

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Dr. Tahar Moulay de  
Saïda  
Faculté de Technologie  
Département d'Electrotechnique



## Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de

**Master (LMD)**

**Spécialité : RESEAUX ELECTRIQUES**

**Filière : ELECTROTECHNIQUE**

Intitulé :

**Amélioration des performances d'un réseau réel par  
l'application de l'approche de sensibilité**

Présenté par :

**Belbali Mohamed Amine  
Boukefoussa Safia**

Devant le jury composé de :

**Mr BOUAZA Saad  
Mme LAKDJA Fatiha  
Mr BOUANANE Abdelkrim**

**Président  
Encadreur  
Examineur**

Soutenu le 27/09/2021

Promotion 2020-2021

# **REMERCIEMENT**

Nous souhaitons avant tout remercier notre directeur de mémoire, M<sup>me</sup> F. LAKDJA, pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience sa rigueur et disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.

Nous désirons aussi remercier nos enseignants de l'université Dr Moulay Tahar de Saida, qui nous ont donné les outils nécessaires à la réussite de nos études universitaires.

Nous voudrions exprimer notre reconnaissance envers les amis et collègues qui nous ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de nos démarches.

# DEDICACE

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A mes chères sœurs et mon frère pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,

A mes chères copines, « Sara et Inès » pour leur appui et leur encouragement,

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infaillible,

Merci d'être toujours là pour moi.

*Boukefoussa Safa.*

# DÉDICACES

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.

A l'homme qui je dois ma vie, ma réussite et tout mon respect : mon cher père  
LARBI.

A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureux: mon adorable mère OUADNOUN.

A ma chère sœur IMENE et mon bonheur B.LINDA qui n'ont pas cessé de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes études. Que Dieu les protège et leur offre la chance et le bonheur.

A mon frère MADANI pour sa présence, son soutien et ses conseils  
A tous les cousins, les voisins et les amis que j'ai connu jusqu'à maintenant.  
Merci pour leurs amours et leurs encouragements.

Sans oublier mon binôme SAFIA pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.

*Belbali Mohamed Amin*

## ***Résumé***

Le système d'alimentation doit être continuellement étendu et mis à niveau pour répondre à la demande d'énergie toujours croissante. En raison de ressources énergétiques, temps et capitaux limités, la tendance actuelle est à la recherche de nouvelles techniques pour améliorer les performances du système électrique. Les dispositifs FACTS sont les systèmes de transmission alternative incorporant la puissance contrôleurs statiques électroniques pour améliorer et augmenter la capacité de transfert de puissance. Un des problèmes majeurs de ces dispositifs est leurs emplacements optimaux, parmi les solutions accédées par la recherche sont les méthodes de sensibilité. Dans notre travail nous avons appliqué l'une de ces méthodes de sensibilité appelée « Le facteur de sensibilité de tension », cette dernière nous a orienté vers la localisation de l'emplacement optimal du FACTS utilisé (type shunt SVC). La solution a pour but d'améliorer la tension de réseau et réduire les pertes pour le système étudié qui est le réseau Ouest- Algérien réel actualisé avec les énergies renouvelables.

**Mots clés :** L'écoulement de puissance, méthode de sensibilité, FACTS, logiciel.

## ***Abstract***

The power system must be continuously expanded and upgraded to meet the ever-increasing demand for energy. Due to limited energy resources, time and capital, the current trend is to seek new techniques to improve the performance of the electrical system. FACTS devices are AC transmission systems incorporating power electronic static controllers to improve and increase power transfer capability. One of the major problems with these devices is their optimal locations; among the solutions accessed by research are the sensitivity methods. In our work we applied one of these sensitivity methods called "The voltage sensitivity factor", which guided us to the location of the optimal location of the FACTS used (SVC shunt type). The solution aims to improve the grid voltage and reduce losses for the study system which is the real West-Algerian grid updated with renewable energies.

**Key words:** Power flow, Sensitivity method, FACTS, Software.

|                                        |      |
|----------------------------------------|------|
| Remerciement.....                      | I    |
| Dédicace.....                          | II   |
| Résumé.....                            | III  |
| Sommaire.....                          | IV   |
| Liste des figures.....                 | VIII |
| Liste des tableaux.....                | IX   |
| Liste des symboles et abréviation..... | X    |

|                                   |          |
|-----------------------------------|----------|
| <b>Introduction générale.....</b> | <b>1</b> |
|-----------------------------------|----------|

### *Chapitre I : Description des réseaux électriques modernes*

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| <u>I.1.Introduction :</u> .....                                             | 3  |
| <u>I.2.Définition d'un réseau électrique</u> .....                          | 3  |
| <u>I.3.Structure d'un réseau électrique</u> .....                           | 3  |
| <u>I.3.1. Réseau de transport THT</u> .....                                 | 4  |
| <u>I.3.2. Réseau de répartition HT</u> .....                                | 4  |
| <u>I.3.3. Réseau de distribution</u> .....                                  | 5  |
| <u>I.4.Les éléments constitutifs d'un réseau d'énergie électrique</u> ..... | 5  |
| <u>I.4.1. La source</u> .....                                               | 5  |
| <u>I.4.2. Les lignes électrique</u> .....                                   | 5  |
| <u>I.4.3. Les transformateurs de puissance :</u> .....                      | 6  |
| <u>I.5. Les caractéristiques d'un réseau électrique</u> .....               | 6  |
| <u>I.5.1. Ligne de transport THT</u> .....                                  | 6  |
| <u>I.5.3. Les lignes de distribution MT</u> .....                           | 7  |
| <u>I.5.4. Les lignes de distribution BT</u> .....                           | 7  |
| <u>I.6. Modélisation d'un réseau électrique</u> .....                       | 7  |
| <u>I.6.1. Modélisation d'une ligne de transport</u> .....                   | 7  |
| <u>I.6.2. Modélisation du générateur</u> .....                              | 9  |
| <u>I.7.Interconnexion des réseaux électriques</u> .....                     | 9  |
| <u>I.8. Actualisation des réseaux électrique</u> .....                      | 10 |
| <u>I.8.1. Les énergies renouvelables dans l'Europe</u> .....                | 10 |

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <u>I.8.2. Les énergies renouvelables en Algérie</u> .....                                | 12 |
| <u>I.9.Conclusion</u> .....                                                              | 14 |
| <br><b><i>Chapitre II : Solution technique pour améliorer la sécurité électrique</i></b> |    |
| <u>II.1. Introduction</u> .....                                                          | 15 |
| <u>II.2. Les Problématiques du réseau électrique</u> .....                               | 15 |
| <u>II.2.1 Creux de tension</u> .....                                                     | 15 |
| <u>II.2.2 Fluctuations de la valeur efficace</u> .....                                   | 16 |
| <u>II.2.3 Fluctuations de la fréquence</u> .....                                         | 17 |
| <u>II.3 Moyens de compensation réactive</u> .....                                        | 17 |
| <u>II.3.1 Compensateurs synchrones</u> .....                                             | 18 |
| <u>II.3.2 Bancs de condensateurs</u> .....                                               | 18 |
| <u>II.3.3 Compensation statique en courant continue</u> .....                            | 19 |
| <u>II.3.3.1 HVDC</u> .....                                                               | 19 |
| <u>II.3.3.2 Compensateurs statiques en courant alternatif</u> .....                      | 19 |
| <u>II.4. Les types des FACTS</u> .....                                                   | 19 |
| <u>II.4.1 Compensateurs séries</u> .....                                                 | 20 |
| <u>II.4.1.1 Condensateurs séries contrôlés par thyristors TCSC</u> .....                 | 20 |
| <u>II.4.1.2 Compensateur synchrone statique série SSSC</u> .....                         | 22 |
| <u>II.4.2 Dispositifs de compensation dynamique shunts</u> .....                         | 23 |
| <u>II.4.2.1 Compensateur statique de puissance réactive (SVC)</u> .....                  | 23 |
| <u>II.4.2.2 Compensateur statique synchrone STATCOM</u> .....                            | 25 |
| <u>II.4.3 Compensateur série parallèle (hybride)</u> .....                               | 26 |
| <u>II.4.3.1 IPFC (contrôleur de puissance interlignes)</u> .....                         | 26 |
| <u>II.4.3.2 Contrôleur de transit de puissance universel (UPFC)</u> .....                | 27 |
| <u>II.5 Système de stockage des énergies</u> .....                                       | 28 |
| <u>II.6 Pour quoi s'orienté vers Les FACTS</u> .....                                     | 29 |
| <u>II.7 Coût des dispositifs FACTS</u> .....                                             | 29 |
| <u>II.8 Les avantages de la technologie des dispositifs FACTS</u> .....                  | 30 |
| <u>II.9 Conclusion</u> .....                                                             | 30 |

### ***Chapitre III : Définir les méthodes de sensibilités***

|                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <u>III.1 Introduction</u> .....                                                                      | 31 |
| <u>III.2 Définition de sensibilité</u> .....                                                         | 31 |
| <u>III.3 Les métho<sup>2</sup>sibilité</u> .....                                                     | 32 |
| <u>III.4 La sensibilité et les FACTS</u> .....                                                       | 34 |
| <u>III.4 .1 .1 Le facteur de sensibilité de tension</u> .....                                        | 34 |
| <u>III.4.1.2 Définition de SVC</u> .....                                                             | 35 |
| <u>III.4.1.3. Le compensateur statique de puissance réactive, SVC</u> .....                          | 36 |
| <u>III.4.2. Placement optimal du dispositif shunt (SVC) en utilisant la sensibilité de tension</u> . | 39 |
| <u>III.5. Conclusion</u> .....                                                                       | 40 |

### ***Chapitre IV : Application des méthodes de sensibilité au réseau Algérien***

|                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <u>IV Introduction</u> .....                                                                          | 41 |
| <u>IV.2.Paramètre du réseau Ouest Algérien</u> .....                                                  | 41 |
| <u>IV.3. Analyse de réseau Ouest Algérien</u> .....                                                   | 42 |
| <u>IV.3.1. Interprétation des résultats</u> .....                                                     | 44 |
| <u>IV.4. Amélioration des performances de réseau Ouest-Algérien</u> .....                             | 44 |
| <u>IV.4.1. Placement optimal du dispositif shunt SVC en utilisant la sensibilité de tension</u> ..... | 45 |
| <u>IV.4.2. Calcul de l'écoulement de puissance avec SVC</u> .....                                     | 48 |
| IV.4.2.1.Interprétation .....                                                                         | 49 |
| <u>IV.5. Actualisation de réseau Ouest Algérien</u> .....                                             | 50 |
| <u>IV.5.2. Placement de SVC Au réseau Ouest-Algérien</u> .....                                        | 51 |
| IV.5.1. Interprétation des résultats .....                                                            | 53 |
| <u>IV.5.3.Calcul de l'écoulement de puissance avec intégration de l'énergie renouvelable</u> .....    | 54 |
| IV.5.3.1. Interprétation .....                                                                        | 56 |
| <u>IV.6. Conclusion</u> .....                                                                         | 57 |
| Conclusion générale .....                                                                             | 59 |
| Références Bibliographiques .....                                                                     | 61 |
| Annexe .....                                                                                          | 63 |



### ***Chapitre I : Description des réseaux électriques moderne***

|                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure (I.1) :</b> Structure d'un réseau électrique .....                                            | 04 |
| <b>Figure (I.2) :</b> Lignes électriques.....                                                           | 05 |
| <b>Figure (I.3) :</b> Vue en coupe d'un transformateur.....                                             | 06 |
| <b>Figure (I.4) :</b> schéma équivalent d'une ligne de transport .....                                  | 08 |
| <b>Figure (I.5) :</b> Schéma équivalent d'une charge.....                                               | 08 |
| <b>Figure (I.6) :</b> Modélisation d'un générateur.....                                                 | 09 |
| <b>Figure (I.7) :</b> la nouvelle structure d'un réseau électrique.....                                 | 10 |
| <b>Figure (I.8) :</b> Part des énergies renouvelables dans la consommation finale dans l'UE En2018..... | 11 |
| <b>Figure (I.9) :</b> La consommation en EnRdes différents pays européens en 2018-2020.....             | 12 |
| <b>Figure(I.10) :</b> Mix énergétique en Algérie 2050.....                                              | 14 |

### ***Chapitre II : Solution technique pour améliorer la sécurité électrique***

|                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure (II.1) :</b> Creux de tension.....                                                        | 16 |
| <b>Figure (II.2) :</b> Fluctuation de la tension.....                                               | 17 |
| <b>Figure (II.3) :</b> Fluctuation de la fréquence.....                                             | 17 |
| <b>Figure (II.4) :</b> Structure HVDC.....                                                          | 19 |
| <b>Figure (II.5) :</b> Classification des systèmes FACTS .....                                      | 20 |
| <b>Figure (II.6) :</b> Structure de TCSC .....                                                      | 20 |
| <b>Figure (II.7) :</b> Réactance équivalente en fonction de l'angle d'amorçage .....                | 22 |
| <b>Figure (II.8) :</b> Schéma fonctionnelle .....                                                   | 23 |
| <b>Figure (II.9) :</b> (a) schéma de base d'un SVC, (b) Caractéristique d'un SVC.....               | 24 |
| <b>Figure (II.10) :</b> Schéma du base du STATCOM.....                                              | 25 |
| <b>Figure (II.11) :</b> (a) présentation d'un condensateur, (b) Caractéristique V-I du STATCOM..... | 26 |
| <b>Figure (II.12) :</b> Contrôleur de puissance interlignes.....                                    | 27 |
| <b>Figure (II.13) :</b> Contrôleur de transit de puissance unifié.....                              | 28 |

### ***Chapitre III : Définir les méthodes de sensibilité***

|                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure (III.1) :</b> Les différentes méthodes de sensibilité dans logiciel power world ..... | 33 |
| <b>Figure(III.2) :</b> Schéma type de SVC.....                                                  | 36 |
| <b>Figure(III.3) :</b> Schéma de principe de compensateur statique shunt SVC.....               | 37 |
| <b>Figure(III.4) :</b> SVC transportable.....                                                   | 37 |
| <b>Figure(III.5) :</b> Caractéristique de réglage d'un compensateur statique SVC.....           | 39 |

### ***Chapitre IV : Application des méthodes de sensibilité au réseau Algérien***

|                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure (IV.1) :</b> Schéma de réseau Ouest-algérien 220KV localisé par cercle rouge.....                              | 42 |
| <b>Figure (IV.2) :</b> Calcule de l'écoulement de puissance pour le réseau Ouest-Algérien.....                           | 43 |
| <b>Figure (IV.3) :</b> Niveau de tension sur le réseau Ouest-Algérien avant l'emplacement de SVC.....                    | 45 |
| <b>Figure (IV.4) :</b> L'emplacement de SVC dans le réseau au nœud BECHAR.....                                           | 47 |
| <b>Figure (IV.5) :</b> Visualisation des niveaux de tension sur le réseau avec emplacement du SVC Au nœud de BECHAR..... | 48 |

|                                                                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure (IV.6) :</b> Intégration des énergies renouvelables dans le réseau Ouest-Algérien.....                                                            | 51 |
| <b>Figure (IV.7) :</b> Niveau des tensions sur le réseau avec intégration d'EnR avant l'emplacement de SVC.....                                             | 52 |
| <b>Figure (IV.8) :</b> Placement de SVC dans le réseau Ouest-Algérien avec intégration des énergies renouvelables.....                                      | 54 |
| <b>Figure (IV.9) :</b> Les tensions sur le réseau avec SVC avec intégration des énergies renouvelables .....                                                | 54 |
| <b>Figure (IV.10) :</b> Graphe de comparaison des allures de tensions avec SVC du réseau Ouest-Algérien (avec intégration des énergies renouvelables) ..... | 56 |

## *Liste des Tableaux*

### *Chapitre IV : Application des méthodes de sensibilité au réseau Algérien*

|                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau (IV.1) :</b> Tableau des tensions nodales.....                                                                        | 43 |
| <b>Tableau (IV.2) :</b> Tableau des puissance transmises.....                                                                    | 43 |
| <b>Tableau (IV.3) :</b> Tableau des pertes Totales.....                                                                          | 44 |
| <b>Tableau (IV.4) :</b> La tension de nœud critique dans la région ouest du réseau Algérien.....                                 | 46 |
| <b>Tableau (IV.5) :</b> La sensibilité VQ par rapport à BECHAR.....                                                              | 46 |
| <b>Tableau (IV.6) :</b> La sensibilité VQ par rapport à AIN-SAFERA.....                                                          | 46 |
| <b>Tableau (IV.7) :</b> Les tension de réseau avec et sans SVC.....                                                              | 48 |
| <b>Tableau (IV.8) :</b> Les tensions nodales avec SVC.....                                                                       | 48 |
| <b>Tableau (IV.9) :</b> Les puissances de transmise et pertes avec emplacement de SVC au niveau de BECHAR.....                   | 49 |
| <b>Tableau (IV.10) :</b> Les pertes Totales avec SVC.....                                                                        | 49 |
| <b>Tableau (IV.11) :</b> Tableau de tension avec intégration des énergies renouvelables.....                                     | 51 |
| <b>Tableau (IV.12) :</b> La tension du nœud critique avec intégration des énergies renouvelables.....                            | 52 |
| <b>Tableau (IV.13) :</b> La sensibilité VQ par rapport à BECHAR.....                                                             | 52 |
| <b>Tableau (IV.14) :</b> La tension VQ par rapport à AIN-SEFRA.....                                                              | 53 |
| <b>Tableau (IV.15) :</b> La tension dans le réseau avec et sans SVC.....                                                         | 54 |
| <b>Tableau (IV.16) :</b> La tension nodales avec intégration des énergies renouvelables et avec l'emplacement de SVC.....        | 55 |
| <b>Tableau (IV.17) :</b> Les puissances de transmises avec intégration des énergies renouvelables avec l'emplacement de SVC..... | 55 |
| <b>Tableau (IV.18) :</b> Les pertes Totales avec intégration des énergies renouvelables avec l'emplacement de SVC.....           | 56 |

## *Liste des symboles et Abréviations*

|                |                                                        |            |                                                                |
|----------------|--------------------------------------------------------|------------|----------------------------------------------------------------|
| <b>FACTS</b>   | Système de transmission flexible en courant alternatif | <b>Y</b>   | Admittance                                                     |
| <b>SVC</b>     | Compensateur de puissance réactive statique            | <b>J</b>   | Sous matrice jacobienne                                        |
| <b>STATCOM</b> | Compensateur statique synchrone                        | <b>G</b>   | Conductance                                                    |
| <b>TCSC</b>    | Condensateur série commandé par thyristor              | <b>X</b>   | Réactance                                                      |
| <b>SSSC</b>    | Compensateur statique série synchrone                  | <b>r</b>   | Résistance                                                     |
| <b>UPFC</b>    | Contrôleur de transit de puissance unifié              | <b>B</b>   | Susceptance                                                    |
| <b>TCR</b>     | Réactance contrôlable par thyristor                    | <b>I</b>   | Le courant                                                     |
| <b>TSR</b>     | Réactance commutable par thyristor                     | <b>QV</b>  | Facteur de sensibilité de tension                              |
| <b>TSC</b>     | Condensateurs commutables par thyristor                | <b>aij</b> | Facteur de sensibilité pour la rédaction des pertes de lignes. |
| <b>AC</b>      | Courant alternatif                                     | <b>V</b>   | Module de la tension                                           |
| <b>DC</b>      | Courant continu                                        | <b>Ø</b>   | L'angle de la tension                                          |
| <b>Q</b>       | Puissance réactive                                     | <b>P</b>   | Puissance active                                               |

# *Introduction Général*

## *Introduction Générale*

Le système électrique, qui est à la base de cette énergie, fonctionne dans un environnement en constante évolution : charge, production d'électricité et topologie du réseau. La dépendance croissante de la société moderne vis-à-vis de l'électricité signifie que le système électrique peut fonctionner à une capacité de 100 % avec une fiabilité maximale.

La qualité de cette énergie est devenue une préoccupation majeure des consommateurs et des fournisseurs d'électricité d'aujourd'hui. Par conséquent, ils doivent de plus en plus respecter des normes strictes pour le développement et l'exploitation du réseau.

Dans ces conditions, la stabilité du système électrique est devenue une préoccupation permanente des fournisseurs d'électricité. Le réseau électrique doit répondre à trois exigences fondamentales : stabilité, économie et, surtout, continuité de service. La solution à ce problème consiste à améliorer le contrôle du système électrique existant. Il est nécessaire de donner une certaine flexibilité à ces systèmes afin qu'ils puissent mieux s'adapter aux nouvelles exigences

L'élément proposé pour permettre ce contrôle et cette amélioration du réseau est le dispositif FACTS " Flexible Alternating Current Transmission System". L'équipement FACTS utilise généralement le flux d'énergie, le microprocesseur, l'automatisation, les télécommunications et les logiciels pour contrôler le système d'alimentation. Ce sont des articles à choix rapide. Ils peuvent également charger la ligne de transmission à une valeur proche de sa limite thermique et augmenter la capacité de transmission de puissance d'une zone à une autre. Ils limitent également l'impact des pannes et des pannes d'équipements et stabilisent le comportement du réseau.

L'emplacement optimal des FACTS est très important côté technique (l'efficacité) et côté économique (minimise le nombre de FACTS car il est coûteux).

Il existe plusieurs méthodes de positionnement des FACTS dans les réseaux. Ces méthodes peuvent être classées en cinq grandes familles notamment, les méthodes analytiques, celle basées sur les réseaux de neurones. Les approches basées sur la sensibilité puis la combinaison de l'approche de sensibilité et les méta-heuristiques.

L'approche basée sur la sensibilité est une des méthodes utilisées pour l'emplacement optimal des dispositifs FACTS. Il y a plusieurs facteurs de sensibilité qui peuvent être utilisés pour l'endroit optimal de FACTS selon le type de FACTS ou les paramétré de contrôle.

L'objectif principal de ce mémoire est l'utilisation d'un des facteurs basés sur l'analyse de sensibilité pour localiser l'emplacement optimal de dispositif FACTS, afin d'améliorer la sécurité de réseau électrique. Cette étude va être appliquée pour un réseau Ouest Algérien réel, actualisé par l'intégration des énergies renouvelables.

Pour mener à bien ce travail, le mémoire a été structuré en quatre chapitres :

**Le premier chapitre**, sera partager en deux parties, la première partie sera consacrée au Réseau électrique (définition, composante et structure). La deuxième partie concerne tous ce qui est nouveau dans le réseau.

**Le deuxième chapitre**, donnera une vision globale du concept « FACTS », sa définition, son rôle, ces catégories et ces divers fonctionnements selon le type.

**Le troisième chapitre**, définira les méthodes de sensibilité et les sensibilités avec FACTS.

**Le quatrième chapitre** et le dernier de ce mémoire présentera nos résultats de simulation du Réseau d'application réel Ouest Algérien, dont le but d'améliorer ces performances, en utilisant l'outil informatique le logiciel Power World, en lui appliquant une des méthodes de sensibilité.

**Finalement**, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale qui synthétisera les points les plus marquants de ce travail.

# ***Chapitre I***

*Description des réseaux électriques moderne*



## ***Description des réseaux électriques Modernes***

### **I.1.Introduction :**

A l'origine, le réseau électrique a été construit et dimensionné pour transporter l'énergie électrique produite par les centres de production jusqu'aux consommateurs. Ainsi, les transits de puissances circulent depuis les centrales de productions d'énergie électrique de type thermique, hydraulique ou nucléaire, vers les consommateurs. Le « système » réseau électrique met donc en œuvre des milliers de kilomètres de ligne, des milliers de postes de transformation, ainsi que de nombreux organes de coupure et d'automates de réglage, dimensionnés pour assurer le bon fonctionnement de la fourniture d'énergie électrique. Ainsi, des contrôles hiérarchisés assurent la tenue en tension et en fréquence.

### **I.2.Définition d'un réseau électrique :**

Un réseau électrique est un ensemble d'outils destiné à produire, transporter et distribuer l'énergie électrique pour l'acheminer de la source (générateur) vers la charge (consommateur). Cet ensemble comporte des générateurs, des transformateurs, des lignes, des appareils de mesures (comme les transformateurs de tension et du courant) et de contrôles, des protections contre tous les types de défauts en veillant sur la qualité de cette énergie, notamment la continuité de service et la qualité de la tension. [1]

Un réseau électrique est un système maillé mettant en œuvre :

- **Des nœuds** (ou postes) où sont raccordés : les centrales (centre de production), les charges (Consommation) et les lignes électrique (élément du réseau).
- **Des branches** (ou lignes électrique) : qui interconnectent les nœuds.

### **I.3.Structure d'un réseau électrique :**

Celui-ci est hiérarchisé par niveau de tension et est fractionné en trois principales subdivisions à savoir le réseau de transport, de répartition et de distribution voire la figure (I.1). [2]

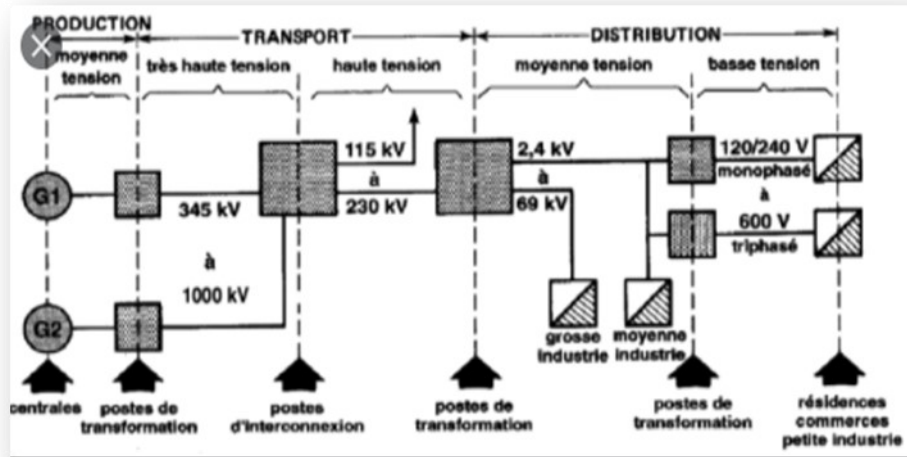


Figure (I.1) : Structure d'un réseau électrique.

### I.3.1. Réseau de transport THT :

La première de ces subdivisions est le réseau de transport qui permet de transporter de l'énergie électrique depuis les centres éloignés de production vers les centres de consommation. C'est sur le réseau THT que sont branchées les centrales de grandes puissances ( $> 300$  MW). Les réseaux de transport constituent une vaste grille couvrant le territoire, à laquelle sont raccordées les sources et les utilisations (groupes, transformateurs). Ces réseaux sont, pour la plupart, aériens et souterrains dans les villes ou à leur approche. Ils sont étudiés pour un transit donné correspondant à la limite thermique de la ligne. Les protections de ces réseaux doivent être très performantes. Quant à leur exploitation, elle est assurée au niveau national par un centre de conduite ou de dispatching à partir duquel l'énergie électrique est surveillée et gérée en permanence.

### I.3.2. Réseau de répartition HT :

Le deuxième niveau de tension est le réseau de répartition, il est généralement à plus basse tension et donc moins dispendieux et contraignant à installer et opérer. De plus, son rôle est de répartir la puissance vers les centres de charges dans un rayon d'environ 100 kilomètres d'un poste de répartition. Le réseau de répartition est donc formé des lignes et des postes alimentant le réseau de distribution à partir du réseau de transport. Généralement, le réseau de répartition est aérien. Il existe aussi certaines installations de répartition souterraines. Notons aussi, que certaines entreprises grandes consommatrices d'énergie sont parfois branchées directement au réseau de répartition sans passer par le réseau de distribution (par exemple les alumineries et les papeteries).

### **I.3.3. Réseau de distribution :**

La troisième subdivision est le réseau de distribution (20kV, 400V). Ce réseau a pour fonction d'alimenter l'ensemble de la clientèle principalement connectée à ce réseau. Son exploitation est gérée par un Gestionnaire de Réseau de Distribution (GRD). Les réseaux de distribution ont principalement une structure radiale. A la différence d'une structure maillée, une structure radiale est une structure arborescente, ainsi, le flux de puissance n'a qu'un trajet possible pour transiter du poste de transformation HTB/HTA ou HTA/BT vers le point de consommation considérée.

## **I.4. Les éléments constitutifs d'un réseau d'énergie électrique :**

### **I.4.1. La source :**

La source ou le générateur est un élément de base du réseau électrique. Il constitue le cœur de l'ensemble, sa fonction est de transformer l'énergie d'origine (hydraulique ou thermique ...) en énergie électrique.

Combustion interne ; l'alternateur est maintenu à vitesse sensiblement constante par son moteur d'entraînement à l'aide d'un système asservi de manière à développer une fréquence pratiquement constante indépendamment de la charge.

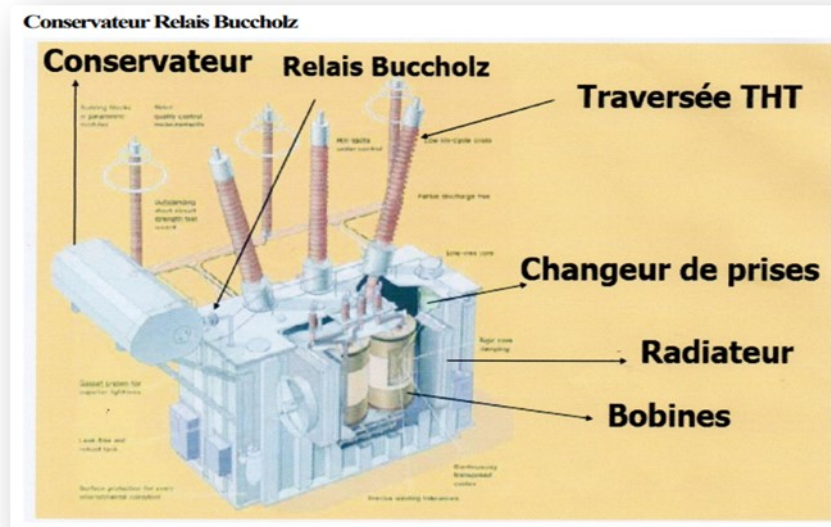
### **I.4.2. Les lignes électrique :**

Les lignes électriques assurent la fonction "transport de l'énergie" sur les longues distances, leur rôle est donc de transporter l'énergie électrique en un site de la production vers les consommateurs voire la figure (I.2).



**Figure (I.2) : lignes électriques**

### I.4.3. Les transformateurs de puissance :



**Figure (I.3) :** Vue en coupe d'un transformateur.

Un transformateur est un appareil destiné à transférer de la puissance en modifiant l'amplitude des signaux (courant, tension) et en conservant la même fréquence. On trouve sur les réseaux électriques deux types de transformateurs de puissance :

- Les autotransformateurs qui n'ont pas d'isolement entre le primaire et le secondaire. Ils ont un rapport de transformation fixe quand ils sont en service, mais qui peut être changé si l'autotransformateur est mis hors service.
- Les transformateurs avec régleurs en charge sont capables de changer leur rapport de transformation quand ils sont en service. Ils sont utilisés pour maintenir une tension constante au secondaire et jouent un rôle important dans le maintien de la tension.
- Les transformateurs étant des matériels particulièrement coûteux, leur protection.[3]

## I.5. Les caractéristiques d'un réseau électrique :

### I.5.1. Ligne de transport THT :

Ce sont des lignes qui relient les centrales éloignées aux centres de consommation ou d'utilisation. Ces lignes peuvent atteindre des longueurs allant jusqu'à 1000 km et elles fonctionnent à des tensions allant jusqu'à 750 kV.

### **I.5.2. Ligne de transport HT :**

Ce sont les lignes relient les postes de transformation principaux aux centrales de production d'énergie. Les lignes fonctionnent généralement à des tensions inférieures à 400 kV. Dans cette catégorie, on trouve aussi des lignes servant à échanger de l'énergie entre deux grands réseaux et à augmenter la stabilité de l'ensemble.

### **I.5.3. Les lignes de distribution MT :**

Ce sont des lignes qui relient les clients aux postes de transformation principaux de la compagnie de l'électricité. Leur tension est comprise entre 1 kV et 50 kV.

### **I.5.4. Les lignes de distribution BT :**

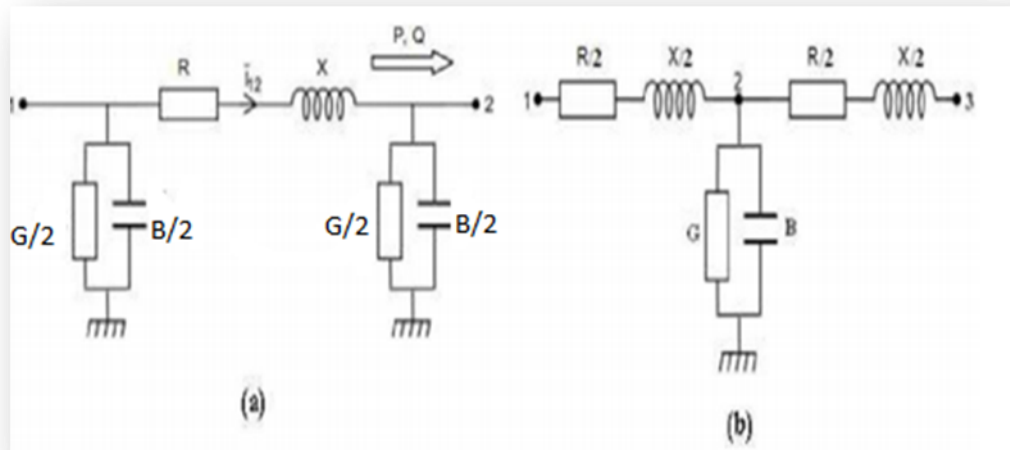
Ce sont des lignes installées à l'intérieur des édifices, usines et maisons pour alimenter les moteurs, les cuisinières, etc. Les lignes sont habituellement des câbles ou des barres fonctionnant à des tensions inférieures à 400V. [4]

## **I.6. Modélisation d'un réseau électrique :**

Le réseau de transport relie toutes les centrales électriques dans un système de puissance et distribue la puissance aux différents consommateurs. Les éléments principaux du réseau sont les lignes aériennes à haute tension, les câbles souterrains, les transformateurs et les jeux de barres. Des éléments auxiliaires peuvent être trouvés : des condensateurs en série, des réactances shunts et des systèmes de compensation, des systèmes de protection.... Pour la modélisation de notre système de puissance, nous nous intéressons à établir le modèle de transformateurs et le modèle de lignes de transmission et le modèle d'une charge.[5]

### **I.6.1. Modélisation d'une ligne de transport :**

Les réseaux de transport assurent la liaison entre les centres de production et les zones de consommation. Ils permettent aussi d'échanger de la puissance à travers les lignes d'interconnexion, entre pays ou grandes zones relevant de gestionnaires de réseaux différents. Le modèle d'une ligne de transport est donné par des quadripôles symétriques représentés par la Figure (I.4).



**Figure (I.4) :** Schéma équivalent d'une ligne de transport

(a) : Modèle en  $\pi$

(b) : Modèle en T

Où

R : résistance de la ligne

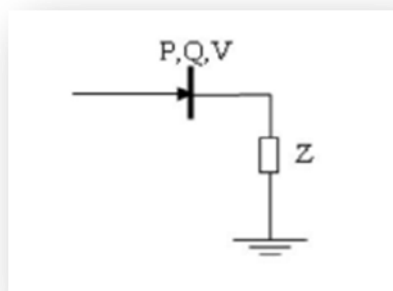
X : réactance de la ligne ;

G : conductance de la ligne ;

B : réactance capacitive de la ligne.

### I.6.2. Modélisation d'une charge :

Le modèle équivalent d'une charge est représenté par une impédance Z. Voir la figure (I.5).



**Figure (I.5) :** schéma équivalent d'une charge.

L'admittance équivalente de charge est calculée après avoir déterminé les données nécessaires de l'étude de l'écoulement de puissance :

Avec

V : Tension aux bornes de la charge ;

P, Q : puissances active et réactive consommées par la charge ;  
Z : impédance de la charge.

### I.6.2. Modélisation du générateur :

Les générateurs sont des éléments du réseau capable de fournir de la puissance active au système. Ils peuvent aussi produire, voire consommer, de la puissance réactive de manière à maintenir un certain niveau de tension. Les limites de production des générateurs sont définies par voire la figure (I.6) [6]:

$$P_{Gi \min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi \max} \quad (I.1)$$

$$Q_{Gi \min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi \max} \quad (I.2)$$

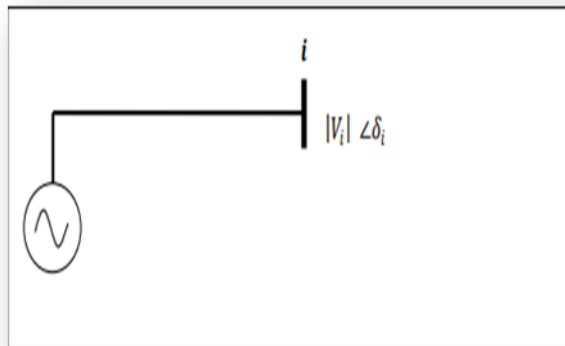


Figure (I.6) : Modélisation d'un générateur

Avec :

$P_{Gi}$  : Puissance active délivrée par le générateur au nœud i ;

$Q_{Gi}$  : Puissance réactive délivrée par le générateur au nœud i ;

$V_i$  : Tension au nœud i ;

$\delta_i$  : Angle de phase de la tension au nœud i.

### I.7. Interconnexion des réseaux électriques :

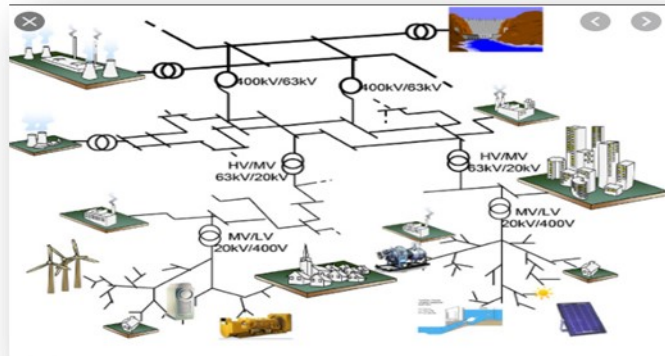
L'interconnexion entre les réseaux de transport d'électricité sert à faire passer l'énergie d'un pays à un autre. Leur rôle premier est de permettre d'assurer la distribution d'électricité en cas de défaillance soudaine sur le réseau national en faisant appel à l'énergie produite et transportée par les pays voisins.

- ✓ L'interconnexion des réseaux permet de rendre solidaires les pays voisins et de diversifier les sources de production. Ce foisonnement renforce la sécurité d'approvisionnement et diminue le risque de panne généraliser ;
- ✓ Les infrastructures existantes doivent être adaptées afin d'acheminer l'Energie produite par les nouvelles sources renouvelables.
- ✓ Les infrastructures énergétiques doivent permettre, en augmentant les échanges interrégionaux, de favoriser la concurrence et d'améliorer le fonctionnement du marché.[7]

## **I.8. Actualisation des réseaux électrique :**

L'ouverture des marchés, la volonté de préserver l'environnement et l'inquiétude grandissante face à la question de l'épuisement des réserves d'énergies fossiles conduira, de plus en plus, à envisager l'utilisation accrue de productions décentralisées à base d'énergies renouvelables (éolien, photovoltaïque, entre autres). Ces productions seront intégrées au réseau de distribution qui devra, de la même façon que le réseau de transport, assurer la disponibilité de divers services pour les gestionnaires de réseau.[8]

Les projets énergie renouvelable répondent à deux grands objectifs partagés au niveau européen et mondial : limiter les émissions de CO<sub>2</sub>, principal gaz responsable de l'effet de serre et réduire la dépendance aux ressources fossiles en raison de leur raréfaction inéluctable et de l'augmentation de leur cout [9]. Figure (I.7)

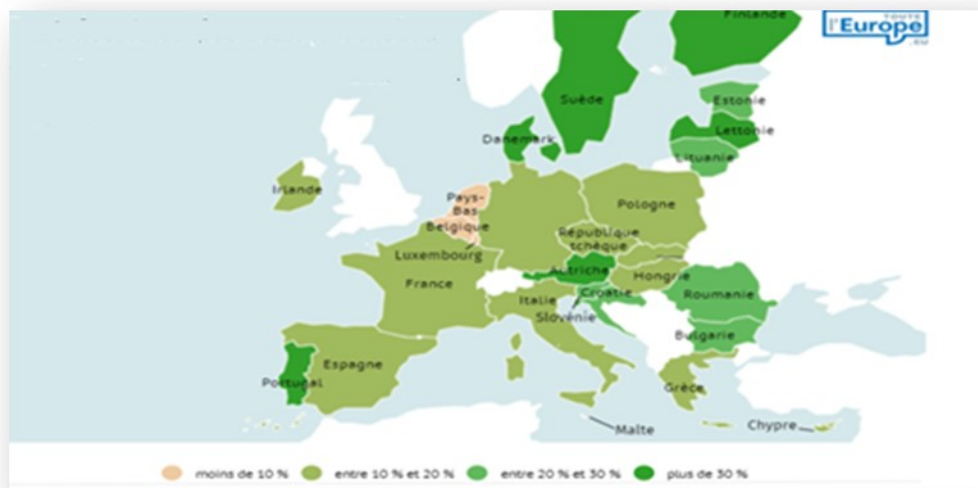


**Figure (I.7) : la nouvelle structure du réseau électrique.**

### **I.8.1. Les énergies renouvelables dans l'Europe :**

En 2009, l'Union européenne s'était fixée comme objectif d'atteindre 20 % d'énergies renouvelables dans sa consommation totale d'énergie d'ici 2020. Selon des estimations publiées en octobre 2020, l'Union européenne a estimé que cet objectif devrait être atteint, bien que de fortes disparités demeurent entre les Etats membres.





**Figure (I.8) :** Part des énergies renouvelables dans la consommation finale dans l'UE en 2018.

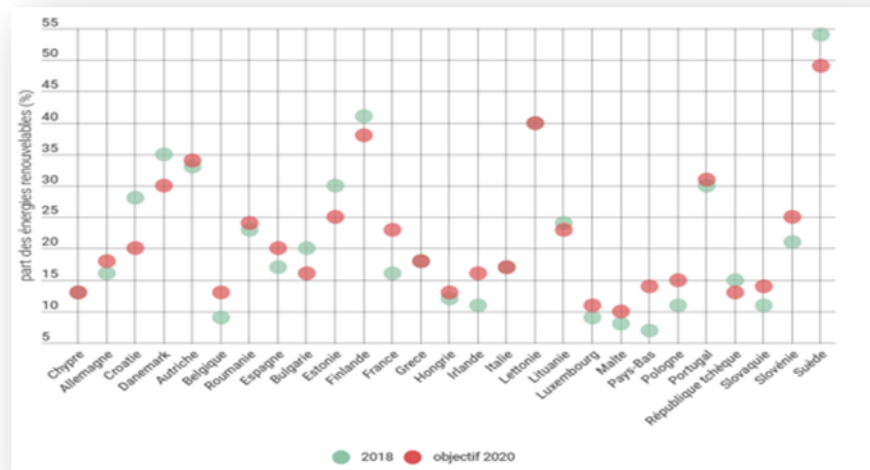
Parmi les énergies renouvelables figurent notamment la biomasse, la géothermie, l'hydrométrie, le solaire et l'éolien. Bien que la part d'énergie issue de ces sources renouvelables dans la consommation finale d'énergie de l'Union européenne ait doublé depuis 2004 (8,5 %), ces énergies ne représentent toujours qu'une petite partie du bouquet énergétique de l'UE, dominé par le gaz, le pétrole et le charbon.

Pour parvenir à ce seuil de 20% au niveau de l'Union, chaque Etat membre s'était fixé un objectif contraignant à atteindre, différent d'un contexte national à un autre. En **France**, la part d'énergies renouvelables dans la consommation totale du pays devait ainsi atteindre **23 %** d'ici 2020. L'objectif le plus élevé est celui de la **Suède**, fixé à **49 %**, et le plus faible est celui de **Malte**, fixé à **10 %**.

La Commission européenne a tiré des conclusions de ces objectifs dans sa consommation totale d'énergie en 2020 dans son rapport sur l'Union de l'énergie. Dans l'ensemble, l'Union Européenne est en bonne voie pour atteindre ses objectifs, mais certains Etats membres ont encore des progrès importants à faire. En 2018, l'Union européenne a atteint **18 %** d'énergies renouvelables (18,9 % pour l'UE 27) et devrait atteindre **22,8% à 23,1%** en 2020 selon les estimations de l'exécutif européen.

**Douze Etats membres** ont déjà atteint ou dépassé leur objectif. Avec **54,6 %** d'énergie produite à partir de sources renouvelables dans sa consommation finale brute en 2017, la **Suède** est ainsi le pays de l'Union européenne le plus en avance sur le sujet. Celle-ci a d'ores et déjà dépassé son objectif de plus de 5 points.

Les autres pays européens en avance par rapport à leurs objectifs de 2020 se situent principalement dans le nord de l'UE, mais la **Croatie** ou la **Bulgarie** sont également dans ce cas de figure. L'**Autriche** et le **Portugal**, deux pays qui se sont fixé des objectifs élevés (autour de 30 % d'énergies renouvelables) sont pour leur part en bonne voie pour les réaliser. Figure (I.9)



**Figure (I.9) :** La consommation en EnR des différents pays européens en 2018-2020.

Cependant, selon les projections de la Commission européenne, **cinq pays** sont encore loin d'atteindre leurs objectifs : la **Belgique**, la **France**, la **Pologne**, les **Pays-Bas** et le **Luxembourg**.

Selon la Commission européenne, il existe de “forts risques” que la France n’atteigne pas son objectif. En 2018, le pays était en effet 6 points (16,6%) en deçà du ratio de 23% qu’il s’était fixé pour 2020. Pour cette année, la Commission estime que la France a seulement atteint le seuil des 20%. La **Belgique** et la **Pologne** accusent elles aussi un léger retard selon les mêmes projections, en atteignant respectivement 12% (pour un objectif de 13%) et 13,8% (pour un objectif de 15%). Les **Pays-Bas** et le **Luxembourg** courent pour leur part un risque modéré de ne pas atteindre leurs objectifs.[8]

### I.8.2. Les énergies renouvelables en Algérie :

Le programme de développement des ENR pour la période 2030, respectueux des engagements de la COP 21, devrait se structurer pour le réseau de transport électrique :

- 2800 MW en photovoltaïque (PV)
- 11 200 MW en solaire thermique (CSP : Le contrat de sécurisation professionnelle)

- 10 MW en éolien

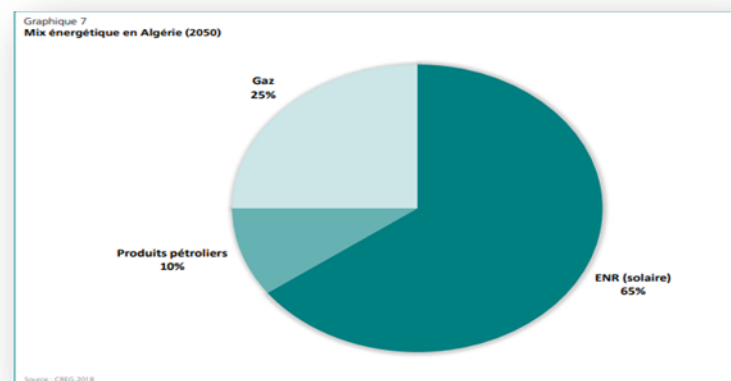
L'estimation des gaz en Algérie par la Banque mondiale indique plus de 6 milliards M<sup>3</sup> de gaz par an.

Le potentiel annuel énergétique de l'Algérie serait :

- Pétrole 50 MTEP/an
- Gaz 85 MTEP/an
- Gaz de schiste 20 MTEP/an
- Solaire thermique 40000 MTEP/an soit 40000 milliards M<sup>3</sup>/an (DLR 2005)

Au vu du potentiel en solaire thermique de la rive Sud, il est possible de satisfaire dix fois la consommation énergétique mondiale. Le mix énergétique mondial sera composé à l'horizon 2050 à 55% en électricité. Il s'agit de respecter les engagements de la COP24 et d'importer l'électricité verte disponible en quantité largement suffisante au Sud et totalement compétitive avec le nucléaire et les énergies fossiles. En effet, l'Algérie pour satisfaire ses besoins en électricité seulement à l'échéance 2050, aurait besoin de 250 TWh. Pour la phase 2030–2050, il faudrait ajouter 20 000 MW en solaire thermique et 2000 MW en PV. Pour les autres pays maghrébins, il faut savoir que :

- Le Maroc importe 15% de ses besoins électriques et le gaz pour 19% de sa production électrique.
- La Tunisie aussi souffre d'un déficit en électricité, et cela suppose de gros investissements puisque 56% de l'électricité tunisienne est produite par du gaz Algérien.
- La Lybie a quant à elle un déficit important avec une demande de près de 14 TWh pour une production de 9 TWh.



**Figure (I.10) : Mix énergétique en Algérie 2050.**

Notons que, en énergie renouvelable l'Algérie contient 17 postes- photovoltaïque et un poste éolien à ADRAR. [9]

### **I.9.Conclusion :**

Nous avons présenté dans ce chapitre trois grandes parties essentielles du système d'énergie électrique. Tout d'abord, nous avons décrit le système sous sa forme générale, par la suite nous avons essayé d'illustrer les principaux éléments du réseau d'énergie électrique et nous avons finalisé ce chapitre par la notion d'actualisation de ce dernier dans le monde et plus particulièrement dans l'Algérie, vue sa place importante et riche pour les ressources renouvelables.

En parallèle, le but premier d'un réseau d'énergie est de pouvoir alimenter la demande des consommateurs. Comme on ne peut encore stocker économiquement et en grande quantité l'énergie électrique, il faut pouvoir maintenir en permanence l'égalité entre production et consommation, mais il y a toujours des problèmes qui perturbent notre réseau. L'objectif du prochain chapitre propose une solution parmi d'autres pour améliorer les performances du réseau électrique moderne.

# ***Chapitre II***

***Solution technique pour améliorer la  
sécurité électrique***

## ***Solution technique pour améliorer La sécurité électrique***

### **II.1. Introduction :**

Avec le développement rapide d'électronique de puissance, les Systèmes Flexibles de Transport AC (FACTS : Flexible AC Transmission System) ont été créés et implémentés dans les réseaux électriques. Les FACTS peuvent être utilisés pour contrôler l'écoulement de puissance et améliorer la stabilité du système. Particulièrement, avec le nouveau système de dérégulation du marché de l'énergie, il y a une augmentation de l'intérêt accordé aux FACTS dans l'exploitation et le contrôle des réseaux électriques et ceci est dû aux nouvelles contraintes de charge et aux nouvelles contingences. L'installation des FACTS est devenue indispensable Pour augmenter la capacité et la contrôlabilité d'un réseau électrique.

Il y a deux aspects principaux qui doivent être considérer lors de l'utilisation des FACTS, le premier, c'est rendre flexible le fonctionnement du réseau vu sa capacité d'écoulement de puissance, le deuxième, c'est l'amélioration de la stabilité statique et transitoire du réseau.

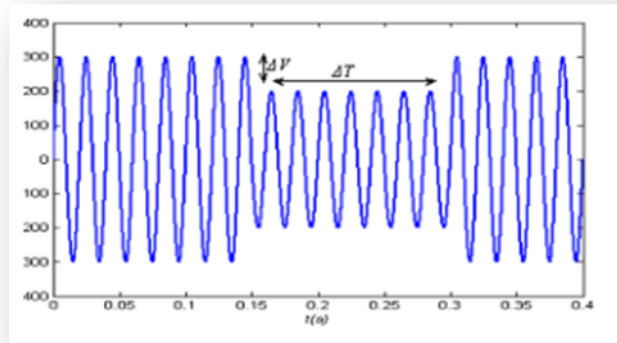
### **II.2. Les Problématiques du réseau électrique :**

Il y a essentiellement deux types de perturbations sur la valeur efficace de la tension :

- Les creux de tension
- Les fluctuations

#### **II.2.1 Creux de tension :**

Les creux de tension sont produits par des courts circuits survenant dans le réseau électrique en général ou dans les installations de la clientèle (figure II.1). Le creux de tension est caractérisé par sa profondeur  $\Delta U$  et sa durée  $\Delta T$  et peut être monophasé ou triphasé selon le nombre de phases concernées voire la figure (II.1).



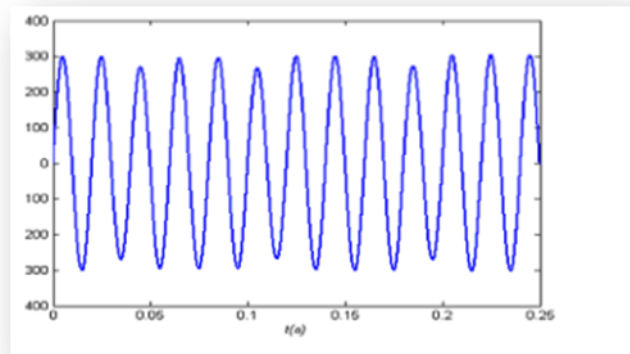
**Figure (II.1) : Creux de tension**

Les creux de tension peuvent provoquer le déclenchement d'équipements, lorsque leur profondeur et leur durée excèdent certaines limites (dépendant de la sensibilité particulière des charges). Les conséquences peuvent être extrêmement coûteuses (temps de redémarrage se chiffrant en heures, voire en jours ; pertes de données informatiques ; dégâts aux produits, voire aux équipements de production...)

Les principales causes des creux de tension sont les perturbations dues à l'exploitation des réseaux comme la mise sous tension de gros transformateurs, les courts circuits, enclenchement des condensateurs, ...etc. [10]

### **II.2.2 Fluctuations de la valeur efficace :**

Les fluctuations de tensions sont des variations de basses fréquences de la valeur Efficace de la tension (figure (II.2)). Ces variations ont une amplitude modérée (généralement 10 %) mais peuvent se produire plusieurs fois par seconde et peuvent être cycliques ou aléatoires, elles sont désignées communément par effet Flicker. Cette perturbation est causée par les grosses charges dont la puissance absorbée varie d'une manière aléatoire comme par exemple les fours à arc ou les machines à souder, et elle se manifeste souvent par des perturbations sur les couples et les vitesses des machines tournantes voire la figure (II.2).[10]

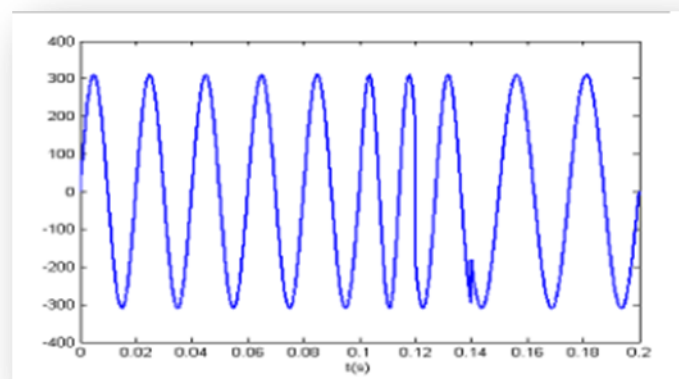


**Figure (II.2):** Fluctuation de la tension.

### **II.2.3 Fluctuations de la fréquence :**

Les fluctuations de fréquence sont caractérisées par des variations de la valeur nominale de la fréquence (50 Hz) comme illustré sur la figure (II.3), résultant des variations de vitesse des alternateurs suite à un déséquilibre entre charges et puissances mises en jeu par les centrales.

Elles se manifestent par des perturbations des vitesses et des couples dans les machines synchrones et asynchrones, et parfois par l'arrêt entier des systèmes voire la figure (II.3). [10]



**Figure (II.3) :** Fluctuation de la fréquence

### **II.3 Moyens de compensation réactive :**

Il existe plusieurs catégories de dispositifs de production de puissance réactive : compensateurs synchrones, les bancs de condensateurs et les compensateurs statiques de puissance réactive.



### **II.3.1 Compensateurs synchrones :**

Les compensateurs synchrones sont des alternateurs synchrones connectés au réseau, mais ils ne sont pas entraînés par une turbine et ne fournissent donc pas de puissance active. Comme ils fonctionnent en moteur, ils consomment la puissance active correspondant à la compensation de ces pertes mécaniques et électriques. A l'instar des générateurs synchrones,

Leur courant d'excitation est réglable, permettant ainsi de contrôler la tension à leur nœud de connexion.[10]

### **II.3.2 Bancs de condensateurs :**

Les bancs de condensateurs sont des dispositifs statiques de compensation de puissance réactive. Leur connexion sur les systèmes énergétiques permet d'injecter de la puissance réactive. Néanmoins leur fonctionnement en tout ou rien ne permet pas un pilotage de la tension, même s'ils peuvent être connectés par gradins. Les connexions ou déconnexions de condensateurs entraînent une diminution de leur durée de vie. Un inconvénient supplémentaire de ces dispositifs est que la puissance réactive générée diminue avec le carré de la tension ; en effet la puissance réactive générée par un banc de condensateur triphasé de capacité par phase C sous la tension composée U vaut :

$$Q_c = - c w U^2 \quad (II.1)$$

Avec :

$Q_c$  : La puissance absorbée par un condensateur

C : Capacité

W : Pulsation

U : La tension composée

Une tension basse diminue l'efficacité du condensateur alors qu'il est nécessaire d'injecter plus de puissance réactive. Un autre paramètre important à prendre en compte pour les bancs de condensateur est le niveau de tension auxquels ils sont connectés. Le coût de ces appareils dépend en partie de la qualité du diélectrique utilisé. Les condensateurs sont plus économiques pour des niveaux de tension de l'ordre de 20 kV, c'est-à-dire adaptés aux réseaux de distribution. [10]

### II.3.3 Compensation statique en courant continu :

#### II.3.3.1 HVDC :

Un HVDC dit "back to back" (dos à dos), dont les deux extrémités sont sur le même lieu et ne comporte donc pas de ligne de transmission à courant continu, peut être assimilé à un FACTS, puisque son unique rôle est de contrôler le transit de puissance entre deux réseaux alternatifs voire la figure (II.4). [11]

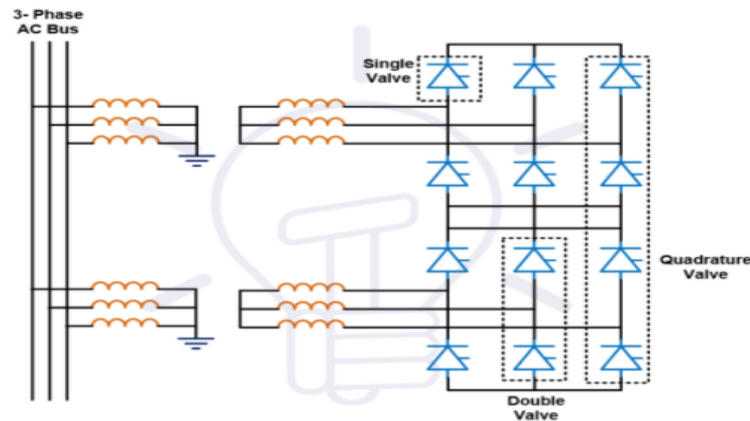


Figure (II.4) : Structure de HVDC.

#### II.3.3.2 Compensateurs statiques en courant alternatif :

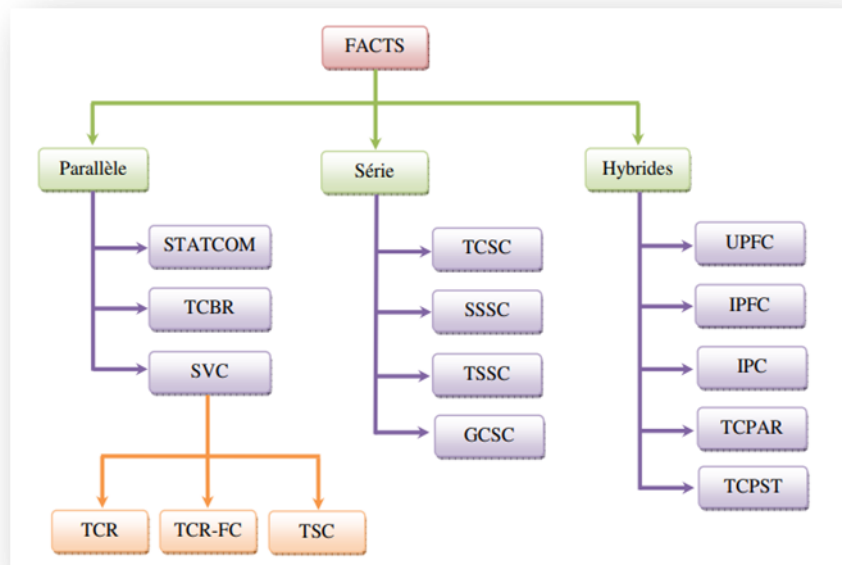
##### II.3.3.2.1 Les FACTS :

Les compensateurs statiques de puissance réactive, ou FACTS sont des dispositifs plus récents qui associent des bancs de condensateurs et de bobines à des convertisseurs d'électronique de puissance permettant de régler la puissance réactive délivrée et ainsi la tension du nœud de connexion. Ces appareils ont un temps de réponse très court, de l'ordre de quelques dizaines de millisecondes.

Le nom est l'acronyme anglais pour *Flexible Alternating Current Transmission System*, c'est-à-dire *Système flexible de transmission en courant alternatif* (il n'existe pas d'acronyme d'usage courant en français). [ 11]

### II.4. Les type des FACTS :

Les systèmes FACTS sont partagés en trois familles qui sont mis en évidence suivant la figure ci-dessous :



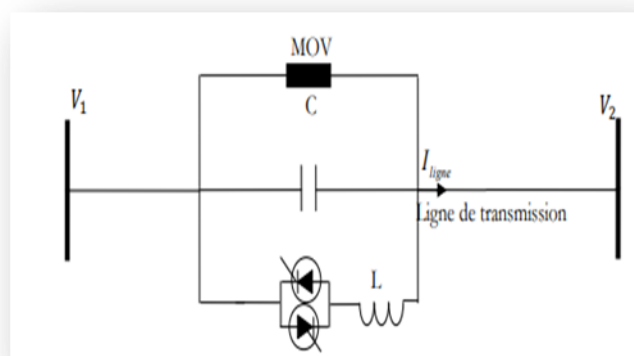
**Figure (II.5) :** classification des systèmes FACTS.

### II.4.1 Compensateurs séries :

Ces compensateurs sont connectés en série avec le réseau et peuvent être utilisés comme une impédance variable (inductive, capacitive) ou une source de tension variable. En général, ces compensateurs modifient l'impédance des lignes de transport en insérant des éléments en série avec celles-ci.[12]

#### II.4.1.1 Condensateurs séries contrôlés par thyristors TCSC :

Le TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) est parmi les dispositifs FACTS les plus importants, utilisé pendant plusieurs années pour l'augmentation de la puissance transmise par la ligne, afin de renforcer la stabilité du réseau. Il est constitué d'une inductance en série avec un gradateur (TCR Thyristor Series Reactor) et l'ensemble en parallèle avec une capacité comme l'illustre la Figure (II.5). [ 12]



**Figure (II.6).** Structure du TCSC

Le TCSC placé en série dans une ligne de transport permet de contrôler le flux de puissances et d'élever la capacité de transfert des lignes en agissant sur la réactance  $X_{TCSC}$  qui varie selon l'angle de retard à l'amorçage  $\alpha$  des thyristors donnés par la formule : [12]

$$X_{TCSC}(\alpha) = \frac{jLW}{\frac{2}{\pi} \left( \pi - \alpha + \frac{\sin(2\alpha)}{2} \right) - LCW^2} \quad (II.2)$$

Avec :

$X_{TCSC}$  : La réactance du dispositif TCSC

$L$  : L'inductance

$W$  : La pulsation

$C$  : La capacité

$\alpha$  : Angle de retard à l'amorçage

L'action du contrôle du TCSC est exprimée en termes de pourcentage de compensation donné par :

$$K_c = \frac{X_c}{X_L} \cdot 100\% \quad (II.3)$$

Où :

$X_L$  ; la réactance de la ligne ;

$X_C$  ; la réactance capacitive effective offerte par le TCSC.

Suivant la valeur de  $\alpha$  nous distinguons trois modes de fonctionnement :

- $\alpha = 180^\circ$  : la bobine est complètement déconnectée, le TCSC est considéré comme un condensateur série fixe ;
- $90^\circ < \alpha < 180^\circ$  : Est la combinaison parallèle de  $X_L$  et  $X_C$  ;
- $\alpha = 90^\circ$  Les thyristors sont en pleine conduction, le TCSC peut servir à limiter le courant de défaut. La puissance transitée dans une ligne équipée d'un TCSC est donnée par la formule :

$$P_{12} = \frac{\overline{V_1} \overline{V_2}}{X_{TCSC}} \cdot \sin(\delta_1 - \delta_2) \quad (II.4)$$

Ou :

$P_{12}$  : La puissance transitée.

$V_1$  : La tension d'entrée

$V_2$  : La tension de sortie

$X_{TCSC}$  : La réactance

$\delta$  : Angle de déphasage de chaque noeud de tension

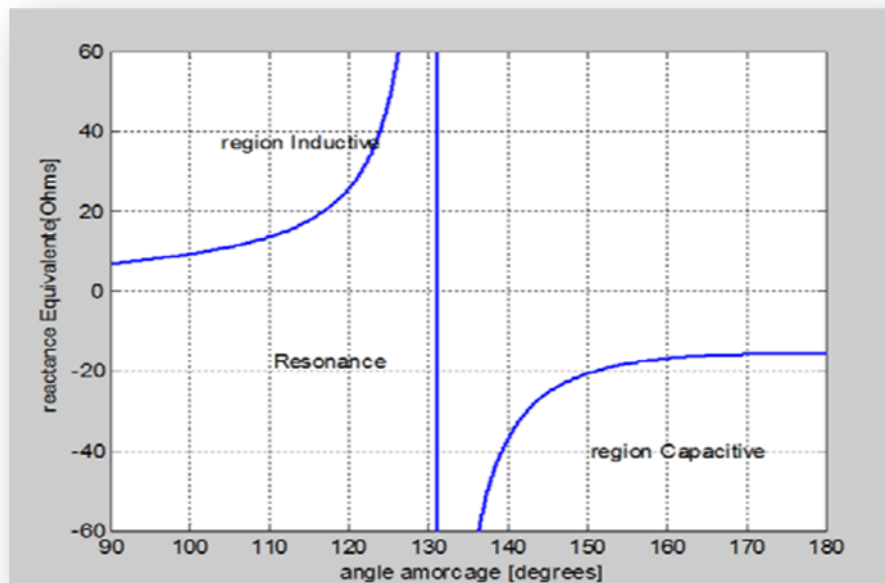


Figure (II.7) : Réactance équivalente en fonction de l'angle d'amorçage

#### II.4.1.2 Compensateur synchrone statique série SSSC :

Ce type de compensateur série (en anglais, Static Synchronous Series Compensator) est le plus important dispositif de cette famille. Il est constitué d'un onduleur triphasé couplé en série avec la ligne électrique à l'aide d'un transformateur. Ce dispositif possède des avantages si l'on compare avec le TCSC :

- Elimination des composants passifs (inductance et capacités);
- Une aptitude symétrique dans les deux modes (inductif et capacitif). Son rôle est d'introduire une tension triphasée, à la fréquence du réseau, en série avec la ligne de transport. Cette tension est en quadrature avec le courant de la ligne.

Nous pouvons, dans ce cas, régler continuellement la valeur apparente de la capacité ou de l'inductance ainsi introduite dans la ligne. La figure suivante montre le schéma de base d'un SSSC.

Généralement, chaque ensemble possède en parallèle un élément de protection contre les surtensions, appelé MOV (Métal Oxide Varistor).[13]

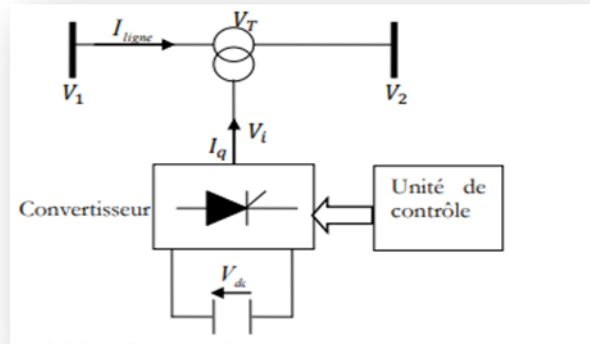


Figure (II.8) : schéma fonctionnelle

## II.4.2 Dispositifs de compensation dynamique shunts :

Vers la fin des années 60 plusieurs équipements utilisant l'électronique de puissance ont fait leurs apparitions. Ces derniers avaient l'avantage d'éliminer les parties mécaniques et d'avoir un temps de réponse très court. Ces équipements étaient constitués essentiellement d'une inductance en série avec un gradateur. Le retard à l'amorçage des thyristors permet de régler l'énergie réactive absorbée par le dispositif. En effet tous les compensateurs parallèles injectent du courant au réseau via le point de raccordement. Quand une impédance variable est connectée en parallèle sur un réseau, elle consomme (ou injecte) un courant variable. Cette injection de courant modifie les puissances actives et réactive qui transitent dans la ligne. [13]

### II.4.2.1 Compensateur statique de puissance réactive (SVC) :

Le SVC (statice var compensateur) est la première génération FACTS qui a été introduite sur le marché il y a presque plus de vingt ans. Il est constitué d'un banc de condensateurs commutés par thyristors (TSC thyristors switched capacitors) et d'un banc de bobines contrôlées par thyristors (TCR thyristor Controlled reactors) comme indiqué par la figure (II.8). Le premier SVC installé sur une ligne de transport d'énergie était en 1979 en Afrique du sud.

Avec une coordination appropriée de l'interrupteur des condensateurs et le contrôle des bobines, la puissance réactive de sortie peut être variée continuellement entre les taux capacitifs et inductifs de l'équipement.[14]

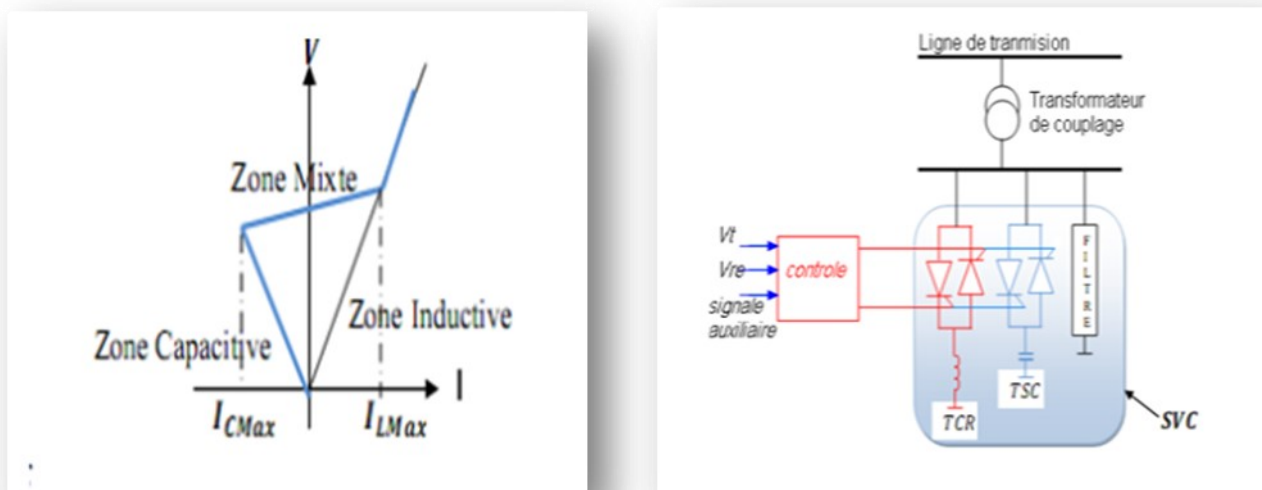


Figure (II.9) : (a) : Schéma de base d'un SVC

(b): Caractéristique d'un SVC

Le SVC est basé sur des éléments inductifs et capacitifs ordinaires, et le contrôle se fait à travers des éléments à base d'électronique de puissance (thyristors ordinaires). Les principales fonctions d'un SVC sont :

- Le support de la tension.
- Amortissement des oscillations de la puissance.
- Amélioration des marges de stabilité statique et transitoire.

À partir de la caractéristique statique de compensateur SVC, on peut distinguer trois zones de fonctionnement :

1. Une zone (Capacitive) ou le TSC donne une énergie maximale, seule les Capacités sont connectées au réseau.
2. Une zone (Mixte) ou de réglage ou l'énergie réactive est une combinaison des TCR et des TSC.
3. Une zone (Inductive) ou le TCR donne son énergie maximale (butée de réglage), les condensateurs sont déconnectés.

Malgré ces caractéristiques, le SVC présente des inconvénients dont la capacité est limitée par les éléments inductifs et capacitifs ainsi que son comportement hors de la zone de réglage. [ 14]

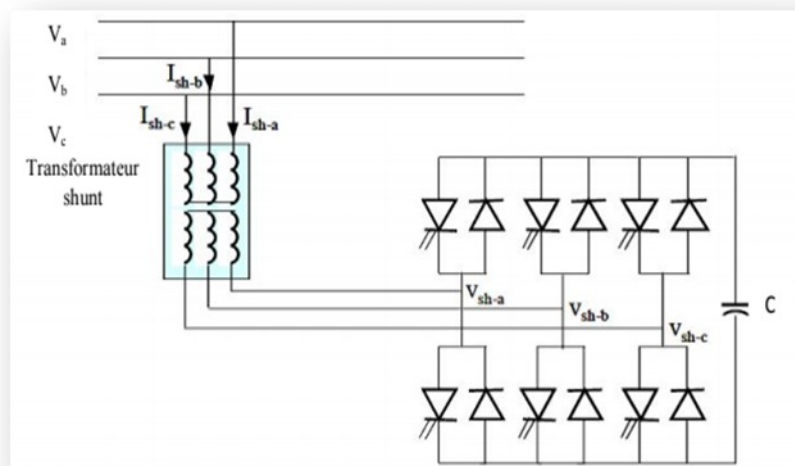
### II.4.2.2 Compensateur statique synchrone STATCOM :

Le principe de ce type de compensateur est connu depuis la fin des années 70 mais ce n'est que dans les années 90 que ce type de compensateur a connu un essor important grâce aux Développement des interrupteurs GTO de forte puissance.

Le STATCOM (Statique Compensateur) a connu jusqu'à maintenant différentes appellations :

- ASVC (Advanced Static Var Compensator)
- STATCON (STATicCONDenser)
- SVG (Static Var Generator)
- SVClight
- SVCplus

Le compensateur statique synchrone STATCOM est constitué d'un convertisseur à source de tension, d'un transformateur de couplage et de circuits de commande. Dans cette application, La source d'énergie DC peut être remplacée par un condensateur C, de sorte que l'échange d'énergie en régime permanent entre le compensateur statique et le réseau soit uniquement réactif, comme illustré par la figure ci-dessous [15]:



**Figure (II.10) :** Schéma de base du STATCOM

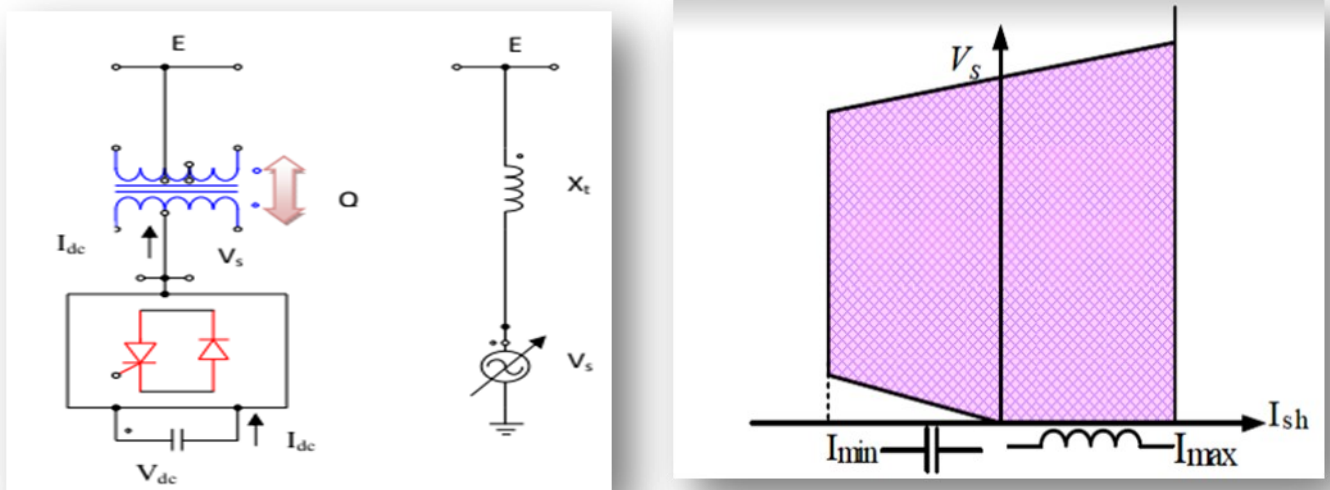
Cependant, le STATCOM de base engendre de nombreux harmoniques. Il faut donc utiliser, pour résoudre ce problème, des compensateurs multi-niveaux à commande MLI ou encore installer des filtres.



Le principe de fonctionnement de STATCOM est similaire à celui du compensateur synchrone. Les tensions de sortie sont générées par un onduleur au lieu d'avoir été créées par un groupe tournant.

Ce principe a pu être mis en œuvre grâce à l'évolution des composants de l'électronique de puissance, et surtout grâce à l'apparition des GTO de forte puissance. Les cellules de commutation sont bidirectionnelles, c'est-à-dire formées de GTO et de diodes antiparallèles.

Le rôle de STATCOM est d'échanger l'énergie réactive avec le réseau électrique. L'échange d'énergie réactive se fait par le contrôle de la tension de sortie de l'onduleur  $V_s$ , laquelle est en phase avec la tension du réseau  $E$ . [15]



**Figure (II.11) :** (a) : Présentation d'un compensateur (b) : Caractéristique V-I du STATCOM.

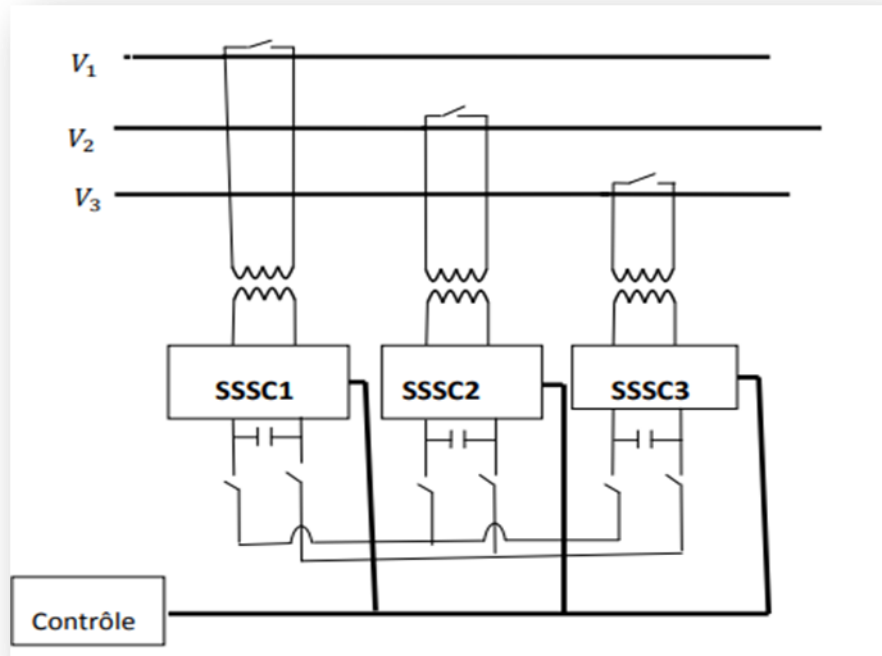
### II.4.3 Compensateur série parallèle (hybride) :

Les compensateurs FACTS cités précédemment (série ou parallèle), permettent d'agir uniquement sur un des trois paramètres déterminant la puissance transmise dans une ligne (tension, impédance et angle). Par une combinaison des deux types de dispositifs, il est possible d'obtenir des dispositifs hybrides capables de contrôler simultanément les différentes variables précitées. [15]

#### II.4.3.1 IPFC (contrôleur de puissance interlignes) :

La combinaison de deux ou plusieurs SSSC, couplés via un bus continu commun, permet de faciliter l'échange de puissance active entre les différentes lignes. Ils sont contrôlés pour assurer une compensation réactive des lignes pour ajuster le flux de puissance active et la

distribution désirée de la puissance réactive le long des lignes. La Figure (II.11) montre une structure générale d'un IPFC. Sous sa forme générale, l'IPFC utilise des convertisseurs DC/DC placés en série avec la ligne à compensé. [15]



**Figure (II.12):** Contrôleur de puissance interlignes

L'IPFC trouve l'application dans les grandes stations afin d'assurer la compensation de plusieurs lignes de transport. Les SSSC sont utilisés afin de maximiser la puissance active transmissible sur une ligne. Avec l'IPFC, la puissance active peut être transférée entre les différentes lignes. Donc, il sera possible de .

- Egaliser les puissances active et réactive entre les lignes de transport.
- Augmenter la puissance maximale transmise à travers les lignes de transport.
- La compensation de la demande en puissance réactive et ainsi réduire les chutes de tension.
- Améliorer l'efficacité des systèmes électriques en régime dynamique.

#### **II.4.3.2 Contrôleur de transit de puissance universel (UPFC) :**

IEEE définit l'UPFC comme étant une combinaison entre un STATCOM et un SSSC couplés via une liaison à courant continu, pour permettre un écoulement bidirectionnel de la puissance active entre la sortie du SSSC et celle du STATCOM.

L'UPFC permet le contrôle de la tension, de l'impédance, et de l'angle ou d'écoulement de la puissance active et réactive de la ligne. [15]

L'UPFC est capable de remplir toutes les fonctions des autres dispositifs FACTS. Il peut être utilisé particulièrement pour :

- Réglage de la tension ;
- Contrôle de flux de puissance active et réactive ;
- Amélioration de la stabilité ;
- Limitation des courants de court-circuit ;
- Amortissement des oscillations de puissance.

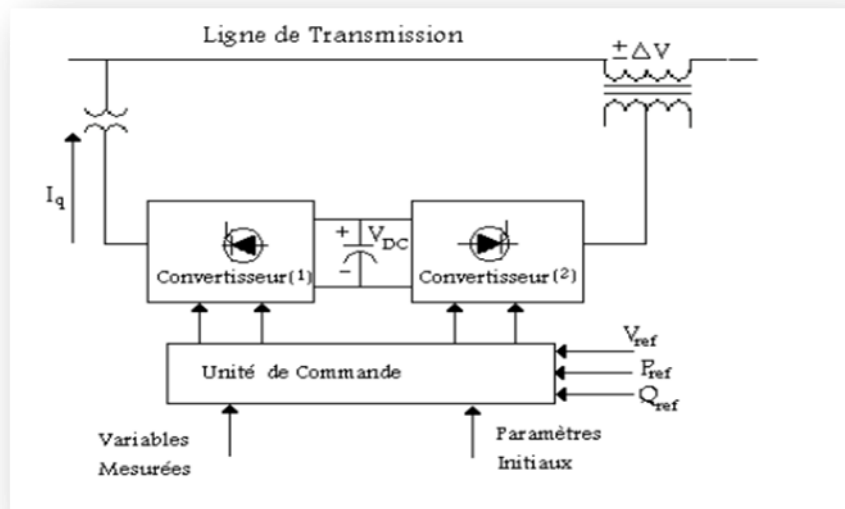


Figure (II.13): Contrôleur de transit puissance unifié.

## II.5 Système de stockage des énergies :

Les systèmes de stockage temporaire d'énergie ne sont pas à proprement parler des FACTS, mais peuvent leur être combinés ou associés et participer à la qualité du réseau électrique : [ 11]

- **BESS** (Battery Energy Storage System): stockage d'énergie par batterie.
- **SMES** (Superconducting Magnetic Energy Storage): stockage d' énergie par inductance supraconductrice.
- **SCES** (Energy Storage by supercapacitor.) stockage d'énergie par supercondensateur.
- **KESS** (Kinetic Energy Storage System): stockage inertial d'énergie.
- **CAES** (Compressed Air Energy Storage): stockage d'énergie par air comprimé.

## **II.6 Pour quoi s'orienté vers Les FACTS :**

Les bénéfices que peut fournir la technologie des FACTS et leurs implémentations :[16]

- Contrôle de l'écoulement de puissance : c'est la fonction principale des FACTS. L'utilisation du contrôle de l'écoulement de puissance peut satisfaire les demandes de charge, atteindre un fonctionnement optimal, et surmonter les conditions d'urgence.
- Amélioration de la stabilité dynamique. Cette fonction supplémentaire des FACTS comprend l'amélioration de la stabilité transitoire, l'amortissement des oscillations de puissance et le contrôle de stabilité de la tension.
- Augmenter la capacité de transport de lignes à leurs capacités thermiques, y compris les demandes à court terme et saisonnière.
- Fournir des connections sécurisées entre les compagnies de production et les régions par la diminution de la réserve de la puissance à générer requise par les deux zones.
- Mise à niveau des lignes de transport.
- Réduction de l'écoulement de la puissance réactive, ce qui permettrait ainsi à la ligne de transporter plus de puissance active.
- Contrôle de la boucle de l'écoulement de puissance.

## **II.7 Coût des dispositifs FACTS :**

Mis à part les avantages techniques apportés par les FACTS, d'autres critères liés au coût doivent être pris en considération dans la décision d'installer un dispositif. Sur le plan économique, le critère généralement adopté dans l'évaluation des bénéfices obtenus par un FACTS est que l'accroissement des revenus doit excéder les coûts d'exploitations, de maintenance et d'amortissement de l'installation. Le coût d'une installation FACTS dépend principalement des facteurs tels que les performances requises, la puissance de l'installation, le niveau de tension du système ou encore la technologie du semi-conducteur utilisé.[17]

## **II.8 Les avantages de la technologie des dispositifs FACTS :**

Les contrôleurs FACTS permettent dans un système énergétique d'obtenir un sinon plusieurs des bénéfices suivants : [18]

- Contrôle le transit de la puissance active.
- Contrôle des tensions dans les nœuds.

- Réduit le transit de l'énergie réactive.
- Optimise les puissances générées, donc réduit le coût de production de l'énergie.
- Améliorée l'interconnexion et l'échange énergétique.
- Amélioration de la qualité de l'énergie.

## **II.9 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelque type des systèmes FACTS. Concernent le fonctionnement et l'intégration de ces dispositifs de compensation dynamique dans les réseaux électriques ont été discuté. Un des problématiques des FACTS dans le réseau et leurs emplacements, avec l'arrivé des méthodes de sensibilité les FACTS peuvent être placé d'une façon plus optimal possible. D'où l'objective, du prochain chapitre qui traitera le principe des méthodes de sensibilité.

# ***Chapitre III***

*Définir les méthodes de sensibilités*

## ***Définir les méthodes de sensibilité***

### ***III.1 Introduction :***

En raison de la déréglementation du marché de l'électricité, difficulté à acquérir des droits de passage pour construire de nouvelles lignes de transmission, et une augmentation constante de la demande d'électricité, Maintenir la stabilité du système électrique devient une tâche difficile et problème très difficile. Dans un marché de l'électricité concurrentiel, le système est dit congestionné lorsque le volume de transactions dépasse la capacité de transfert du Couloir de transmission.

A ce jour, plusieurs centaines d'installation FACTS sont exploitées ou en cours de réalisation dans le monde. Un petit nombre de fabrication se partagent le marché. La majorité des dispositifs sont des compensateurs de puissance réactive de type SVC utilisés pour le maintien de la tension dans le réseau.

La grande majorité de ces dispositifs est placée dans le réseau pour accomplir une tâche bien précise et très locale. Rares sont les cas où plusieurs dispositifs peuvent interagir entre eux et nécessitent un contrôle coordonné.

Ce chapitre traite une méthode des méthodes de sensibilité, appelé « sensibilité de tension », cette dernière va nous permettre de localiser l'emplacement optimal du dispositif de contrôle le SVC pour résoudre le problème de variation de tension dans le réseau.

### III.2 Définition de sensibilité :

*Le concept de sensibilité est largement connu et utilisé dans de nombreux problèmes de systèmes électriques, et il permet de comprendre comment le système se comporte lorsque son état est affecté. En raison de cette propriété, l'analyse de sensibilité est un outil très utile et peut être parfaitement utilisé pour définir des actions de contrôle correctives dans un réseau de transmission. Un moyen pratique pour déterminer les facteurs de sensibilité est à travers le premier ordre d'une série de Taylor.*

*Malgré sa précision, due à l'approche linéaire, il fournit une bonne estimation du comportement de tout système qui peut être représenté par un ensemble d'équations, y compris les systèmes de puissance. De plus, les formules pour obtenir les sensibilités sont similaires pour n'importe quel paramètre, et il faut un temps très court pour les développer vers d'autres paramètres, une fois qu'elles assument une matrice jacobienne constante. Cette propriété rend la série Taylor très attrayante dans les situations d'urgence.*

La première partie de ce chapitre définit toutes les types de facteur de sensibilité tels que la sensibilité des pertes , la sensibilité TLR ( Transmission Line Relief ),LODF (Line Outage Distribution Facto) ,OTDF ( Outage Transfer Distribution Factor ) et le facteur de sensibilité de la tension .Ces calculs de sensibilité sont également utilisé pour déterminer si la capacité en ligne indiqué dans le plan de ressources est situé au bon endroit dans le réseau pour répondre à la demande de prévision .[18]

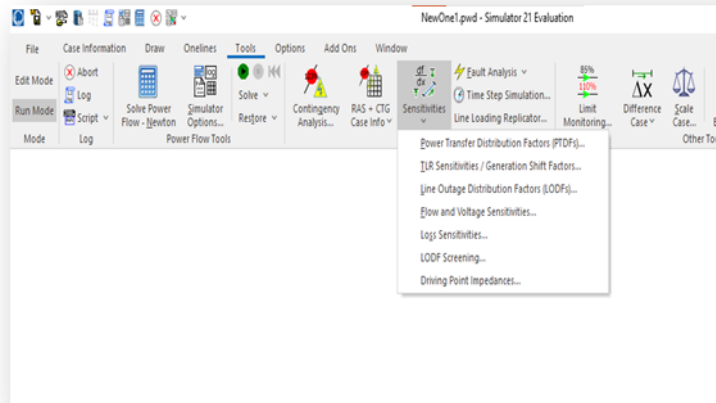
### III.3 Les méthodes de sensibilité :

Parmi les logiciels qui sont utilisés par les compagnies d'électricité, nous avons jugé utile d'utiliser le logiciel Power World pour étudier le réseau électrique.

L'objet essentiel du Power World est de simuler une zone contrôlée dans un système de tension interconnectée selon une variation de charge pendant un intervalle de temps généralement 24h.

Le but de cette simulation est d'assurer l'équilibre entre la consommation et la production de l'énergie électrique à tout instant, avec un coût minimal, égal à la valeur programmée ou très proche d'elle. Le Power World ne fonctionne que sous Windows et utilise le système d'affichage de ce dernier, il se base sur des fenêtres chacune à son rôle à effectuer dans les opérations de ce logiciel.[19]





**Figure (III.1) :** Les différentes méthodes de sensibilité dans logiciel power world.

Les différentes méthodes de sensibilité sont :

**A) PTDFs (Power transfer Distribution Factor):**

Du point de vue du transfert de puissance une transite est une quantité spécifique de puissance qui est injectée dans le système dans un nœud par un générateur est dessinée sur un autre nœud par une charge. Le coefficient de relation linéaire entre une transaction et le flux sur une ligne est représenté par PTDF.[20]

**B) LODF (Line Outage Distribution Factors):**

Les facteurs de distribution des pannes de ligne (LODF) sont une mesure de sensibilité de la façon dont un changement dans l'état d'une ligne affecte les flux sur les autres lignes du système. Sur une ligne sous tension, le calcul LODF détermine le pourcentage du flux de ligne actuel qui apparaîtra sur les autres lignes de transmission après la panne de la ligne. [21]

**C) TLR (Transmission Line Relief) :**

La décharge de charge de la transmission (TLR) est une séquence d'actions prises pendant la planification des opérations ou pendant l'exploitation en temps réel pour éviter ou remédier aux violations de la sécurité associés au système de transmission. Informel où Le TLR « local » existe depuis aussi longtemps que les lignes de transmission ont été soumises à des limitations. Les planificateurs et les opérateurs de systèmes ont développé des méthodes systématiques procédures pour aider à éviter ou à éliminer les problèmes de chargement de la transmission. Ces procédures sont généralement uniques à chaque zone de contrôle et peut varier considérablement à travers le réseau interconnecté. [22]

### D) L'écoulement de tension :

La sensibilité de tension indique la variation de la tension dans un nœud due à l'injection de puissance réactive dans un autre nœud, ce facteur permet de détecter les nœuds les plus sensible, à partir de ces nœuds on peut déterminer l'emplacement des FACTS.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{Pv} \\ J_{Q\theta} & J_{Qv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (\text{III.1})$$

### E) La sensibilité des pertes :

Le facteur de sensibilité aux pertes peut prédire quel nœud réduira le plus les pertes lorsque le condensateur est placé. Par conséquent, ces nœuds sensibles peuvent être utilisés comme nœuds candidats pour placer des condensateurs. On estime que ces nœuds candidats aident essentiellement à réduire l'espace de recherche pour l'optimisation des problèmes. Étant donné qu'il n'y a que quelques nœuds qui peuvent être utilisés comme candidats à la compensation.

### III.4 La sensibilité et les FACTS :

Pour améliorer les performances d'un réseau électrique, plus précisément voire l'évolution de la stabilité de tension ainsi que le transit de puissance, nous nous sommes orientés vers la méthode de sensibilité appelée « méthode de facteur de sensibilité de

#### III.4 .1 L'écoulement de tension :

Le facteur de sensibilité à la tension est la variation de l'indice de stabilité de la tension par rapport aux changements des injections de puissance réelle et réactive sur un nœud. Les indices de sensibilité qui relient les changements de l'indice de stabilité de tension par rapport aux changements de puissance active et réactive injectée au niveau d'un nœud de charge sont dérivés de la formulation de l'indice de stabilité de tension. L'indice de stabilité de tension au niveau d'un nœud de charge identifie les nœuds critiques, c'est-à-dire les nœuds sujets à un effondrement de tension dans le système d'alimentation.[23]

$$L_i = \frac{4 [V_{oi} V_{Li} \cos \theta_i - V_{Li}^2 \cos \theta_i^2]}{V_{oi}^2} \quad (\text{III.2})$$

Quand :  $\theta_i = \theta_{oi} - \theta_{Li}$

$$\frac{\partial L_i}{\partial \theta_i} = \frac{4 [-V_{oi} V_{Li} \sin \theta_i + 2V_{Li}^2 \cos \theta_i \sin \theta_i]}{V_{oi}^2} \quad (III.3)$$

$$\frac{\partial L_i}{\partial V_{Li}} = \frac{4(V_{oi} - 2V_{Li})}{V_{oi}^2} \quad (III.4)$$

$$\theta_i \ll 1$$

$$\frac{\partial L_i}{\partial P_i} = \frac{\partial L_i}{\partial V_{Li}} \times \frac{\partial V_{Li}}{\partial P_i} + \frac{\partial L_i}{\partial \theta_{Li}} \times \frac{\partial \theta_{Li}}{\partial P_i} \quad (III.5)$$

$$\frac{\partial L_i}{\partial Q_i} = \frac{\partial L_i}{\partial V_{Li}} \times \frac{\partial V_{Li}}{\partial Q_i} + \frac{\partial L_i}{\partial \theta_{Li}} \times \frac{\partial \theta_{Li}}{\partial P_{Qi}} \quad (III.6)$$

Avec :

$L_i$  : La charge (Load).

$V_{Li}$  : La tension.

$P_i$  : La puissance active injecté.

$Q_i$  : La puissance réactive injecté.

$\theta_i$ : Angle d'indice.

Ce modèle est utilisé pour modifier la tension avec la présence du SVC pour déterminer Son emplacement optimal.[23]

### III.4.2 Définition de SVC :

IEEE définit le SVC (Static Var Compensator) comme un générateur (ou absorbeur) statique d'énergie réactive shunt, dont la sortie est ajustée en courant capacitif ou inductif afin de contrôler des paramètres spécifiques du réseau électrique, typiquement la tension des jeux de barres.

Le SVC conventionnel est composé de l'association d'un condensateur commandé par thyristors (TSC « Thyristor Switched Capacitor») et d'une réactance commandée par thyristors (TCR «Thyristor Controlled Reactor») qui sont connectés en parallèle .Le SVC est connecté au réseau à travers un transformateur. La Figure (III.2) montre le schéma type d'un SVC.[24]

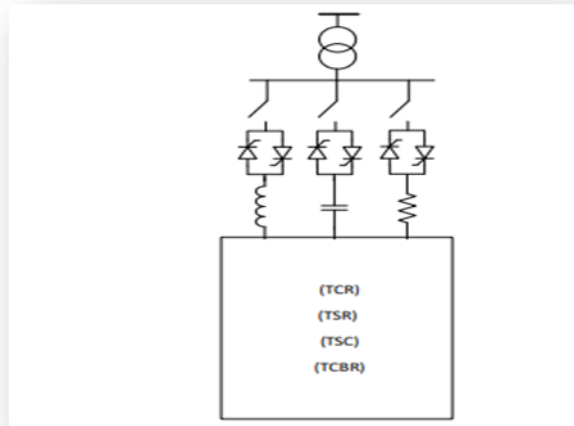


Figure (III.2) : Schéma type de SVC

### III.4.3 Le compensateur statique de puissance réactive, SVC :

Le schéma de principe d'un compensateur *shunt* (*SVC*) est représenté sur la figure (III.3). Ces systèmes sont actuellement constitués presque toujours de trois inductances séparées, câblées en triangle et réglées indépendamment par un variateur, de courant à thyristors, pour permettre un rééquilibrage du réseau par action différenciée sur chacune des phases. Un banc triphasé de condensateurs commutables en gradins, placé en parallèle, complète le dispositif.

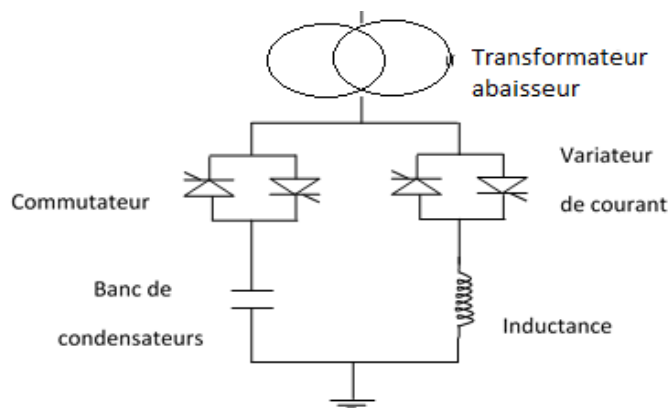


Figure (III.3) : Schéma de principe du compensateur statique shunt, SVC.

Plus de 200 *SVC* sont en fonctionnement de par le monde dans les réseaux électriques de 10 à 765 kv. Les plus anciens datent des années 1970. La principale fonction d'un *SVC* est le support de la tension mais il peut également être utilisé pour réduire le phénomène de flicker en présence de charges fluctuantes (laminoirs, fours à arcs....), amortir les oscillations de puissance et augmenter le transfert de puissance (par ces deux actions, il améliore les

marges de stabilité statique et transitoire) et réduire les oscillations hypo synchrones. La capacité d'un *SVC* peut varier de -300 à 800 MVar de manière continue ou discrète. Le réseau d'Hydro-Québec a été un des premiers équipés de ce type de compensateur sur longue ligne [25].



**Figure (III.4) :** SVC transportables .

Des *SVC* standardisés sont présents dans le réseau de la National Grid Compagny (NGC) en Angleterre, ils possèdent une capacité de -75 à 150 MVar obtenue par un *TSC* de 110MVA, une *TCR* de 115 MVar et des filtres de 40 MVar.

Parmi ces *SVC* standardisés, on trouve les deux *SVC*, installés depuis 1992 à la sous station Harker dans le nord du réseau électrique anglais, dont le but spécifique est l'augmentation des marges de stabilité statique et transitoire afin de satisfaire aux standards de planification dans le cas d'une augmentation de transfert de puissance de l'Écosse vers l'Angleterre. Le mode de contrôle des *SVC* est conçu de manière à rendre disponible la capacité totale des *SVC* pour l'amélioration de la stabilité transitoire.

On trouve également, au sein de la NGC, des *SVC* transportables constitués de cabines transportables contenant les valves à thyristors, les systèmes de contrôle et de protection ainsi que les sources auxiliaires de puissance. Les réactances, condensateurs, transformateurs auxiliaires peuvent, quant à eux, être montées à l'extérieur sur des plates-formes facilement transportables. La NGC a développé deux types de spécification pour standardiser ces *SVC* transportables.

Le premier type permet un taux de compensation en capacitif allant jusqu'à 60 MVar, le côté inductif n'étant pas requis pour ce type de *SVC*. Le déplacement complet d'un site à un autre ne dure pas plus de trois mois et peut survenir jusqu'à huit fois pour une durée de vie de 40 ans. La seconde spécification permet une compensation comprise entre 150 et 225 MVar

en capacitif pour les réseaux de 400 kv et 275 kv. Le déplacement complet est possible en six mois.

Un *SVC* conçu selon un concept de « conteneurisation » a été installé à la sous-station de 150 kv de Jember dans le réseau indonésien. Le concept a été choisi pour réduire au maximum le temps de fabrication, la pré installation et les prétests chez le fabricant et en réduisant le temps d'intervention sur le site d'installation. Le container permet également une relocalisation plus simple et plus économique. Ce *SVC*, d'une capacité de 50 MVar en capacitif et de 25 MVar en inductif, comprenant une *TCR* et un filtre d'harmonique, assure un contrôle rapide de la tension afin d'améliorer le transfert de puissance dans le cas de situations extrêmes comme la perte d'une ligne de transmission de 150 kv.

L'un des plus puissants *SVC* du monde est localisé à Forbes dans le système de transmission Manitoba-Minnesota aux Etats-Unis. Sa mise en service a permis une augmentation de la capacité du système de transmission de 200 MW. Il est composé de deux *TSR* et trois *TSC*. La capacité du *SVC* varie de 149 MVar en continu à 450 MVar pendant 10 secondes toutes les 30 minutes pour la compensation inductive et de 110 MVar pendant 10 secondes toutes les 30 minutes pour la compensation capacitive à 500 kv. Deux bancs de condensateurs, de 300 MVar à 500 kv, commués mécaniquement et contrôlés par le même contrôleur que le *SVC* permettent de porter la puissance totale à 1000 MVar pour la compensation en capacitif.

La caractéristique de régulation des *SVC* généralement adoptée est représentée sur la figure (III.5). Elle se base sur la mesure de la tension du réseau. Le principal désavantage de ces dispositifs réside dans leur comportement en dehors de la zone de régulation ou ils agissent comme des réactances constantes et présentent une puissance de compensation proportionnelle au carré de la tension.

En outre, le courant absorbé par les inductances est riche en harmoniques d'ordre impair. Ces harmoniques sont généralement éliminés à l'aide de filtres LC et la connexion en triangle du compensateur permet déjà l'élimination des composantes homopolaires de rang multiple de trois.[25]

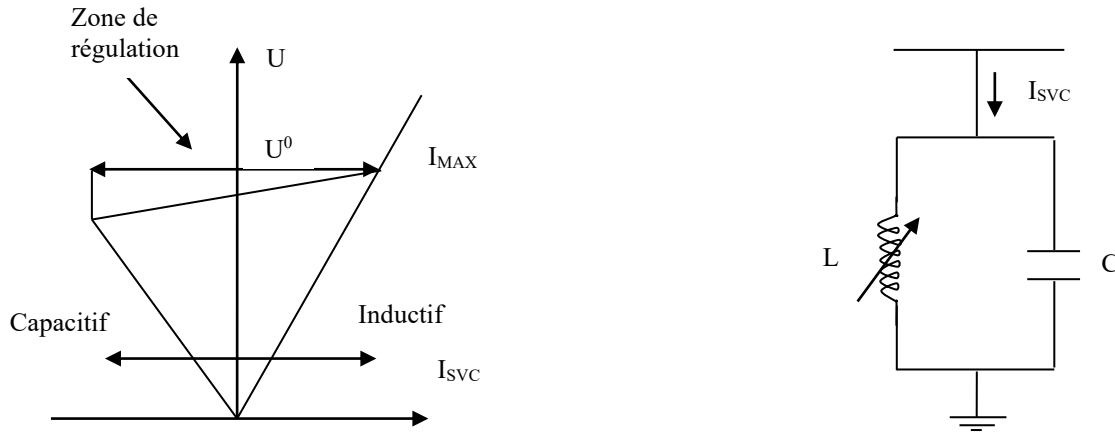


Figure (III.5) : Caractéristique de réglage d'un compensateur statique SVC.

### III.4.4 Placement optimal du dispositif shunt (SVC) en utilisant la sensibilité de tension :

Le compensateur statique VAR (SVC) est généralement utilisé comme régulateur de tension dans les systèmes électriques. Il peut aider à maintenir l'amplitude de la tension sur le nœud auquel il est connecté à une valeur souhaitée lors des variations de charge. Nous pouvons modéliser le SVC comme une source de puissance réactive variable.

$V$  et  $V_{ref}$  sont les amplitudes de tension de nœud et de référence, respectivement. Modéliser le SVC en tant que source VAR variable, nous pouvons définir les limites maximales et minimales de la puissance réactive de sortie  $Q_{SVC}$  selon ses susceptances inductives et capacitives disponibles  $B_{ind}$  et  $B_{cap}$ , respectivement. Ces limites peuvent être données comme : [26]

$$Q_{max} = B_{ind} \cdot V_{ref}^2 \quad (III.7)$$

$$Q_{min} = B_{cap} \cdot V_{ref}^2 \quad (III.8)$$

Avec :

$$B_{ind} = \frac{1}{x_l}, \quad B_{cap} = \frac{1}{x_c} \quad (III.9)$$

Avec :

$V, V_{ref}$  : Les amplitudes de tension de nœud et de référence.

$Q_{SVC}$  : La puissance réactive.

$B_{ind}$  : Susceptance inductive.

$B_{cap}$  : Susceptance capacitive.

### **III.5. Conclusion :**

La sécurité des réseaux est un problème important dans les systèmes électriques libéralisés. Le dispositif FACTS tels que SVC en contrôlant la stabilité de tension d'énergie dans le réseau, peut aider à réduire la puissance active et réactive transitant sur deux lignes.

En raison des coûts considérables de FACTS, il est important d'obtenir une localisation optimale pour l'emplacement de ces dispositifs. Ce chapitre traite une des méthodes de sensibilité, qui est la sensibilité de tension.

Grace au logiciel *power world*, nous allons illustrer l'application et la simulation de cette méthodes pour un réseau électrique réel qui le réseau Ouest Algérien : en adoptant l'ancien et le nouveau réseau actualisé en énergies renouvelables. Dont l'objective est de monter le principe et le but de la méthode déjà citée précédemment. Voir le chapitre (IV) suivant.



# ***Chapitre VI***

*Application des méthodes de sensibilité au  
réseau Algérie*

## ***Application des méthodes de sensibilité au réseau Algérien***

### **IV.1. Introduction :**

La sécurité du réseau est la question la plus préoccupante pour les gestionnaires de réseau de transport. SVC et autres FACTS sont des solutions pour améliorer les performances du réseau, injecter de la puissance réactive pour augmenter la tension et réduire les pertes de puissance réactive. Afin d'obtenir les meilleurs résultats, il est important de trouver le meilleur emplacement pour l'équipement.

Dans ce chapitre, nous appliquerons la méthode basée sur la sensibilité de tension pour trouver le meilleur emplacement du SVC sur la chute de tension pour assurer le fonctionnement sûr et fiable du réseau Ouest-Algérien qui a été mentionné dans le chapitre précédent. Le réseau sera analysé à l'aide d'outils de simulation logiciels Power World version 21.

### **IV.2. Paramétré du réseau Ouest Algérien :**

La figure (IV.1) représente le réseau Algérien 220KV, mais notre travail est consacré pour le réseau ouest il possède :

Mais notre travail est consacré pour le réseau ouest

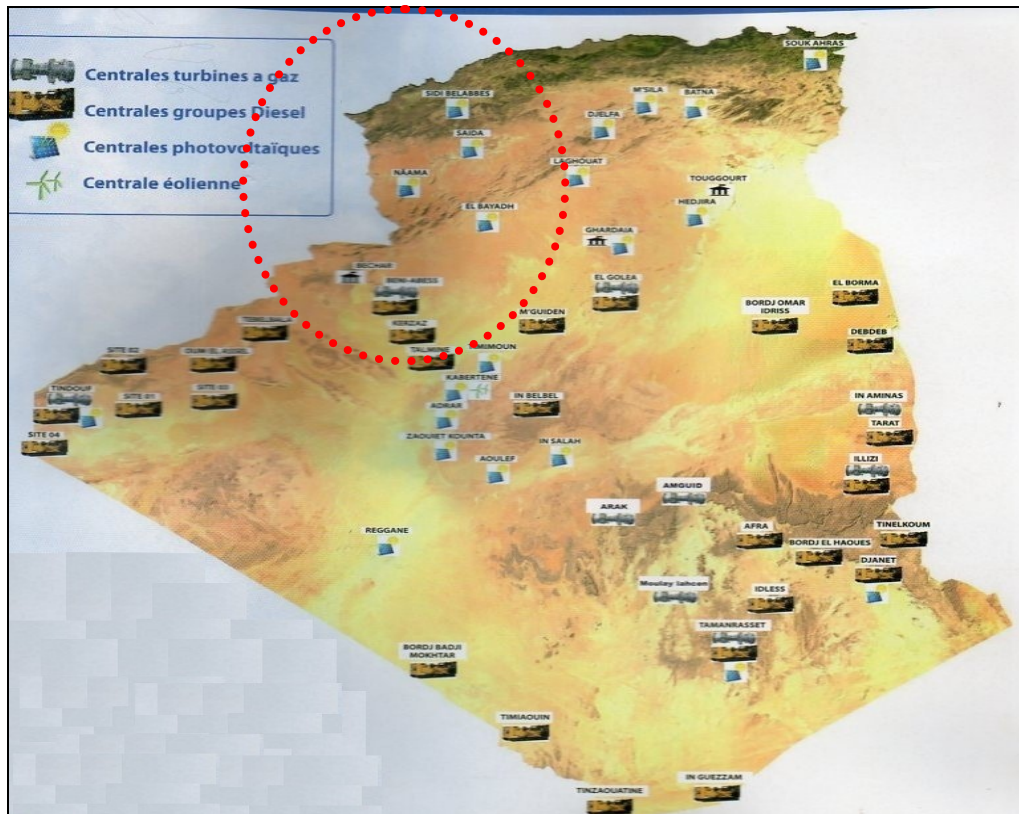
-13nœuds.

-03 générateurs.

-12 charges.

-16 lignes.

La tension de nœud référence est de l'ordre de 1,07 pu situé au nœud de MARSAT EL HADJAJD 1.



**Figure (IV.1) :** Schéma du réseau Ouest-Algérien 220KV localisé par cercle rouge.

### **IV.3. Analyse de réseau Ouest Algérien :**

Pour étudier les performances de notre réseau Ouest Algérien de manière à évaluer les problématiques qui se pose, on doit effectuer une analyse, l'application choisie est celle du principe de calcul de l'écoulement de puissance.

Concernant la méthode appliquée pour le calcul de l'écoulement de puissance, on a choisi la méthode de Newton Raphson. Les résultats obtenus sont dressés dans les tableaux qui Suits.

**Remarque :** La chute de tension selon SADEG (la nouvelle nominalisation de SONELGAZ) ne doit pas dépasser 10%.

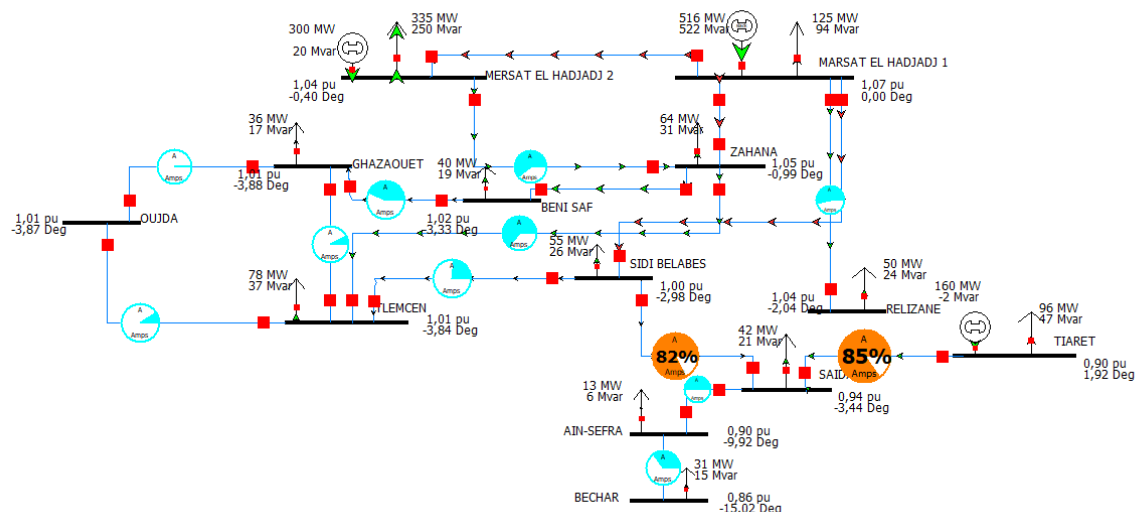


Figure (IV.2) : l'écoulement de puissance pour le réseau Ouest Algérien

Tableau (IV.1) : Tableaux des tensions nodales.

| K  | Nom                 | Tension (pu) | Angle (Deg) |
|----|---------------------|--------------|-------------|
| 1  | MARSAT EL HADJADJ1  | 1,07000      | 0,00        |
| 2  | OUJDA               | 1,01000      | -3,88       |
| 3  | GHAZAOUET           | 1,01110      | -3,88       |
| 4  | ZAHANA              | 1,04803      | -0,99       |
| 5  | MERSAT EL HADJADJ 2 | 1,04438      | -0,40       |
| 6  | TLEMCEN             | 1,00627      | -3,84       |
| 7  | SIDI BELABESS       | 0,99966      | -2,98       |
| 8  | RELIZENE            | 1,04348      | -2,04       |
| 9  | BENI-SAF            | 1,01931      | -3,33       |
| 10 | SAIDA               | 0,94248      | -3,44       |
| 11 | TIARET              | 0,90000      | 1,92        |
| 12 | BECHAR              | 0,85998      | -15,02      |
| 13 | AIN-SEFRA           | 0,90473      | -9,92       |

Tableau (IV.2) : Tableau de puissances transmises.

| Ligne (k-m) | P <sub>k-m</sub> (MW) | Q <sub>k-m</sub> (MVAR) | P <sub>Loss</sub> (MW) | Q <sub>Loss</sub> (MVAR) |
|-------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|
| (1-4)       | 147,8                 | 116,3                   | 1,04                   | -0,44                    |
| (5-1)       | -90,6                 | -200,3                  | 0,79                   | 3,33                     |
| (1-7)       | 101,6                 | 88,6                    | 2,35                   | 5,59                     |
| (8-1)       | -50,0                 | -24,0                   | 0,49                   | -5,01                    |
| (3-2)       | 0,4                   | 1,1                     | 0,00                   | -3,09                    |
| (6-2)       | -0,4                  | -8,6                    | 0,00                   | -4,41                    |
| (3-6)       | 1,4                   | 7,6                     | 0,01                   | -3,57                    |
| (9-3)       | 38,0                  | 21,7                    | 0,08                   | -4,00                    |

|         |       |       |      |        |
|---------|-------|-------|------|--------|
| (5-4)   | 55,6  | -29,7 | 0,10 | -2,55  |
| (6-4)   | -58,5 | -27,3 | 1,13 | -3,73  |
| (9-4)   | -78,0 | -40,7 | 0,62 | -5,72  |
| (7-6)   | 17,7  | -15,3 | 0,07 | -5,26  |
| (10-7)  | -25,6 | -72,9 | 0,95 | -0,55  |
| (10-11) | -62,3 | 50,2  | 1,74 | 1,32   |
| (10-13) | 45,8  | 1,7   | 1,14 | -8,72  |
| (13-12) | 31,7  | 4,4   | 0,70 | -10,60 |

**Tableau (IV.3) :** Tableau des pertes totales.

| <b>Puissances totales</b> | <b>P(MW)</b> | <b>Q (MVAR)</b> |
|---------------------------|--------------|-----------------|
| Charges                   | 965          | 587             |
| Générateurs               | 976,23       | 539,60          |
| Pertes                    | 11,23        | -47,40          |

### **IV.3.1. Interprétation des résultats :**

D'après les résultats obtenus, nous pouvons déduire que :

- Pour les tensions de réseau Ouest Algérien, nous avons observé une bonne stabilité des niveaux de tension pour chaque nœud sauf pour le nœud numéro 12, possédant une chute de tension au niveau de BECHAR de l'ordre de 0,85998 pu,
- Concernant les puissances transmissent dans le deuxième tableau (IV.2), nous avons remarqué que dans les lignes (1-4), (5-1) et (1-7) le transit est très important d'où le risque de surcharge dans ces lignes. Nous observons aussi que les pertes de puissance réactives sont plus importantes que les pertes de puissance actives.

### **IV.4. Amélioration des performances de réseau Ouest-Algérien :**

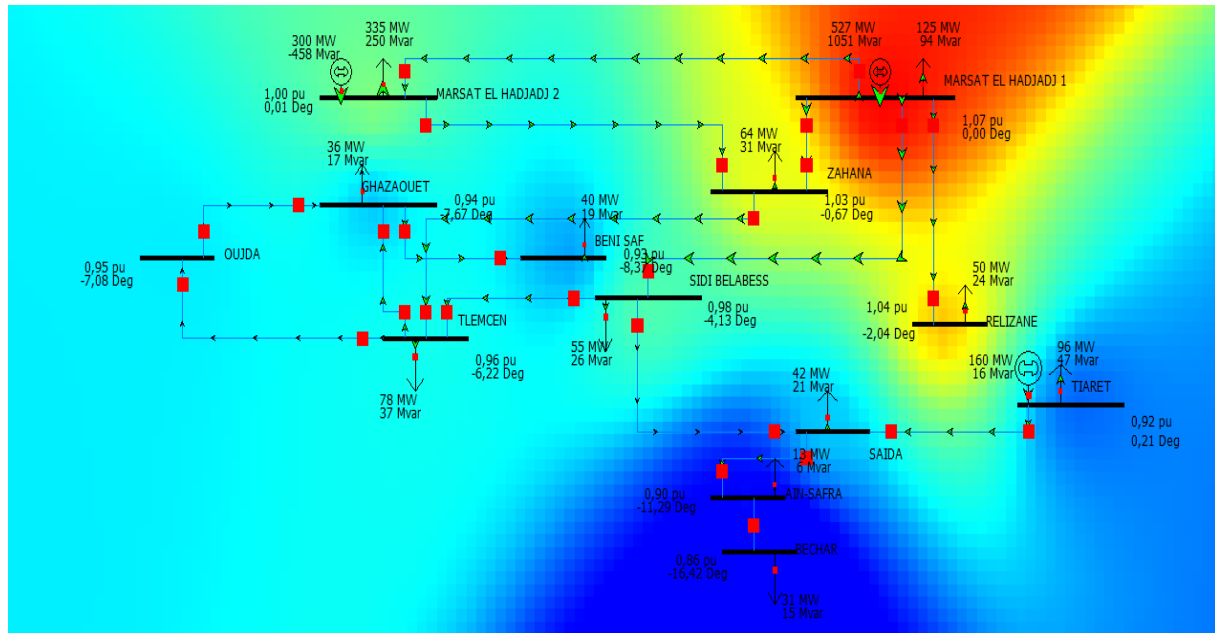
Suite à la l'instabilité de tension rencontré dans l'analyse du réseau étudié, Nous allons appliquer l'une des méthodes de sensibilité choisie selon le problème trouver. Par conséquent l'application utilisée est celle de facteur de sensibilité de tension, cette dernière a pour but d'améliorer les niveaux des tensions et minimiser les pertes réactives.

Nous avons déjà cité au chapitre trois que la méthode du facteur de sensibilité de tension permet de localiser le meilleur emplacement de FACTS plus précisément le dispositif SVC.

Donc la première démarche à suivre est l'application de la méthode de sensibilité pour la location, par la suite, nous allons placer le contrôleur SVC. Cette incorporation va nous permettre d'observer s'il y aurait une amélioration dont l'objective d'assurer la stabilité du réseau étudié.

#### IV.4.1. Placement optimal du dispositif shunt SVC en utilisant la sensibilité de tension :

Nous avons utilisé les options du logiciel POWER WORLD 21, Pour que nous puissions déterminer les régions de violation de tension. Notant que les régions avec couleur bleu foncé indiquant que la tension est inférieure à 0.9 pu (chute de tension).



**Figure (IV.3) :** Niveau de tension sur le réseau Ouest-Algérien avant l'emplacement du SVC.

A partir de la figure (IV.3), Nous remarquons une chute de tension très importante dans la région Ouest (AIN-SAFERA, Bechar). Puisque la tension n'est pas dans les limites admissibles.

➤ **Première étape :** Application de la méthode de facteur de sensibilité de tension

Pour cela, il faut :

- Calculer le facteur de sensibilité de tension pour chaque nœud critique.
- Choisir le nœud le plus sensible dans la région, ce qui déduit que ce dernier nous oriente vers l'emplacement optimal de SVC.

**Tableau (IV.4) :** La tension de nœud critique dans la région Ouest du réseau Algérien.

| Nombre | Nom de régions | La tension en pu |
|--------|----------------|------------------|
| 12     | BECHAR         | 0,85998          |

**Tableau (IV.5) : La sensibilité VQ par rapport à BECHAR**

| Nœud               | VQ          |
|--------------------|-------------|
| MERSA L HADJAJ 1   | 0,00000000  |
| OUJDA              | 0,00000050  |
| GHAZAOUET          | 0,00000043  |
| ZAHANA             | 0 ,00000011 |
| MERSAT EL HADJAJ 2 | 0,00000005  |
| TLEMCEN            | 0,00000060  |
| SIDI BELABES       | 0,00000102  |
| RELIZENE           | 0,00000000  |
| BENI SAF           | 0,00000036  |
| SAIDA              | 0,00000197  |
| TIARET             | 0 ,0000000  |
| BECHAR             | 0,00293205  |
| AIN-SAFERA         | 0,00000414  |

**Tableau (IV.6) : La sensibilité VQ par rapport à AIN-SEFRA.**

| Nœud               | VQ           |
|--------------------|--------------|
| MERSA L HADJAJ 1   | 0,00000000   |
| OUJDA              | -0,00000045  |
| GHAZAOUET          | -0,00000039  |
| ZAHANA             | -0 ,00000010 |
| MERSAT EL HADJAJ 2 | -0,00000004  |
| TLEMCEN            | -0,00000053  |
| SIDI BELABES       | -0,00000091  |
| RELIZENE           | 0,00000000   |
| BENI SAF           | -0,00000032  |
| SAIDA              | -0,00000175  |
| TIARET             | 0 ,0000000   |
| BECHAR             | -0,00260848  |
| AIN-SAFERA         | -0,00000368  |

IV.4.1.1.

#### Interprétation des résultats :

D'après les tableaux (IV.5) et (IV.6), nous remarquons que la tension de nœuds de BECHAR est plus sensible que celle d'AIN-SEFRA. Ce choix à été cible en appliquant la méthode de facteur de sensibilité de tension prennent en déduisons le nœud critique BECHAR de tableau (IV.5), puis le nœud critique au niveau de AIN-SAFERA de tableau (IV.6). Delà nous avons déduis que le nœud de BECHAR est le plus positive en valeur absolu. Pour les deux résultats des tableaux obtenus (IV.5) et (IV.6).

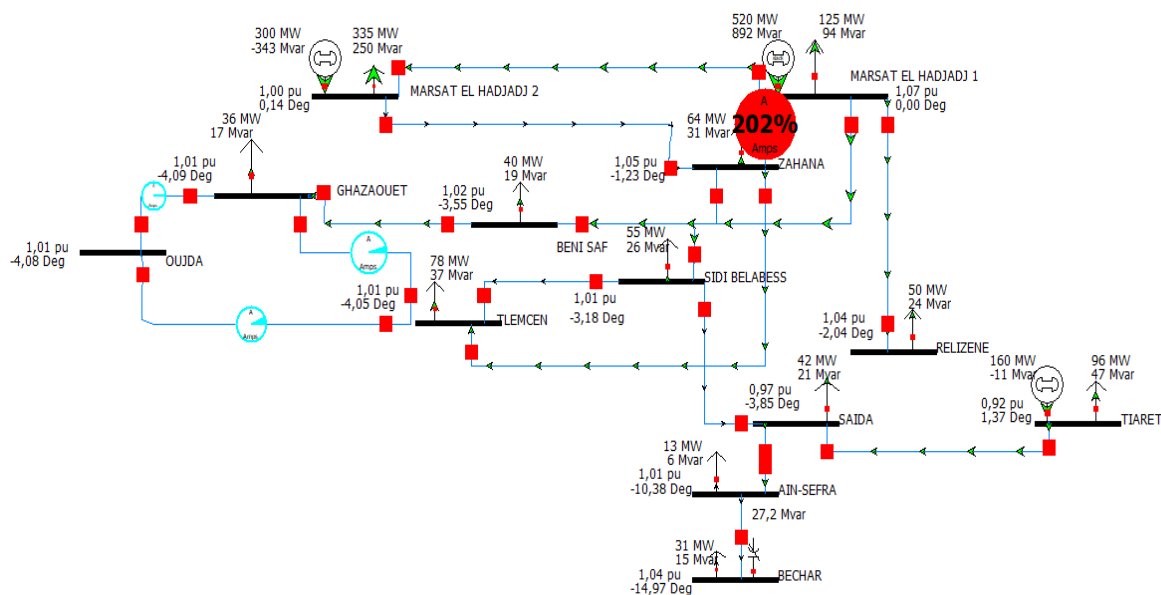
Pour le tableau (IV.5)  $|0,00293205|$  et le tableau (IV.6)  $|-0,00000368|$ .

Sur cela, nous déduisons que le SVC doit se placer au niveau du nœud BECHAR, selon les résultats obtenus en adoptant la méthode de facteur de sensibilité de tension.

➤ **Deuxième étape : Emplacement du SVC au niveau du nœud de BECHAR**

Pour améliorer la chute de tension dans le nœud 12 ,nous avons procédé à plusieurs variations d'injection de puissance réactive au niveau de réglage du dispositif de contrôle SVC.Suite à ce contrôle, nous nous sommes limité à la valeur de 25MVAR .Sachant que cette dernière est la valeur extrême prise et cela pour éviter le problème de surcharge .

**Remarque :** Le rôle de SVC est de donner la bonne estimation des résultats dans notre réseau c'est pour cela nous observons que après la simulation la valeur injectée est ajustée à la valeur 27,2 MVAR dans le nœud 12 . (Voire la Figure)

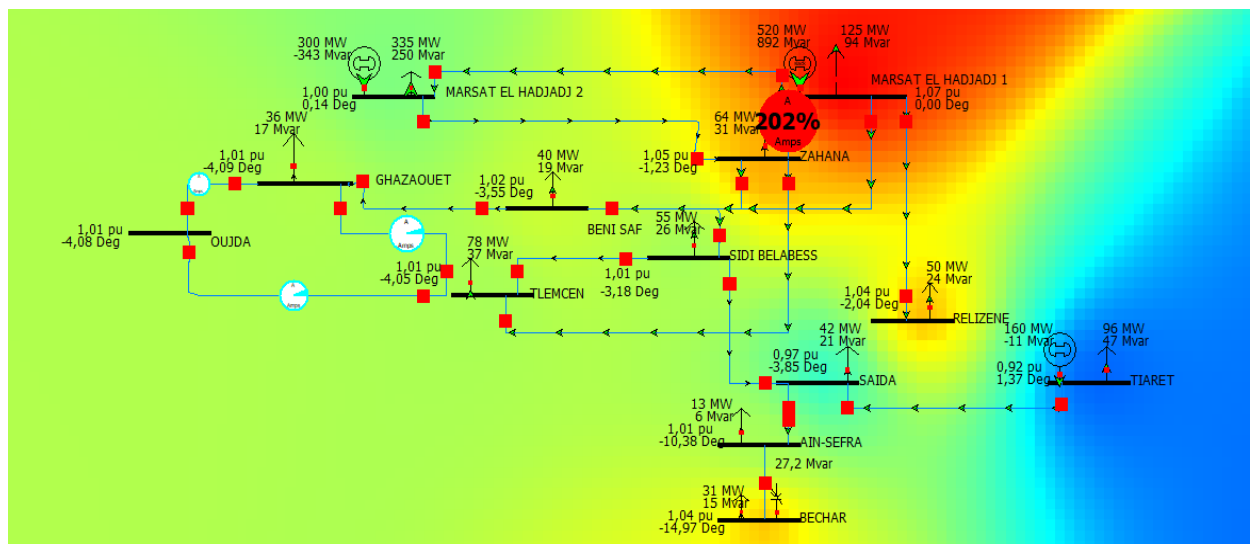


Les résultats sont dressés dans le tableau suivant :

**Tableau (IV.7) :** Les tensions de réseau avec et sans SVC.

| La tension (pu)<br>Nœud | Sans SVC | SVC placé au nœud<br>de BECHAR |
|-------------------------|----------|--------------------------------|
| AIN-SAFERA              | 0,90473  | 1,01734                        |
| BECHAR                  | 0,85998  | 1,04670                        |





**Figure (IV.5) :** Visualisation de niveau de tensions sur le réseau avec emplacement du SVC au nœud de BECHAR.

#### IV.4.2. Calcul de l'écoulement de puissance avec SVC :

**Tableau (IV.8) :** Les tensions nodales avec SVC.

| K  | Nom                 | Tension (pu) | Angle (Deg) |
|----|---------------------|--------------|-------------|
| 1  | MARSAT EL HADJADJ1  | 1,07000      | 0,00        |
| 2  | OUJDA               | 1,01321      | -4.08       |
| 3  | GHAZAOUET           | 1,01397      | -4.09       |
| 4  | ZAHANA              | 1,04862      | -1,23       |
| 5  | MERSAT EL HADJADJ 2 | 1,00000      | 0.14        |
| 6  | TLEMCEN             | 1,01995      | -4.05       |
| 7  | SIDI BELABESS       | 1,00722      | -3,18       |
| 8  | RELIZENE            | 1,04348      | -2,04       |
| 9  | BENI-SAF            | 1,02146      | -3,55       |
| 10 | SAIDA               | 0,97151      | -3,85       |
| 11 | TIARET              | 0,92000      | 1,37        |
| 12 | BECHAR              | 1,04670      | -14.97      |
| 13 | AIN-SEFRA           | 1,01973      | -10,38      |

**Tableau (IV.9) :** Les puissances de transmise et pertes avec emplacement de SVC au niveau de BECHAR.

| Ligne (K-m) | P <sub>k-m</sub> (MW) | Q <sub>k-m</sub> (MVAR) | P <sub>Loss</sub> (MW) | Q <sub>Loss</sub> (MVAR) |
|-------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|
| (1-4)       | 147,5                 | 112,3                   | 1,01                   | -0,85                    |
| (5-1)       | -90,6                 | -198,4                  | 0,78                   | 3,24                     |
| (1-7)       | 101,8                 | 76,8                    | 2,10                   | 4,37                     |

|         |       |       |      |        |
|---------|-------|-------|------|--------|
| (8-1)   | -50,0 | -24,0 | 0,49 | -5,01  |
| (3-2)   | 0,5   | 0,3   | 0,00 | -3,11  |
| (6-2)   | -0,5  | -7,8  | 0,00 | -4,44  |
| (3-6)   | 1,4   | 6,0   | 0,01 | -3,61  |
| (9-3)   | 38,0  | 19,2  | 0,08 | -4,06  |
| (5-4)   | 55,6  | -31,6 | 0,10 | -2,53  |
| (6-4)   | -58,3 | -24,4 | 1,08 | -3,94  |
| (9-4)   | -78,0 | -38,2 | 0,61 | -5,86  |
| (7-6)   | 17,9  | -10,2 | 0,06 | -5,40  |
| (10-7)  | -26,2 | -58,8 | 0,63 | -2,22  |
| (10-11) | -61,8 | 68,0  | 2,21 | 3,40   |
| (10-13) | 46,0  | -30,2 | 1,32 | -9,64  |
| (13-12) | 31,7  | -26,5 | 0,66 | -15,15 |

**Tableau (IV.10) :** Les pertes Totales avec SVC.

| <b>Puissances Totales</b> | <b>P(MW)</b> | <b>Q(MVAR)</b> |
|---------------------------|--------------|----------------|
| Charges                   | 965          | 587            |
| Générateurs               | 976,13       | 506,09         |
| Pertes                    | 11,13        | -54,55         |

#### **IV.4.2.1. Interprétations :**

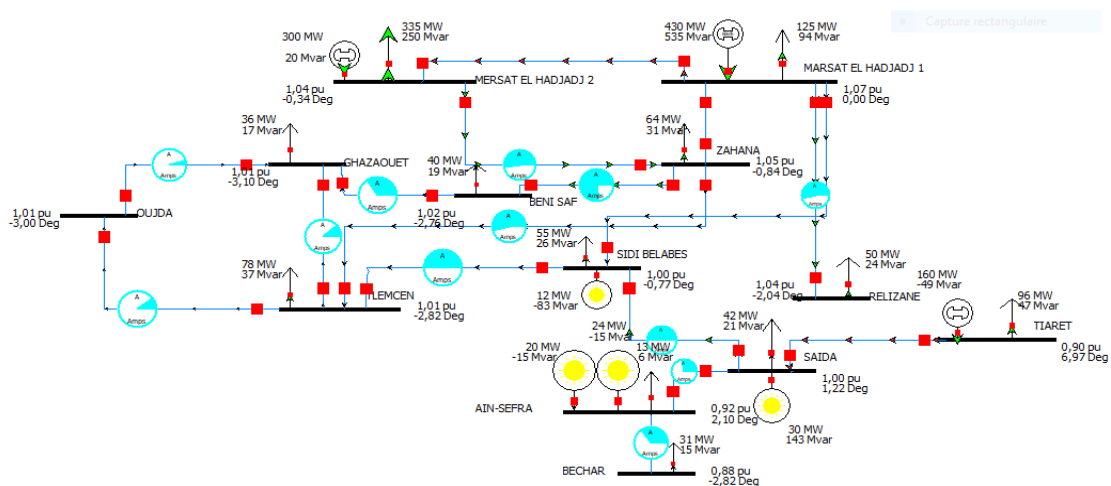
Après l'emplacement optimal de SVC en adoptant la méthode de sensibilité de tension, nous prouvons déduire les points suivants :

- Après avoir installé le SVC sur nœud BECHAR, nous constatons que toutes les tensions sont dans leurs limites appropriées.
- Concernent le transit de puissance, par rapport au premier essai, nous avons obtenu un soulagement de lignes, en citons à titre d'exemple la ligne (1-4) de la valeur 147,8MW à la valeur 147,5 MW concernant la puissance active et de la valeur de 116,3MVAR à la valeur de 112,3 MVAR pour la puissance réactive. Aussi nous avons remarqué qu'il existe une diminution de plusieurs pertes de puissance dans les lignes comme la ligne (1-7) de la valeur 5,59MVAR à la valeur 4,34MVAR.
- Concernent les pertes totales, il a aussi une diminution des pertes de puissance actives totales de la valeur 11,23 MW à la valeur de 11,13 MW.

#### IV.5. Actualisation de réseau Ouest Algérien :

L'Algérie, de par sa situation géographique, bénéficie des conditions favorables à l'utilisation des énergies renouvelables, en particulier l'énergie solaire, l'une des possibilités de l'exploitation de l'énergie solaire est sa transformation directe en une énergie électrique, au moyen des convertisseurs photovoltaïques. Plusieurs projets et programmes solaires ont été initiés et développés notamment par le centre de développement des énergies renouvelables (CDER) tel que le dimensionnement des équipements photovoltaïques, des visites des sites d'implantation, la réalisation et la mise en place des installations photovoltaïques, l'acquisition de matériels et des équipements spécialisés, l'entretien et la maintenance de ces équipements.

D'après l'équipe de SADEG qui nous ont aidé et donné des informations pour notre recherche. Cette information concerne l'intégration des énergies renouvelables dans le côté Ouest Algérien, plus précisément les centrales photovoltaïques situées dans SIDI BEL ABESS, SAIDA et AIN-SAFERA comme le montre la figure suivante.



**Figure (IV.6) :** Intégration des énergies renouvelables dans le réseau Ouest-Algérien.

Après avoir intégré les énergies renouvelables dans notre réseau et puis simulé, nous avons obtenu les résultats présentés dans le tableau ci-dessous.

**Tableau (IV.11) :** Tableau des tensions avec intégration des énergies renouvelables.

| Nœud | Nom               | La tension en (pu) | L'angle (Deg) |
|------|-------------------|--------------------|---------------|
| 1    | MERSA EL HEDJAJ1  | 1,07000            | 0,00          |
| 2    | OUJDA             | 1,01031            | -3,00         |
| 3    | GHAZAOUET         | 1,01128            | -3,10         |
| 4    | ZAHANA            | 1,04816            | -0,84         |
| 5    | MERSAT EL HADJAJ2 | 1,04444            | -0,34         |

|           |               |                |              |
|-----------|---------------|----------------|--------------|
| 6         | TLEMCEN       | 1,00677        | -2,82        |
| 7         | SIDI BELABES  | 1,00000        | -0,77        |
| 8         | RELIZANE      | 1,04348        | -2,04        |
| 9         | BENI SAF      | 1,01959        | -2,76        |
| 10        | SAIDA         | 1,00000        | 1,22         |
| 11        | TIARET        | 1,00000        | 6,97         |
| <b>12</b> | <b>BECHAR</b> | <b>0,87694</b> | <b>-2,82</b> |
| 13        | AIN-SEFRA     | 0,92000        | 2,10         |

- A partir du tableau (IV.11), nous avons remarqué une amélioration de tension au nœud 12 de la valeur 0,85998pu à la valeur 0,87694pu, mais malgré cette amélioration il existe toujours une chute de tension.

#### IV.5.2. Placement de SVC Au réseau Ouest-Algérien :

Puisque la tension n'est pas dans les limites admissibles. Nous allons faire les mêmes démarches appliquées précédemment, celui de l'application de la méthode de sensibilité de tension pour la localisation de l'emplacement du dispositif shunt SVC pour le réseau Ouest Algérien avec intégration des énergies renouvelables.

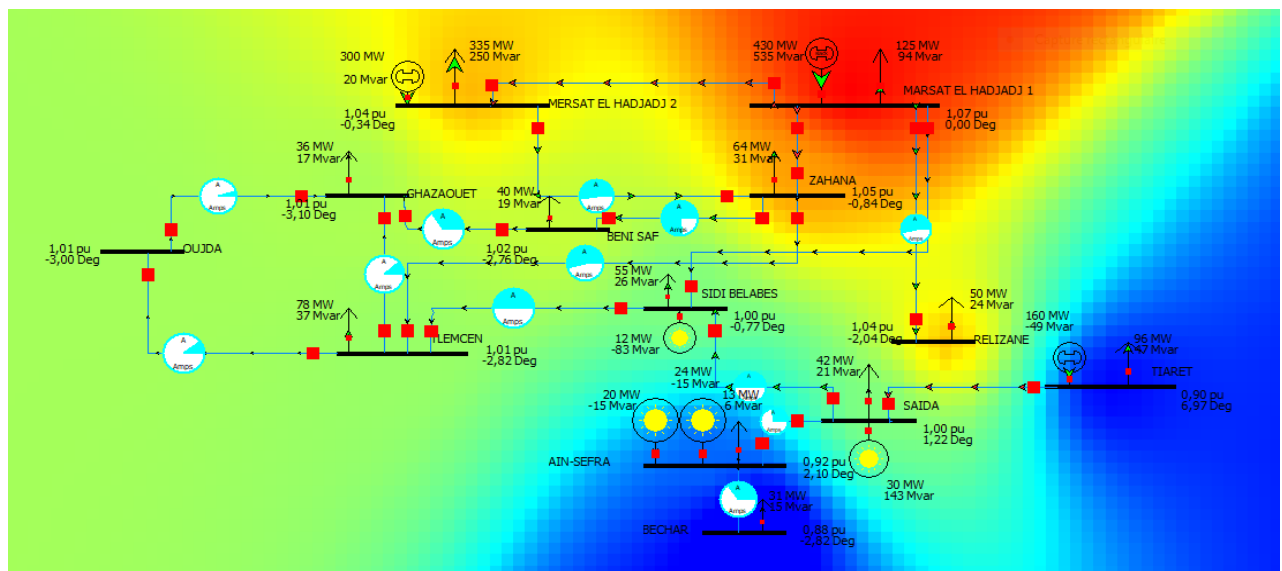


Figure (IV.7) : Niveau de tension sur le réseau avec intégration d' EnR avant l'emplacement

**Tableau (IV.12) :** La tension de nœud critique avec intégration des énergies renouvelables.

| Nombre | Nom de régions | La tension en pu |
|--------|----------------|------------------|
| 12     | BECHAR         | 0,87694          |

**Tableau (IV.13) :** La sensibilité VQ par rapport à BECHAR

| Nœud               | VQ                |
|--------------------|-------------------|
| MERSA L HADJAJ 1   | 0,00000000        |
| OUJDA              | 0,00000000        |
| GHAZAOUET          | 0,00000000        |
| ZAHANA             | 0 ,00000000       |
| MERSAT EL HADJAJ 2 | 0,00000000        |
| TLEMCEN            | 0,00000000        |
| SIDI BELABES       | 0,00000000        |
| RELIZENE           | 0,00000000        |
| BENI SAF           | 0,00000000        |
| SAIDA              | 0,00000000        |
| TIARET             | 0 ,00000000       |
| <b>BECHAR</b>      | <b>0,00193014</b> |
| AIN-SAFERA         | -0,00089600       |

#### **IV.5.2.1. Interprétation des résultats :**

- Suite aux Tableaux (IV.13), après le calcul du facteur QV nous avons remarqué que la tension du nœud Bechar est plus positive. Cette sensibilité est provoquée par l'influence de la puissance réactive injectée dans le nœud BECHAR, pour résoudre ce problème nous utilisons la méthode du facteur de sensibilité de tension qui était déjà cité en détail dans le chapitre III pour but de trouver le meilleur emplacement optimal de SVC.

- Des résultats obtenus nous déduirons que le SVC se place au nœud de BECHAR.

Après avoir placé le SVC, nous injectons une puissance réactive de 20MVAR dans le nœud 12 pour le but de stabiliser la tension et minimiser les pertes que ce soit actif ou réactives dans notre réseau.

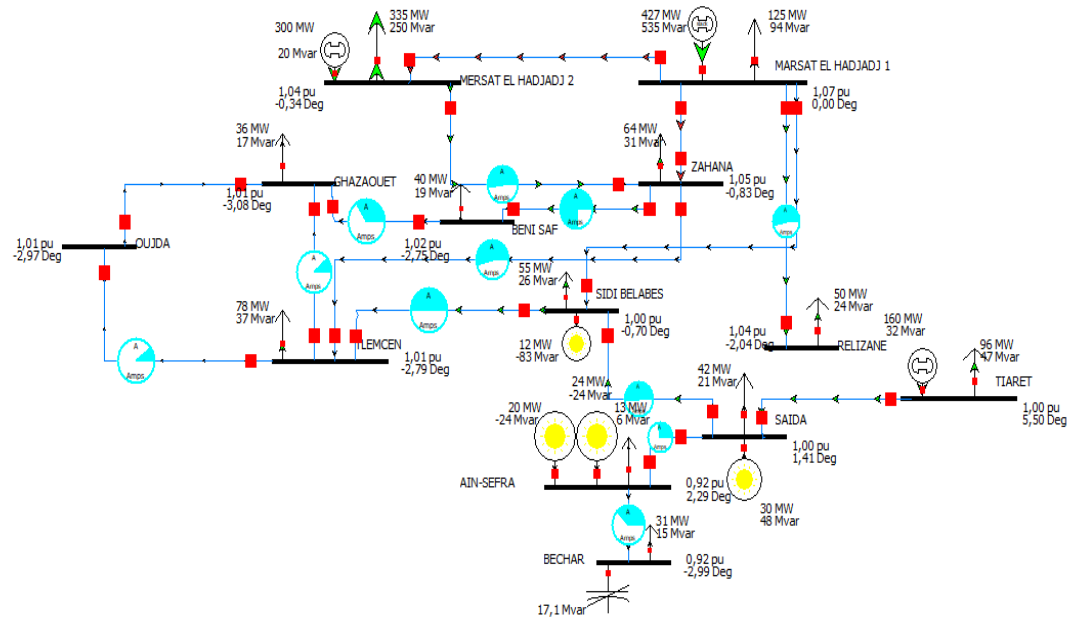


Figure (IV.8) : Placement de SVC dans le réseau Ouest Algérien avec intégration des énergies renouvelables.

Tableau (IV.14) : Les tensions dans le réseau avec et sans SVC.

| La tension PU<br>Nœud | Sans SVC | SVC placé au nœud<br>de BECHAR |
|-----------------------|----------|--------------------------------|
| AIN-SAFERA            | 0,92000  | 0,92000                        |
| BECHAR                | 0,87694  | 0,92411                        |

- Après avoir injecté la puissance réactive de SVC, nous avons remarqué une stabilité de tension (amélioration) au nœud de BACHAR de la valeur de 0,87694pu à la valeur 0,92411pu.

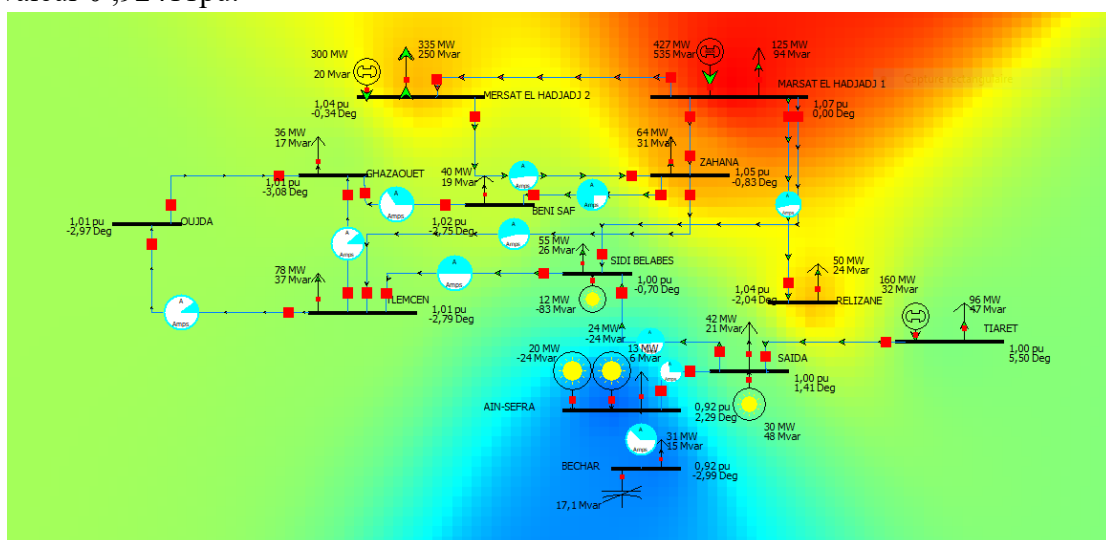


Figure (IV.9) : Les tensions sur le réseau avec SVC avec intégration des énergies renouvelables.

### IV.5.3. Calcul de l'écoulement de puissance avec intégration de l'énergie renouvelable :

**Tableau (IV.15) :** La tension nodale avec intégration des énergies renouvelables et avec l'emplacement de SVC.

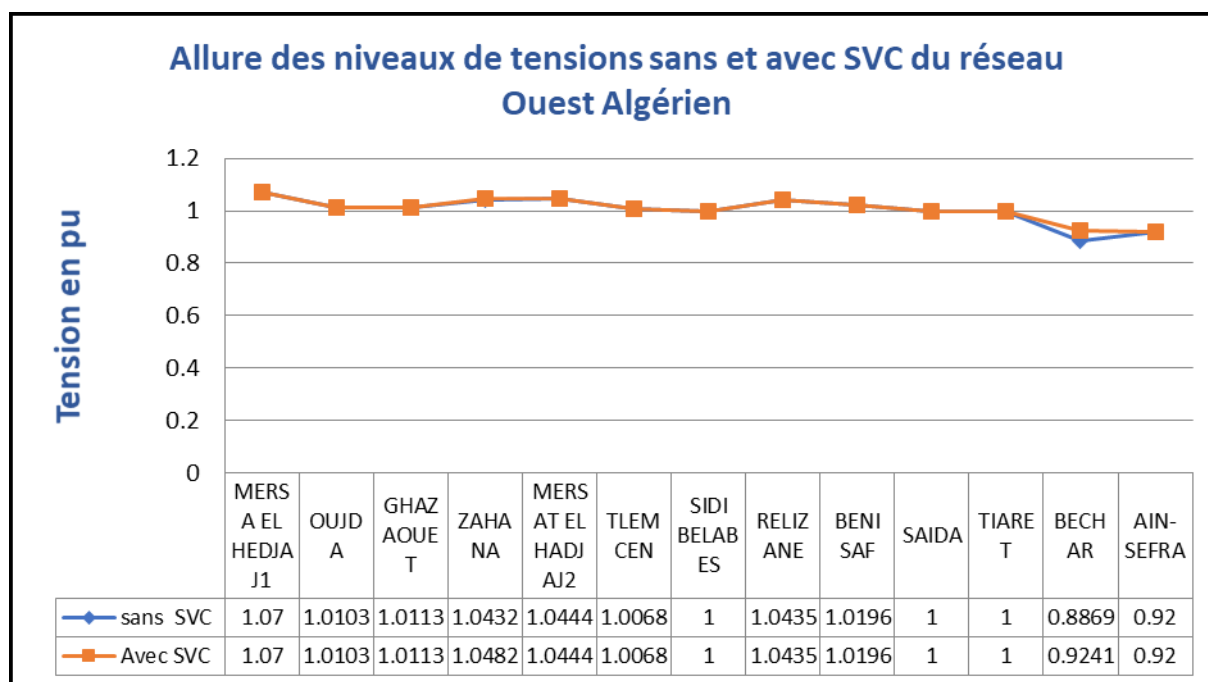
| Nœud | Nom               | La tension en pu | L'angle (Deg) |
|------|-------------------|------------------|---------------|
| 1    | MERSA EL HEDJAJ1  | 1,07000          | 0,00          |
| 2    | OUJDA             | 1,01031          | -2,97         |
| 3    | GHAZAOUET         | 1,01129          | -3,08         |
| 4    | ZAHANA            | 1,04816          | -0.83         |
| 5    | MERSAT EL HADJAJ2 | 1,04444          | -0.34         |
| 6    | TLEMCEN           | 1,00677          | -2,79         |
| 7    | SIDI BELABES      | 1,00000          | -0.70         |
| 8    | RELIZANE          | 1,04348          | -2,04         |
| 9    | BENI SAF          | 1,01959          | -2,75         |
| 10   | SAIDA             | 1,00000          | 1.41          |
| 11   | TIARET            | 1,00000          | 5,50          |
| 12   | BECHAR            | 0,92411          | -2,99         |
| 13   | AIN-SEFRA         | 0,92000          | 2,29          |

**Tableau (IV.16) :** Les puissances de transmise avec intégration des énergies renouvelables avec l'emplacement de SVC.

| Ligne (K-m) | P <sub>k-m</sub> (MW) | Q <sub>k-m</sub> (MVAR) | P <sub>Loss</sub> (MW) | Q <sub>Loss</sub> (MVAR) |
|-------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|
| (1-4)       | 128,8                 | 119,0                   | 0,91                   | -1,07                    |
| (5-1)       | -81,1                 | -201,2                  | 0,77                   | 3,18                     |
| (1-7)       | 40,9                  | 99,0                    | 1,52                   | 1,65                     |
| (8-1)       | -50,0                 | -24,0                   | 0,49                   | -5,01                    |
| (3-2)       | -4,0                  | 1,7                     | 0,00                   | -3,09                    |
| (6-2)       | 4,0                   | -9,2                    | 0,01                   | -4,40                    |
| (3-6)       | -7,1                  | 9,4                     | 0,02                   | -3,53                    |
| (9-3)       | 25,0                  | 23,9                    | 0,05                   | -4,20                    |
| (5-4)       | 46,1                  | -28,8                   | 0,07                   | -2,72                    |
| (6-4)       | -43,6                 | -31,8                   | 0,77                   | -5,02                    |
| (9-4)       | -65,0                 | -42,9                   | 0,48                   | -6,70                    |
| (7-6)       | 45,8                  | -20,8                   | 0,38                   | -3,82                    |
| (10-7)      | 49,8                  | -12,3                   | 0,39                   | -3,53                    |
| (10-11)     | -63                   | 11,7                    | 0,96                   | -3,57                    |
| (10-13)     | 1,2                   | 28,1                    | 0,61                   | -12,36                   |
| (13-12)     | 31,7                  | -14,3                   | 0,62                   | -12,25                   |

**Tableau (IV.17) :** Les pertes totales avec intégration des énergies renouvelables et avec l'emplacement de SVC.

| Puissance des charges Totales | P(MW)  | Q(MVAR) |
|-------------------------------|--------|---------|
| Charges Totales               | 965    | 587     |
| Générateurs Totales           | 973,05 | 503,50  |
| Pertes Totales                | 8,05   | -66,42  |



**Figure (IV.10) :** Graphe de comparaison des allures de tensions avec SVC du réseau Ouest Algérien (avec intégration des énergies renouvelables)

#### IV.5.3.1. Interprétation :

Après intégration des énergies renouvelables et l'emplacement de SVC, nous pouvons déduire les points suivants :

- Du tableau (IV.16) nous avons remarqué qu'après l'application de la méthode sensibilité « le facteur de sensibilité de tension » toutes les tensions sont dans leurs limites.
- D'après la figure (IV.10), nous remarquons clairement l'amélioration du système étudié avec les énergies renouvelables, grâce à l'incorporation judicieux du dispositif shunt SVC localisé à travers l'application de la méthode du facteur de sensibilité de tension.
- Concernant la transmission de puissance, par rapport au premier test, nous avons obtenu une ligne d'atténuation. Citons la ligne (1-4) avec la valeur de 147.5MW à 128,8MW et la ligne (1-7) de valeur 101,8MW à la valeur 40,9MW à titre d'exemple. Nous avons



également remarqué que certaines des pertes de puissance dans les lignes telles que la ligne (1-7) est réduite d'une valeur de 4,37 MVAR à la valeur de 1,65 MVAR et la ligne (1-4) d'une valeur de 1,01MW à la valeur de 0,91 MW.

- Et comme une dernière analyse, nous remarquons clairement le soulagement de la centrale de la valeur de 976,13MW à la valeur de 973,05 MW en puissance active. Ainsi que la diminution des pertes de puissance active totales de la valeur 11,13MW à la valeur 8,05MW.

- Concernant l'augmentation des pertes réactives, nous avons remarqué que cette dernière est provoquée par l'influence de la puissance réactive injectée dans le nœud BECHAR.

## **IV.6. Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons validé une méthode de sensibilités déjà évoqués au chapitre III, qui est le « facteur de sensibilité de tension » adopté pour la localisation de l'emplacement optimal du SVC. Cette méthode a été appliquée sur le réseau national Ouest Algérien (13 nœuds), ce travail a permis de tirer quelques conclusions, qui sont :

- Il est devenu difficile de trouver un emplacement optimal de dispositif FACTS dans les réseaux électriques plus grand, pour cela, le travail nous oblige à diviser le réseau en région pour faciliter l'étude (Area). Vue l'étude faite pour ce chapitre de simulation sur seulement l'Ouest de l'Algérie.
- Dans le cas de l'insertion de SVC, nous avons calculé le facteur QV juste pour les nœuds critiques, puis nous avons choisi le nœud le plus positif, c'est l'endroit optimal de SVC, cela est déduit d'après la méthode. Notons que le nœud le plus faible de tension n'est pas toujours un emplacement optimal de SVC, cela dépend du réseau à étudier.
- Pour remédier aux problèmes de surcharge des lignes rencontré lors du calcul de l'écoulement de puissance de la première partie de simulation ainsi que la valeur évaluée des pertes réactives totales dans la seconde partie de notre simulation, nous proposons l'application d'autres méthodes de sensibilité qui ont une relation avec l'amélioration de transits de puissance des lignes. Or nous avons utilisé les paramètres d'un réseau réel, cela nous conduira à ce procuré des données des limites de charge de chaque ligne. C'est à cause de cette barrière que nous avons limité notre travail.

# *Conclusion Générale*

## ***Conclusion Générale***

Les problèmes actuels d'exploitation et de sécurité du système induits par l'ajustement structurel de l'industrie électrique sont les plus difficiles. La récente déréglementation du marché de l'électricité a conduit à un grand nombre de transports. Auparavant, il était implicite que le système énergétique était surchargé. À l'heure actuelle, l'accès est ouvert dans l'environnement libéralisé, et les entités du marché peuvent produire et consommer de l'énergie en grandes quantités, et l'exploitation surchargée des lignes de transmission provoque une congestion.

La proposition du sujet de ce mémoire s'inscrit dans ce domaine de recherche. Nous proposons une solution appropriée pour optimiser la transmission de puissance et minimiser les pertes ; contrôler la tension en combinant les méthodes de sensibilité des dispositifs FACTS (comme le SVC), pour réduire la congestion du réseau électrique.

Afin d'atteindre cet objectif, nous sommes passé par les étapes suivantes :

Dans la première étape nous avons présenté en bref un rappel sur les réseaux électriques : définition, composants (production, transport, distribution), la modélisation de chaque composant des réseaux et l'actualité des réseaux électriques (les énergies renouvelables).

La deuxième étape de notre travail a été consacrée à la description des différents systèmes permettant d'assurer le transport d'énergie électrique dans les meilleures conditions et qui sont rangés sous l'appellation « Système FACTS ». Les dispositifs FACTS peuvent être classés en trois catégories : les compensateurs parallèles, série et hybride. De plus nous avons cité brièvement leurs fonctionnements et leurs applications.

Dans la troisième étape, nous avons clarifié la méthode de sensibilité qui permet de prévenir les problèmes qui peuvent être rencontrés dans les réseaux électriques. Ces méthodes ont pour rôle de nous orienter à trouver des solutions pour garantir la qualité de l'énergie livrée au consommateur. Diverses nouvelles approches sont proposées et mises en œuvre qui fournira des commentaires sur leur contribution à l'amélioration de l'efficacité et des fiabilités. La méthode utilisée est « Le facteur de sensibilité de tension ».

Dans la dernière étape nous avons lancé la simulation par logiciel power world du réseau Ouest Algérien modifié, pour but de voir l'efficacité de la méthode de sensibilité sur ce réseau. Cette dernière appelé « facteur de sensibilité de tension » sert à localiser le meilleur emplacement optimal de dispositif FACTS shunt (SVC) sur les lignes les plus sensibles par une puissance réactive injectée.

Grace à la méthode citée nous avons pu optimiser le transit de puissance, minimisé les pertes et améliorer la tension d'où le soulagement de congestion dans notre système.

Cette approche a été réalisée avec une grande efficacité pour un objectif crucial « Amélioration des performances d'un réseau réel par l'application de l'approche de sensibilité »

Il reste encore beaucoup de voies à explorer mais il semble prioritaire de poursuivre une étude plus approfondie dans ce domaine de recherche sur les méthodes de sensibilités. Nous pouvons proposer la continuation pour le reste des méthodes de sensibilités.

# *Références Bibliographiques*

## *Références Bibliographiques*

- [1] **Kh. Sakouni , T. Okbaoui** < Localisation des défauts dans les réseaux d'énergie électrique à base des relais à distance > Master RE 2017-2018 université ADRAR.
- [2] **L. Sari, Ch. Diabi** < étude d'un réseau de transport d'énergie à haute tension 90KV > Master RE 2017, université Badji Mokhtar Annaba.
- [3] **T.Nabeche, F.Tezkratt** <Restructuration du réseau électrique de la région de fréha pour alimentation du pôle d'excellence de Tamda> Master génie électrique 2014, université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou.
- [4] **M.Chouabbi et M.Djebabla** < L'étude de la stabilité transitoire des réseaux Est Algérienne avec L'extension du poste Berrahal 400 KV > Master LMD, RESE, 2017, Université Badji Mokhtar Annaba.
- [5] **L.Hadadi et KH. Hami** < Calcul des paramètres et caractéristique des lignes électriques triphasé > Master en génie électrique ,2014-2015, Université Bejaia.
- [6] **S. Lemdani** < Importance et nécessité de l'étude de la compensation et de sa contribution à la gestion de l'exploitation des longues lignes du transport a extra HT >, Magister 2010, université ST Mohamed Boudiaf.
- [7] **Noémie Galland-Beaune** < Les énergies renouvelable dans L'UE >, Publier le 6.11.2020.
- [8] **Laurent Bridier**, < Modélisation et optimisation d'un système de stockage couplé à une production électrique renouvelable intermittente >, Thèse pour obtenir le grade de Docteur, spécialité énergétique, université de la REUNION, France.29 juin 2016.
- [9] **Marie-Cécile Alvarez-Hérault**, < Architectures des réseaux de distribution du futur en présence de production décentralisée >, pour obtenir le grade de Docteur de l'institut polytechnique de Grenoble, Spécialité : Génie Électrique. Le 10 décembre 2009.
- [10] **H. Abdellatif** < Modélisation et simulation d'un dispositif STATCOM en temps réel un réseau d'énergie électrique >, mémoire de magister, Université d'Oran 2013 -2014.
- [11] <https://www.techno-science.net/definition/3159.html> .
- [12] **S. DAIBOUN**,< Renforcement de la stabilité transitoire par l'utilisation des FACTS> Mémoire de Magistère, Département d'électrotechnique Université de Skikda 2005.
- [13] **JC Sabonnadière, N Hadjaïd** < Lignes et réseaux électriques >, Lavoisier 11 rue Lavoisier 7500 Paris 2008.

- [14] **Farid Hamoudi** < Commande Robuste d'un filtre Actif Shunt à Quatre file >, mémoire de magister, université de Batna 2008.
- [15] **B. Mahdad** <Contribution to the improvement of power quality using multi hybrid model-based Wind-Shunt FACTS >, 10PthP IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering, Italy, 2011.
- [16] **K. Belacheheb** < Contribution à l'étude des systèmes de compensation FACTS en général, UPFC en particulier, pour le contrôle du transit de puissance dans un réseau de transport >, Thèse de doctorat de l'université de Henri Poincaré Nancy I, 21 Juin 2001.
- [17] **A.kerbaa** <Etude de l'influence des systèmes FACTS sur la qualité de l'énergie électrique > Thèse de master RE, Université de Biskra 2013.
- [18] **R.Benabid** < Optimisation Multi-Objectif de la synthèse des FACTS par les particules en Essaim pour le contrôle de la stabilité de tension des réseaux électriques > thèse de magister, Université de jijel, 04/09/2007.
- [19] **H. Bouanab** < Amélioration du transit de puissance d'un réseau électrique par l'utilisation des systèmes FACTS > thèse de master RE, Université de Oum El Bouaghi. 2014.
- [20] **E.S.Hoji, A. Padilha-Feltrin**, < Sensitivity Analysis for Overload- Relief in Transmission Lines Using An Implicitly Coupled Method (CRIC) > ,Conference Transmission and Distribution Conference and Exposition, University Latin America, 2006 .
- [21] [https://www.powerworld.com/WebHelp/Content/MainDocumentation\\_HTML/Line\\_Outage\\_Distribution\\_Factors\\_LODFs.htm](https://www.powerworld.com/WebHelp/Content/MainDocumentation_HTML/Line_Outage_Distribution_Factors_LODFs.htm) .
- [22] **Santiago Grijalva , Peter W. Sauer** < Transmission Loading Relief (TLR) and Hour-Ahead ATC > Department of Electrical and Computer Engineering University of Illinois at Urbana-Champaign 1406 W. Green St. Urbana, IL .
- [23] **A.Djelouli, S.Ouzene**, < Etude de la sécurité Préventive des Réseaux Electrique en présence des dispositifs FACTS >, mémoire de master , spécialité Système énergétique Univ- Dr Moulay Tahar , de saida , 2016.
- [24] **Ravi Kumar, S.C.Gupta , Bassem Estimate** <Power Transfer Distribution Factor Estimate using DC Load flow Method> Volume 2 pp 2278-8948 january 2013 Vu le (07-07-2021) .
- [25] **F. Lakdja**, <Répartition Optimale des Puissances (OPF) par dispositifs FACTS Application dans un réseau d'énergie électrique.>, Diplôme de Doctorat en Sciences, Université Djilali Liabes de Sidi Bel Abbés. Décembre 2009.



- [26] **T.D Sudhakar** , <Sensitivity Factor Based Optimal Location of SVC on Transmission Network > journal of Electrical Engineering, Vol.12, pp 4915- 4923, July 2014. Vu le (04/07/2021).

# *Annexe*

## **Annexe**

### **1. Annexe A 01 : La méthode de Newton–Raphson appliqué aux équations de l'écoulement de puissance (NLF) :**

D'après la forme générale d'équations de puissance au J.d.B :

$$\left. \begin{aligned} P_i &= \sum_{j=1}^n |y_{ij}| \cdot |V_i| \cdot |V_j| \cos(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) = F_{ip} \\ Q_i &= -\sum_{j=1}^n |y_{ij}| \cdot |V_i| \cdot |V_j| \sin(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) = F_{iq} \end{aligned} \right\} i = 1, 2, \dots, n \quad (A-01)$$

Où

$i=1$  : J.d.B de référence

$n$ : Nombre de J.d.B

$i$ : Numéro de J.d.B

Après développement de  $F_{ip}$  et  $F_{iq}$  en série de TAYLOR autour de la première approximation

$$\left. \begin{aligned} P_i &= F_{ip}^{(0)} + \left( \frac{\partial F_{ip}}{\partial \delta_2} \right)^{(0)} \Delta \delta_2^{(0)} + \dots + \left( \frac{\partial F_{ip}}{\partial \delta_n} \right)^{(0)} \Delta \delta_n^{(0)} + \left( \frac{\partial F_{ip}}{\partial |V_2|} \right)^{(0)} \Delta V_2^{(0)} \\ Q_i &= F_{iq}^{(0)} + \left( \frac{\partial F_{iq}}{\partial \delta_2} \right)^{(0)} \Delta \delta_2^{(0)} + \dots + \left( \frac{\partial F_{iq}}{\partial \delta_n} \right)^{(0)} \Delta \delta_n^{(0)} + \left( \frac{\partial F_{iq}}{\partial |V_2|} \right)^{(0)} \Delta V_2^{(0)} \end{aligned} \right\} \quad (A-02)$$

Avec  $F_{ip}^0$  et  $F_{iq}^0$  sont des fonctions de tension et de phase :

A partir de la relation de  $\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}$

$$\left. \begin{aligned} \text{Avec} \quad \Delta P_i^{(0)} &= P_i - F_{ip}^{(0)} \\ \Delta Q_i^{(0)} &= Q_i - F_{iq}^{(0)} \end{aligned} \right\} \quad (A-03)$$

Les deux systèmes d'équation (A-02) et (A-03) donnent :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(0)} \\ \Delta P_n^{(0)} \\ \Delta Q_2^{(0)} \\ \Delta Q_n^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_{2p}}{\partial \delta_2} & \dots & \dots & \frac{\partial F_{2p}}{\partial \delta_n} \frac{\partial F_{2p}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial F_{np}}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial F_{np}}{\partial \delta_2} & \dots & \dots & \frac{\partial F_{np}}{\partial \delta_n} \frac{\partial F_{np}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial F_{np}}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial F_{2q}}{\partial \delta_2} & \dots & \dots & \frac{\partial F_{2q}}{\partial \delta_n} \frac{\partial F_{2q}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial F_{2q}}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial F_{nq}}{\partial \delta_2} & \dots & \dots & \frac{\partial F_{nq}}{\partial \delta_n} \frac{\partial F_{nq}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial F_{nq}}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(0)} \\ \Delta \delta_n^{(0)} \\ \Delta V_2^{(0)} \\ \Delta V_n^{(0)} \end{bmatrix} \quad (A-04)$$

Donc on peut écrire le système comme suit :

$$\begin{bmatrix} \Delta P^{(0)} \\ \Delta Q^{(0)} \end{bmatrix} = [J^{(0)}] \begin{bmatrix} \Delta \delta^{(0)} \\ \Delta V^{(0)} \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \Delta \delta^{(0)} \\ \Delta V^{(0)} \end{bmatrix} = [J^{(0)}]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P^{(0)} \\ \Delta Q^{(0)} \end{bmatrix} \quad (A-05)$$

On rappelle que :

$$\Delta \delta_i^{(K)} = \delta_i^{(K+1)} - \delta_i^{(K)} \quad (A-06)$$

$$i \neq 1(ref), i \neq 2(cont) \quad (A-07)$$

$$\Delta V_i^{(K)} = V_i^{(K+1)} - V_i^{(K)} \quad (A-08)$$

L'adaptation de (A-05) avec (A-08) donne :

$$\begin{bmatrix} \delta_i^{(K+1)} \\ |V|^{(K+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta^{(K)} \\ |V|^{(K)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \delta_i^{(K+1)} \\ |V|^{(K+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta^{(K)} \\ |V|^{(K)} \end{bmatrix} + [J^{(K)}]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P^{(K)} \\ \Delta Q^{(K)} \end{bmatrix} \quad (A-09)$$

D'une manière générale

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (A-10)$$

$$J = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \quad (A-11)$$

$J_1, J_2, J_3, J_4$  Sont les sous matrice de Jacobienne.

## Détermination des sous matrices de la Jacobienne J

A partir du système d'équations (A-01) on peut déterminer les éléments de J

**Sous matrice J1:**

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} &= -|V_i||V_j||y_{ij}| \sin(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}), i \neq j \\ \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} &= \sum_{j=1, i \neq j}^n |V_i||V_j||y_{ij}| \sin(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}), i = j \end{aligned} \right\} \quad (A-12)$$

**Sous matrice J2:**

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial P_i}{\partial |V|_i} &= |V_j||y_{ij}| \cos(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}), i \neq j \\ \frac{\partial P_i}{\partial |V|_i} &= 2|V_i||y_{ij}| \cos(\gamma_{ij}) + \sum_{j=1, i \neq j}^n |V_j||y_{ij}| \cos(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}), i = j \end{aligned} \right\} \quad (A-13)$$

**Sous matrice J3:**

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} &= |V_i||V_j||y_{ij}| \cos(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}), i \neq j \\ \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} &= \sum_{j=1, i \neq j}^n |V_i||V_j||y_{ij}| \cos(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}), i = j \end{aligned} \right\} \quad (A-14)$$

**Sous matrice J4:**

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial Q_i}{\partial |V|_i} &= -|V_j||y_{ij}| \sin(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}), i \neq j \\ \frac{\partial Q_i}{\partial |V|_i} &= -\sum_{j=1, i \neq j}^n |V_j||y_{ij}| \sin(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) - 2|V_i||y_{ij}| \sin(\gamma_{ij}), i = j \end{aligned} \right\} \quad (A-15)$$

## Les étapes de calcul

1. A partir des données du système, on prend la matrice d'admittance *bus* Y.
2. On estime les valeurs initiales  $|V_i|^0$  et  $\delta_i^0$  pour les J.d.B de charge et  $\delta_i^0$  pour les J.d.B de contrôle.
3. On calcule P, Q qui nous donne  $\Delta P, \Delta Q$ .

4. Formation de la matrice Jacobienne  $J$ .

5. On trouve l'inverse de Jacobienne.

6. On calcule

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta|V| \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}$$

On obtient :

$$\delta_i^{(1)} = \Delta\delta_i^{(0)} + \delta_i^{(0)}$$

$$|V|_i^{(1)} = \Delta|V|_i^{(0)} + |V|_i^{(0)}$$

7. le processus se répète jusqu'à ce que la tolérance suivante se vérifie.

$$\max(\Delta P, \Delta Q) \leq \varepsilon$$

8. On prend les résultats obtenus.