent l'efficacité de la commande proposée.

Les résultats montrent que le PI adaptatif donne d'excellentes performances en termes de rapidité, stabilité, comparativement à la technique de commande conventionnelle. On peut dire que chaque sous système du contrôleur flou puisse fournir des résultats performants.

**III.5. Conclusion**

Nous pouvons conclure que la liaison VSC-HVDC est contrôlée par deux convertisseurs aux deux extrémités du bus DC, ou la conception de contrôle des deux convertisseurs Station 1 (redresseur) et Station 2 (onduleur) est la même. Le convertisseur 1 est responsable du contrôle de la puissance active et réactive, tandis que l'autre est responsable du contrôle de la tension continue et de la puissance réactive.

L'application de régulateurs PI peut donner de très bons résultats. Pour la technologie de contrôle flou (PI adaptatif), la sensibilité aux changements de paramètres est considérablement réduite et le système revient rapidement à un fonctionnement normal et reste stable tout au long du processus de transfert de puissance. Par conséquent, il donne de très bons résultats par rapport au contrôle traditionnel.

# **CONCLUSION GENERALE**

## **Conclusion générale**

Malgré l'évolution rapide des moyens de protection et régulation, des pertes de stabilité se produisent souvent dans les réseaux du monde, ce qui relance et montre l'intérêt de l'étude de la stabilité transitoire. Le réseau électrique est interconnecté à travers le système HVDC ouvre de nouveaux horizons et apporte de nouvelles solutions.

Les travaux menés dans ce mémoire ont contribué de manière significative à l'étude de solutions au problème de stabilité des systèmes de transmission VSC-HVDC. Afin d'améliorer les performances dynamiques de la liaison en présence de multiples perturbations.

On a basé sur la modélisation mathématique, la commande et la simulation avec logiciel Matlab/Simulink, et la stabilisation des systèmes VSC-HVDC par l'utilisation d'un régulateur linéaires proportionnel et intégral conventionnel PI. Ensuite, on a proposé la mise en œuvre de contrôle PI adaptatif pour améliorer la stabilité.

On a effectué une série de tests pour avoir la robustesse et la performance (une comparaison) entre chacune de ces commandes.

On a conclu que les résultats de la simulation étant satisfaisants, montrent que le PI adaptatif donne d'excellentes performances en termes de rapidité, stabilité, comparativement à la technique de commande conventionnelle au réglage classique qui contient des dépassements et des différentes perturbations qui apparaissent pendant le régime transitoire.

## ANNEXE

Tableau: Paramètres du système VSC-HVDC

| Paramètres du VSC-HVDC                               | Valeur des paramètres |
|------------------------------------------------------|-----------------------|
| <b>Paramètres de la station 1</b>                    |                       |
| La fréquence de station 1 (Hz)                       | $f=50$                |
| La puissance de station 1 (W)                        | $P_s=2000.10^6$       |
| L'amplitude de la tension alternative (V)            | $V_s=230.10^3$        |
| La fréquence de commutation (Hz)                     | $f_c=4000$            |
| Le facteur d'amortissement                           | $\zeta =1$            |
| <b>Paramètres du convertisseur 1</b>                 |                       |
| La valeur de condensateur de la liaison continue (F) | $C_{bus} = 0.8$       |
| La valeur de résistance du filtre ( $\Omega$ )       | $R_g = 2.10^{-5}$     |
| La valeur d'inductance (H)                           | $L_g = 4.10^{-4}$     |
| <b>Paramètres de la station 2</b>                    |                       |
| La fréquence de la station 2 (Hz)                    | $f=50$                |
| La puissance de la station 2 (W)                     | $P_s=2000.10^6$       |
| L'amplitude de la tension alternative (V)            | $V_s=230.10^3$        |
| La fréquence de commutation (Hz)                     | $f_c=4000$            |
| Le facteur d'amortissement                           | $\zeta =1$            |
| <b>Paramètres du convertisseur 2</b>                 |                       |
| La valeur de condensateur de la liaison continue (F) | $C_{bus} = 0.8$       |
| La valeur de résistance du filtre ( $\Omega$ )       | $R_g = 2.10^{-5}$     |
| La valeur d'inductance (H)                           | $L_g = 4.10^{-4}$     |

### État stable - Réponse indicielle des régulateurs de puissance (P & Q) et de tension CC

Le système est programmé pour démarrer et atteindre un état stable. Des étapes sont alors appliquées séquentiellement sur : la puissance active et réactive de référence du redresseur ; la tension continue de référence de l'onduleur. La réponse dynamique des régulateurs est observée. Lancez la simulation. Ouvrez les portées BUS B1 STATION\_1 et DC\_SIDE\_STATION\_2 (dans les sous-systèmes d'acquisition de données respectifs). Examiner en station 1 : la puissance active sur la trace 2 (1 p.u. = 200 MW) et la puissance réactive (valeurs de référence et mesurées) sur la trace 3 (1 p.u. = 200 Mvar) ; en station 2 : la tension continue (valeurs de référence et mesurées) sur la trace 2 (1 p.u. = 200 kV).

A  $t = 1,5$  s, a -0,1 p.u. l'étape est d'abord appliquée à la puissance active de référence (diminution de 1 pu à 0,9 pu). La puissance se stabilise en 0,3 secondes environ. Des paliers sont également appliqués sur la puissance réactive de référence du redresseur (de 0 à -0,1 p.u.) à  $t = 2,0$  s et sur la tension continue de référence de l'onduleur (diminution de 1 p.u. à 0,95 p.u.) à  $t = 2,5$  s. Notez la dynamique des régulateurs et comment ils sont plus ou moins mutuellement affectés. La conception de la commande tente de découpler les réponses de puissance active et réactive.

REFERENCES  
BIBLIOGRAPHIQUES

## Références bibliographiques

- [1] A. Benchaib, S. Poullain, J. Thomas « Application d'une Approche de type Backstepping basée sur les Techniques de Lyapunov au Contrôle d'un Système HVDC » ALSTOM T&D, Power Electronics Research Team, 9 rue Ampère, 91345 Massy, France.
- [2] Rama Krishna K, Nagarjuna K ranthi Kumar T.K, "DC Current Flow Controller for Multilevel Converter Multi terminal HVDC Grids using Fuzzy logic controllers", 2017 International Journal of Advanced Engineering and Global Technology I Vol-05, Issue- 02, March 2017.
- [3] Benhalima S "La conception, la modélisation et la simulation du système VSC-HVDC offshore", thèse maîtrise en génie électrique Montréal, 2012.
- [4] Hameurlaine Abdelhadi « Contribution à l'amélioration des performances dynamiques d'une liaison VSC-HVDC » Thèse Doctorat en Science en Electrotechnique option Réseaux Eléctriques Université Djillali Liabes De Sidi -Bel-Abbes 12/03/2020.
- [5] Thi Thu Nga VU « Étude des phénomènes de charges d'espace dans des matériaux de câbles et câbles modèles destinés à des applications au transport d'énergie en Haute Tension Continue (HVDC) », thèse de doctorat, Université Toulouse III, année 16 Juillet 2014.
- [6] Hani Aziz Saad « Modélisation et Simulation d'une Liaison HVDC de type VSC- MMC », thèse de doctorat, Université de Montréal, année Mars 2015.
- [7] Mounir Benadja « Approches pour la réduction de l'impact de défaut dans le transport d'énergie année : le 12 octobre 2016. du parc éolien offshore via VSC-HVDC » thèse de doctorat, université du Québec.
- [8] Mr. AFFANE Ghalem , « Contrôle avancé d'un système VSC-HVDC pour améliorer le transport d'énergie électrique : Application à la conversion éolienne » , thèse de doctorat, Université Ibn Khaldoun Tiaret Algérie, 2019.
- [9] O. KHALED KHODJA, M.C. BENOUDAH « Apport des systèmes HVDC aux réseaux électriques », Mémoire master, Université Ibn Khaldoun Tiaret Algérie, 2019.
- [10] Haiping Y, Lingling F, Zhixin M, "Fast power routing through HVDC", IEEE transactions on power electronics, Vol. 27, No.3, July 2012.

- [11] Nayak N, Keshari Routray S, Kumar Rout P, “Non-linear control and stabilisation of VSC-HVDC transmission system based on Type-2 fuzzy sliding mode control”, *Int. J. Automation and Control*, Vol. 7, Nos. 1/2, 2013.
- [12] Bhookya N and V. RamanaRaoP, M. Sydulu, “Improvement of Power System Stability using Artificial Neural Network based HVDC Controls”, *Majlesi Journal of Electrical Engineering* Vol. 7, No.2, June 2013.
- [13] Hameurlaine A; Zidi S-A, “Amélioration des performances et protection des liaisons CCHT”, Ouvrage Publisher:Éditions universitaires européennes (November 6, 2015), ISBN-10:3841673600 ISBN-13: 978-3841673602.2015.
- [14] Mr Y. MIHOUB. Cours « INTELLIGENCE ARTIFICIELLE APPLIQUEE A L'AUTOMATIQUE ».
- [15] Imhof M and Andersson G, “Dynamic modeling of a VSC-HVDC converter,” In 2013 48th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), no. Vo2. IEEE, Sep. 2013.
- [16] Saad H, Ould-Bachir T, Mahseredjian J, Dufour, Denetiere C, Nguefeu S, “Real-Time Simulation of MMCs Using CPU and FPGA”, *Power Electronics, IEEE Transactions on* , vol.30, no.1, pp.255,261, 2015.
- [17] Hiteshkumar P, “Modeling of Voltage Source Converter Based HVDC Transmission System in EMTP-RV”, A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Applied Science Electrical and Computer Engineering University of Ontario Institute of Technology, 2010.
- [18] Tamiru W S, “VSC-HVDC based Network Reinforcement”, Thesis Electrical power Engineering, Delft University of Technology STEDIN, 2009.
- [19] M. Fu, L. A. Dissado, G. Chen, and J. C. Fothergill, “Space charge formation and its modified electric field under applied voltage reversal and temperature gradient in XLPE cable,” *IEEE*, 2008.
- [20] Kalair, A. ; Abas, N. ; et Khan, N. (2016). Comparative study of HVAC and HVDC transmission systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, 59, 1653-1675
- [21] J. Arrillaga, *High Voltage Direct Current Transmission. London: The Institution of Electrical Engineers, 1998.*
- [22] V. K. Sood, *HVDC and FACTS Controllers: Applications of Static Converters in Power Systems*. Norwell, Massachusetts USA: Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [23] J. G. D. Menzies and F. Biledt, “Electrical system considerations for the Argentina-Brazil 1000MW interconnection,” in CIGR'E conference, Paris, France, August-September 2000.
- [24] M. Hausler, “Multiterminal HVDC for high power transmission in Europe,” in CEPEX99 conference, Poznan, Poland, March 1999.

- [25] G. Morin, L. X. Bui, S. Casoria, and J. Reeve, "Modeling of the Hydro-Quebec - New England HVDC system and digital controls with EMTP," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 8, no. 2, pp. 559–566, April 1993.
- [26] Dr. Le Tang. High voltage dc technologies. Technical report, ABB, 2010.
- [27] Beddard A, Barnes M and Preece R, "Comparison of Detailed Modeling Techniques for MMCEmployed on VSC-HVDC Schemes", in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 2, pp. 579-589, April 2015.
- [28] Bauer J. G, Wissen M, Gutt T, Biermann J, Schäffer C, Schmidt G, F Pfirsch, "New 4.5 kV IGBT and diode chip set for HVDC Transmission Applications", *PCIM Europe 2014*, 20 – 22 May 2014, Nuremberg, Germany, 2014.
- [29] Chaudhary S K, Teodorescu R, Rodriguez P, Kjær P C and Christensen P W, "Chopper Controlled Resistors in VSC-HVDC Transmission for WPP with Full-scale Converters" ,in *Proc. of Conference on Sustainable Alternative Energy (SAE)*, 2009.
- [30] Cuiqing D, "VSC-HVDC for Industrial Power Systems", Thesis for the degree of doctor of philosophy, Goteborg, Sweden 2007.
- [31] Padiyar K R and Prabhu N, "Modeling, control design and analysis of VSC based HVDC transmission systems", in *Power System Technology, 2004. Power Con 2004.2004 International Conference on*, 2004, pp. 774-779 Vol.1.2004.
- [32] Rault P, "Dynamic modeling and control of multi-terminal HVDC grids", PhD dissertation, École Centrale de Lille, March 2014.
- [33] Rault P, Colas F, Guillaud X, Nguéfeu S, "Method for small signal stability analysis of VSCMTDC grids", *Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE*, vol.,no.,pp.1,7, 22-26 July 2012
- [34] Jain S.K, Agrawal P and Gupta H.O, "Fuzzy logic-controlled shunt active power filter for power quality improvement", *IEE, Proc-Electr Power-Appl*. Vol. 149, No. 5, pp.317- 328, 2002.
- [35] Brouwer R.K, "Fuzzy rule extraction from a feed forward neural network by training a representative fuzzy neural network using gradient descent", *IEEE ICIT '04. 2004 IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2004, vol.3, no., pp. 1168- 1172 Vol. 3, 8- 10 Dec. 2004.
- [36] A. YAKOUBI, M. DJAIREB « Etude de l'apport d'un HVDC dans un réseau électrique » Mémoire Master Université IBN-KHALDOUN, TIARET ,2015-2016.
- [37] H. BAHRI. R. MEKHALFIA. « Etude du système HVDC-FACTS lors des défauts » Mémoire Master Université de M'SILA. 2008 / 2009.
- [38] Benadja M, "Approches pour la réduction de l'impact de défaut dans le Transport d'énergie du parc éolien offshore via VSC-HVDC", *Doctorat en génie Ph.D Montréal*, 2016.
- [39] W. AMOR « Écoulement de puissance pour les réseaux de grande dimension et mal-

conditionnés » Mémoire de maîtrise en génie électrique, ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE, UNIVERSITÉ DU QUÉBEC, 2018.

[40] J. S. Roger, “Fuzzy modeling using generalized neural networks and Kalman filter algorithm”, In Proc. Of the Ninth National Conference on Artificial Intelligence, July 1991;

[41] Tamiru Woldeyesus Shire. VSC-HVDC based network reinforcement. PhD thesis, TU Delft, Delft University of Technology, 2009

[42] Pierre RAULT. Dynamic Modeling and Control of Multi-Terminal HVDC Grids. PhD thesis, 2014.

[43] H; J. Zeng, M. G. Singh, “approximation theory of fuzzy systems-SISO case”, IEEE Trans. On Fuzzy Systems, “Vol. 2, no. 2, pp. 162-176, 1994.

[44] J. P. Chen, “La commande adaptative décentralisée”, thèse de doctorat, Laboratoire d’Automatique et d’Analyse des Systèmes du CNRS, décembre 1986.

[45] Allaoui tayeb, « Cours Régulation industrielle » Faculté des sciences appliquées , Département de Génie Electrique Université Ibn Khaldoun-Tiaret, 2019.

[46] Michel ETIQUE « Cours Régulation automatique » Haute Ecole d’Ingénieurs et de Gestion du canton de Vaud (HEIG-Vd) D’département d’électricité et d’informatique institut d’Automatisation industrielle (iAi)

[47] S. Zeghlache, « Cours Commande Intelligente» Faculté de Technologie, Département de Génie Electrique Université de M’sila, 2019.

[48] F. Derroncourt, « La logique floue entre raisonnement humain et intelligence artificielle», mémoire de master, Janvier 2011.

[49] L. A. Zadeh, «Fuzzy sets, Information and Control», Wseas, Transactions on Systems and Control, vol. 6, pp. 990-996, May 2007.

[50] J. wook kang and S wook hyun.and Y kan and H lee and J Hyo lee. «A Novel Zero Dead-Time PWM Method to Improve the Current Distortion of a Three-Level NPC Inverter» 16 December 2020. [doi.org/10.3390/electronics9122195](https://doi.org/10.3390/electronics9122195).

مع التطورات الحديثة في إلكترونيات الطاقة، أصبح التيار المباشر عالي الجهد (HVDC) تقنية ناضجة لنقل الطاقة عالية السعة لمسافات طويلة. نظرًا لتشغيل النظام بشكل أفضل ودعم أفضل لتطوير شبكات النقل، فقد أصبح مرة أخرى الخيار الأفضل نظرًا لسرعته ومرونته. الغرض من العمل المقدم في هذه الرسالة هو دراسة ونمذجة ومحاكاة توصيلات HVDC من نوع مصدر الجهد (VSC-HVDC) باستخدام وحدات التحكم التقليدية من النوع PI ووحدات التحكم التكيفية PI. يمكن تقسيم هذا العمل إلى ثلاثة أجزاء رئيسية: يقدم الجزء الأول نظرة عامة وأحدث ما توصلت إليه أنظمة HVDC ومبادئ تشغيلها وتطبيقاتها. التكوينات والطوبولوجيا المختلفة. الجزء الثاني مخصص للنمذجة والتحكم في أنظمة VSC-HVDC لذلك نشرح مفاهيم المنطق الضبابي وPI التكيفي. أخيرًا، سيتم تقديم عمليات محاكاة بواسطة MATLAB على نظام نقل VSC-HVDC من أجل إجراء مقارنة بين PI وPI التكيفي مع تفسير النتائج.

**الكلمات المفتاحية:** VSC-HVDC، HVDC، MATLAB، المنطق الضبابي، PI التكيفي

## Abstract

With recent advances in power electronics, high voltage direct current (HVDC) has become a mature technology for high-capacity long distance power transmission. Due to better system operation and better support for the development of transport networks, it has again become the best choice due to its speed and flexibility. The purpose of the work presented in this thesis is to study, model and simulate voltage source type HVDC connections (VSC-HVDC) with the use of conventional PI type controllers and adaptive PI controllers. This work can be divided into three main parts: The first part presents a general overview and state of the art on HVDC systems and their operating principles as well as their applications. The different configurations and topologies. The second part devoted to Modeling and Control of VSC-HVDC systems so we explain the concepts of fuzzy logic and adaptive PI. Finally, simulations by MATLAB on the VSC-HVDC transmission system will be presented in order to make a comparison between PI and the adaptive PI with the interpretation of the results.

**Keywords:** HVDC, VSC-HVDC, MATLAB, fuzzy logic, adaptive PI

## Résumé

Avec les progrès récents de l'électronique de puissance, le courant continu haute tension (HVDC) est devenu une technologie mature pour la transmission d'énergie longue distance à haute capacité. En raison d'un meilleur fonctionnement du système et d'un meilleur soutien au développement des réseaux de transport, il est redevenu le meilleur choix en raison de sa rapidité et de sa flexibilité. L'objet des travaux présentés dans ce mémoire est d'étudier, de modéliser et de simuler des liaisons HVDC de type source de tension (VSC-HVDC) avec l'utilisation des contrôleurs conventionnels de type PI et de contrôleurs PI adaptatif. Ce travail peut être divisé en trois grandes parties : La première partie présente un Aperçu générale et état de l'art sur les systèmes HVDC et leurs principes de fonctionnement ainsi que leurs applications. Les différentes configurations et topologies. La seconde partie consacrée à la Modélisations et le Contrôle des systèmes VSC-HVDC ainsi nous expliquons les concepts de la logique floue et le PI adaptatif. En dernier lieu, des simulations par MATLAB sur le système de transmission VSC-HVDC sera présentée dans le but de faire une comparaison entre PI et le PI adaptatif avec l'interprétation des résultats.

**Mots clés :** HVDC, VSC-HVDC, MATLAB, logique floue, PI adaptatif