

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique  
Filière : Electrotechnique  
Option : Réseaux Electrique

Réf:.....

Mémoire de Fin d'Etudes  
En vue de l'obtention du diplôme:

**MASTER**

**Thème**

*Réduction des pertes dans les  
réseaux électriques par la  
compensation série TCSC*

*Présenté par :*

• *Noui Issam*

*Proposé et dirigé par*

*Dr : Mahdad Belkacem*

*Promotion : Juin 2012*

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique  
Filière : Electrotechnique  
Option : Réseaux Electriques

Mémoire de Fin d'Etudes  
En vue de l'obtention du diplôme:

**MASTER**

*Thème*

*Réduction des pertes dans les réseaux  
électriques par la compensation série TCSC*

Présenté par :

*NOUI Issam*

Avis favorable de l'encadreur :

Dr : *MAHDAD Belkacem* ....

Avis favorable du Président du Jury

.....

.....

Cachet et signature

## Résumé

*Dans ce mémoire, on va étudier et analyser la modélisation et l'intégration des dispositifs de compensation dynamiques série TCSC dans les réseaux électriques pour un objectif principal le réglage flexible de la tension ainsi que une réduction des pertes totale dans les réseaux électriques. Le model série (TCSC), utilisé comme un régulateur de la puissance active transitée ont été intégré dans la méthode de newton, l'algorithme a convergé avec un nombre minimal d'itération.*

*Afin de prouver l'importance et les avantages d'intégrer ce dispositif dans les réseaux électriques, et de valider nos résultats obtenus par programmation sur des réseaux test (6JB ,14JB). On peut conclure que l'intégration de ce dispositif dans réseaux électrique nécessite des modèles efficaces par une application des modèles prédéfinie dans le logiciel PSAT.*

### الخلاصة :

هذه المذكرة تعرض نموذج وطرق إدماج مثلى لأنظمة خطوط النقل المتقاربة المطواعة (FACTS) لمراقبة سيران القدرة و التقليل من ضياعات الطاقة ورفع التوتر الكهربائي والحصول على كلفة إنتاج طاقة أقل. واعتمدنا على خوارزمية نيوتن رافسون (RN) التقليدية لحل مشكلة سيران القدرة. وسنتطرق لدراسة نموذج نظام التحكم في السعة الخطية (TCSC). وكذلك قمنا بمحاكاة بعض أنظمة خطوط النقل المتقاربة المطواعة بواسطة برنامج (PSAT) وذلك لإبراز الأهمية التقنية لهذه المعدات الجديدة ضمن أنظمة الشبكات الكهربائية. إضافة إلى ذلك قمنا بإجراء عدد من المحاكات على شبكات اختبار كهربائية مختلفة (Network Test- IEEE) وذلك لاختبار الطرق المعتمدة في هذا البحث وقد توصلنا إلى أن هذه الأنظمة لديها تأثيرات على سيران القدرة في الشبكات الكهربائية حسب نوعها و طريقة إدماجها،

## REMERCIEMENTS

*Tout d'abord on remercie le bon dieu puissant de la bonne santé, la volonté et de la patience qu'il nous a donnée tout au long de notre étude.*

*Nous remercions Très sincèrement Dr Mahdad Belkacem notre promoteur de ce travail, pour ses conseils pertinents, et ses orientations judicieuses sa patience et diligence, et par ses suggestions à grandement facilité ce travail.*

*Je remercie également Mr. Mancer Nabil, pour ses aidés, et sa disponibilité lors des différentes sollicitations.*

*Nous tenons à exprimer notre gratitude aux membres de jury qui ont bien voulu examiner ce travail.*

*Notre profonde gratitude à tous les enseignants du département d'électrotechnique, qui ont encouragé à donner le meilleur d'eux même en nous assurant une formation aussi meilleur que possible.*

*Un remerciement spécial aux étudiants de la 2<sup>ème</sup> Master Réseaux électriques.*

*Nous remercions vivement toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.*

# **Dédicace**

***Je dédie ce modeste travail :***

*A ceux qui sont les plus chers du monde, Mon père, ma mère, et ma fiancée à qui je n'arriverai jamais à exprimer ma gratitude et ma reconnaissance, pour ses amours ses soutiens tout au long de mes études.*

***A mes chères frères Nour El islam et Fouez***

***A mes sœurs***

***A toute ma famille***

***Atout mes amies :***

*Houssam, Abdelkader, Issam , Redouane, Salah, Kamel, Samir, Yassine , Hichem, Mbarek, Doudou, Nacer et Farouk*

***A toute la promotion 2012.***

***NOUI ISSAM***

## Listes des figures

---

### Liste des figures

N°:	Titre
I.1	schéma simplifié d'un réseau radial
I.2	schéma simplifié d'un réseau bouclé
I.3	schéma simplifié d'un réseau maillé
I.4	Diagramme traduisant l'échange d'énergie et montrant l'intérêt de la compensation.
I.5	Composition vectorielle des différents courants, et l'effet de la compensation
I.6	Principe de la compensation série
I.7	Compensation Shunt
I.8	Compensation Série
II.1	classification des dispositifs FACTS
II.2	L'influence de différents systèmes FACTS sur la puissance active, puissance réactive et réglage de tension
II.3	Schéma du TCR
II.4	Schéma du TSC
II.5	Schéma du SVC
II.6	Caractéristique d'un SVC
II.7	Schéma du SVC et TCBR.
II.8	Schéma de base d'un STATCOM
II.9	Présentation d'un compensateur STATCOM
II.10	Diagramme vectoriel de STATCOM
II.11	Caractéristique statique du STATCOM
II.12	Structure d'un TCSC
II.13	Structure d'un TCSR
II.14	Caractéristique statique du SSSC
II.15	schéma de base d'un UPFC
III.1	Structure d'un TCSC
III.2	Structure d'un TCSR
III.3	Insertion d'un TCSC sur une ligne
III.4	Impédance du TCSC en fonction de l'angle
III.5	modèle mathématique de TCSC
III.6	TCSC situé dans la ligne de transmission
III.7	remplacement $V_s$ par $I_s$
III.8	injection la puissance $S_{ks}$ et $S_{ms}$ au TCSC
IV.1	interface graphique de PSAT
IV.2	schéma synoptique de PSAT
IV.3	Étapes de simulation
IV.4	Réseau test IEEE 6 bus
IV.5	Profile de tension aux niveaux des jeux de barres.
IV.6	Répartitions des pertes actives dans les branches :Réseau IEEE-6bus
IV.7	Répartitions des pertes réactives dans les branches : Réseau IEEE-6bus

## Listes des figures

---

IV.8	Installation d'un TCSC au niveau de la branche6 (Jb2-4)
IV.9	Variation des pertes totales en fonction du degré de compensation
IV.10	La tension de chaque jeu barre avec augmentation de la charge
IV.11	Les pertes actives avec augmentation de la charge de 10% : sans compensation
IV.12	Les pertes réactives avec augmentation de la charge de 10% sans compensation
IV.13	Profile de tension : après la compensation
IV.14	Les pertes réactives après la compensation
IV.15	Comparaison des pertes totales en fonction du degré de compensation: compensation des branches 5 et 6.
IV.16	réseau test IEEE 14 bus
IV.17	: Profile de tension: Réseau test : IEEE 14-Bus
IV.18	Les pertes actives
IV.19	Les pertes réactives dans les branches.
IV.20	Schéma Unifilaire Réseau test IEEE 14-bus avec TCSC
IV.21	Variation des pertes actives en fonction du degré de compensation.
IV.22	Les pertes actives de de degré de compensation 50%
IV.23	Les pertes réactives de de degré de compensation 50%
IV.24	les tensions de chaque jeu de barre après la compensation
IV.25	les pertes actives après la compensation
IV.26	Les pertes réactives dans les branches après la compensation

## Liste des tableaux

---

<b>N° :</b>	<b>Titre</b>
<b>IV.1</b>	Données des jeux de barres
<b>IV.2</b>	Caractéristiques techniques des branches
<b>IV.3</b>	Résultats de l'écoulement de puissance : tension et angle.
<b>IV.4</b>	Résultats de l'écoulement de puissance : puissances transitées et les pertes dans les branches.
<b>IV.5</b>	Résultats de l'écoulement de puissance : les pertes totales
<b>IV.6</b>	Variation des pertes en fonction du degré de compensation.
<b>IV.7</b>	Pertes totales : Emplacement du TCSC a la branche 5 (Jb6-5)
<b>IV.8</b>	Résultats de l'écoulement de puissance avec augmentation de la charge
<b>IV.9</b>	Résultats de l'écoulement de puissance : puissances transitées dans les lignes avec augmentation de la charge 10% :
<b>IV.10</b>	Les pertes totales
<b>IV.11</b>	Résultats de l'écoulement de puissance avec augmentation de la charge de 10% après la compensation da la ligne 6 de degré de compensation 50%.
<b>IV.12</b>	Puissances transités dans les lignes
<b>IV.13</b>	Variation des pertes totales en fonction du degré de compensation: Compensation de la branche 5 (jb6-5)
<b>IV.14</b>	Les données du jeu de barre de référence
<b>IV.15</b>	les données du jeu de barre PV
<b>IV.16</b>	les données du jeu de barre PQ
<b>IV.17</b>	Les données des branches
<b>IV.18</b>	Les données des transformateurs
<b>IV.19</b>	Résultats de l'écoulement de puissance : Régime normal (sans compensation série).
<b>IV.20</b>	Puissances transités dans les lignes.
<b>IV.21</b>	Les pertes totales
<b>IV.22</b>	Variation des pertes totales en fonction du degré de compensation
<b>IV.23</b>	Les pertes avant et après la compensation : degré de 50% Les pertes avant et après la compensation : degré de 50%
<b>IV.24</b>	Résultats de l'EP avec augmentation de la charge de 20%.
<b>IV.25</b>	Résultats de l'EP des lignes avec augmentation de la charge de 20%
<b>IV.26</b>	Les pertes totales
<b>IV.27</b>	Les résultats de l'EP avec augmentation de la charge (20%) : degré de compensation 50%.
<b>IV.28</b>	Les résultats de l'EP avec augmentation de la charge (20%) : degré de compensation 50%.
<b>IV.29</b>	Les pertes totales : après compensation : (50%)



## *Liste d'abréviations*

---

<b>Abréviation</b>	<b>Description</b>
<b>EPRI</b>	Electric power research institute
<b>FACTS</b>	Flexible AlternatingCurrent Transmission Systems
<b>TCR</b>	ThyristorControlledReactor
<b>TSC</b>	Thyristor SwitchedCapacitor
<b>SVC</b>	Static Var Compensator
<b>TCBR</b>	Thyristor Control BreakingResistor
<b>STATCOM</b>	Static synchronous compensator
<b><i>TCSC</i></b>	<b><i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i></b>
<b>SSSC</b>	<b>Static Synchronous Series Compensator</b>
<b>UPFC</b>	Unified Power Flow Controller

---

<i>Dédicace</i> .....	<i>i</i>
<i>Remerciement</i> .....	<i>ii</i>
<i>Liste des symboles et abréviations</i> .....	<i>iii</i>
<i>Liste des figures</i> .....	<i>iii</i>
<i>Liste des tableaux</i> .....	<i>iiii</i>
<i>Introduction générale</i>	



**Chapitre I : Généralité  
sur la compensation**

## **I .Introduction**

<b>I-1.Structure topologique des réseaux</b> .....	<b>1</b>
<b>I-1-1. Réseaux radiaux</b> .....	<b>1</b>
<b>I-1-2. Réseaux bouclés</b> .....	<b>1</b>
<b>I-1-3. Réseaux maillés</b> .....	<b>2</b>
<b>I-2. Les différentes fonctions du réseau</b> .....	<b>3</b>
<b>I-2-1. Réseau d'utilisation</b> .....	<b>3</b>
<b>I-2-2. Réseaux de distribution</b> .....	<b>3</b>
<b>I-2-3. Réseaux de répartition</b> .....	<b>3</b>
<b>I-2-4. Réseaux de transport et d'interconnexions</b> .....	<b>3</b>
<b>I-3.L'importance de La puissance réactive</b> .....	<b>4</b>
<b>I-3-1. Principe général de la compensation</b> .....	<b>4</b>
<b>I-3-2. Les moyens de compensation</b> .....	<b>6</b>
<b>I-3-2-1. Condensateurs et inductances fixes</b> .....	<b>7</b>
<b>I-3-2-2. Groupes de production et compensateurs synchrones</b> .....	<b>8</b>
<b>I-3-2-3. Transformateurs avec prises réglables en charge</b> .....	<b>8</b>
<b>I-3-2-4. Compensateurs classiques</b> .....	<b>9</b>

## Sommaire

---

<b>I-4. Déférente type de compensation.....</b>	<b>9</b>
<b>I -4-1. Compensation Shunt.....</b>	<b>9</b>
<b>I -4-2. Compensation Série.....</b>	<b>10</b>
<b>I-5. Les avantages des compensateurs classiques.....</b>	<b>10</b>
<b>I-6. Les inconvénients compensateurs classiques.....</b>	<b>11</b>
<b>I-7. Conclusion.....</b>	<b>11</b>



### Chapitre II: Les dispositifs FACTS

#### II. Introduction

<b>II-1. Définition des FACTS.....</b>	<b>12</b>
<b>II -2.Classification des systèmes FACTS.....</b>	<b>12</b>
<b>II-3. Dispositif de compensation dynamique shunt.....</b>	<b>15</b>
<b>II-3-1. Compensateur parallèle à base de GTO thyristors.....</b>	<b>15</b>
<b>II-3-2. Compensateur parallèle à base de GTO thyristors STATCOM.....</b>	<b>18</b>
<b>II-3-2-1. Principe de fonctionnement.....</b>	<b>20</b>
<b>II-4. Dispositif de compensation dynamique série.....</b>	<b>21</b>
<b>II-4-1. Compensateurs séries à base de thyristors TCSC.....</b>	<b>21</b>
<b>II-4-2. Compensateurs hybrides à base de GTO thyristors SSSC.....</b>	<b>22</b>
<b>II-5. Dispositif de compensation dynamique hybride.....</b>	<b>24</b>
<b>II-5-1.Compensateurs hybrides à base de GTO thyristors UPFC.....</b>	<b>24</b>
<b>II-6.Conclusion.....</b>	<b>25</b>



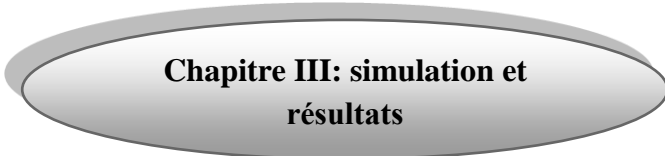
### Chapitre III: modélisation et intégration du TCSC dans

**Partie un :**

<b>III. Introduction</b>	
<b>III-1.Modélisation du système électrique.....</b>	<b>26</b>
<b>III-2Classification des variables et des contraintes d'un système.....</b>	<b>28</b>
<b>III-2-1.Classification des variables.....</b>	<b>28</b>
<b>III-2-2.Classification des contraintes.....</b>	<b>29</b>
<b>III-2-2-1. Contraintes sur les variables dépendantes.....</b>	<b>29</b>
<b>III-2-2-2. Contraintes sur les variables indépendantes.....</b>	<b>30</b>
<b>III -3.Algorithmes de résolution du problème de la répartition des charges.....</b>	<b>31</b>
<b>III -3-1.Méthode de Gauss-Seidel.....</b>	<b>31</b>
<b>III -3-2.Méthode de Newton-Raphson.....</b>	<b>32</b>

**Partie deux**

<b>III-4. Introduction</b>	
<b>III-5. Dispositifs de compensation dynamique série.....</b>	<b>35</b>
<b>III-5-1.Compensateurs séries à base de thyristors.....</b>	<b>35</b>
<b>III-5-1-1.Définition d'un TCSC.....</b>	<b>36</b>
<b>III-5-1-2.Principe de fonctionnement d'un TCSC.....</b>	<b>37</b>
<b>III-5-1-3Modélisation de TCSC.....</b>	<b>38</b>
<b>III-5-1-4.Le modèle d'injection.....</b>	<b>39</b>



**Chapitre III: simulation et  
résultats**

<b>IV. Introduction.....</b>	<b>43</b>
<b>IV.1. Analyse des réseaux électriques par le logiciel (PSAT).....</b>	<b>43</b>

## *Sommaire*

---

<b>IV.3.Simulation.....</b>	<b>44</b>
<b>IV.4.Réseau test 1: IEEE 6-Bus.....</b>	<b>45</b>
<b>IV.4.1. Régime normal (sans compensation).....</b>	<b>45</b>
<b>IV.4.2.1.Régime normal (avec compensation : ligne 6).....</b>	<b>50</b>
<b>IV.4.2.2.Cas normal (avec compensation de la ligne 5).....</b>	<b>51</b>
<b>IV.4.2.3.Cas anormal (avec augmentation de la charge de 10% sans compensation).....</b>	<b>52</b>
<b>IV.4.2.4.Cas anormal (avec augmentation de la charge de 10% avec compensation)....</b>	<b>55</b>
<b>IV.5. réseau test IEEE 14 bus.....</b>	<b>58</b>
<b>IV.5.1. Cas normal sans compensation.....</b>	<b>58</b>
<b>IV.5.2. Cas normal avec compensation au jeu de barre 1-5.....</b>	<b>62</b>
<b>IV.5.3. Cas anormal avec augmentation de la charge de 20% sans compensation.....</b>	<b>66</b>
<b>IV.5.4. Cas anormal avec augmentation de la charge de 20% avec compensation.....</b>	<b>67</b>
<b>Conclusion.....</b>	<b>69</b>

# *Introduction générale*

---

## *Introduction générale*

L'industrialisation et la croissance de la population sont les premiers facteurs pour lesquels la consommation de l'énergie électrique augmente régulièrement. Ainsi, pour avoir un équilibre entre la production et la consommation, il est à première vue nécessaire d'augmenter le nombre de centrales électriques, de lignes, de transformateurs etc., ce qui implique une augmentation de coût et une dégradation du milieu naturel en conséquence, il est aujourd'hui important d'avoir des réseaux maillés et de travailler proche des limites de stabilité afin de satisfaire ces nouvelles exigences.

Durant les dernières années, l'industrie de l'énergie électrique est confrontée à des problèmes liés à de nouvelles contraintes qui touchent différents aspects de la production, du transport et de la distribution de l'énergie électrique. On peut citer entre autres les restrictions sur la construction de nouvelles lignes de transport, l'optimisation du transit dans les systèmes actuels, la Cogénération de l'énergie, les interconnexions avec d'autres compagnies d'électricité et le respect de l'environnement .

Dans ce contexte, il est intéressant pour le gestionnaire du réseau de disposer des moyens permettant de contrôler les puissances réactives, les tensions et les transits de puissance dans les lignes afin que le réseau de transport existant puisse être exploité de la manière la plus efficace et la plus sûre possible.

Jusqu'à la fin des années 1980, les seuls moyens permettant de remplir ces fonctions étaient des dispositifs électromécaniques, à savoir les transformateurs avec régleur en charge, les bobines d'inductance et les condensateurs commutés par disjoncteurs pour le maintien de la tension et la gestion du réactif. Toutefois, des problèmes d'usure ainsi que leur relative lenteur ne permet pas d'actionner ces dispositifs plus de quelques fois par jour; ils sont par conséquent difficilement utilisables pour un contrôle continu des flux de puissance. Une autre technique de réglage et de contrôle des puissances réactives, des tensions et des transits de puissance utilisant l'électronique de puissance a fait ses preuves.

La solution de ces problèmes passe par l'amélioration du contrôle des systèmes électriques déjà en place. Il est nécessaire de doter ces systèmes d'une certaine flexibilité leur permettant de mieux s'adapter aux nouvelles exigences.

## *Introduction générale*

---

Les éléments proposés qui permettent ce contrôle amélioré des systèmes sont les dispositifs FACTS « *Flexible Alternating Current Transmission System* ». Les dispositifs FACTS font en général appel à de l'électronique de puissance, des microprocesseurs, de l'automatique, des télécommunications et des logiciels pour parvenir à contrôler les systèmes de puissance. Ce sont des éléments de réponse rapide. Ils donnent en principe un contrôle plus souple de l'écoulement de puissance. Ils donnent aussi la possibilité de charger les lignes de transit à des valeurs près de leur limite thermique, et augmentent la capacité de transférer de la puissance d'une région à une autre. Ils limitent aussi les effets des défauts et des défaillances de l'équipement, et stabilisent le comportement du réseau [3,4].

Le sujet de ce mémoire concerne, en particulier, le contrôle des puissances transitées dans les lignes de transport d'énergie électrique au moyen de dispositifs TCSC. Pour atteindre cet objectif, ce mémoire est organisé en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous décrivons d'une façon générale la structure topologie des réseaux électriques ainsi que l'importance de l'énergie réactive puis les différentes techniques et les moyens de compensation.

La deuxième chapitre donne une présentation générale du concept FACTS. On dresse tout d'abord les techniques de compensation de puissance réactive classiques. Une classification des différents types de FACTS est proposée et les principaux dispositifs de chaque famille sont décrits de façon plus détaillée.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude de la répartition des charges, où différentes méthodes ont été exposées et nous avons opté pour la méthode de Newton-Raphson (*NR*), puis la compensation série et comment intégrer le modèle de TCSC à l'équation de l'écoulement de puissance.

Le quatrième chapitre est consacré à l'installation et l'intégration du modèle série (TCSC) existant dans la bibliothèque du logiciel PSAT afin d'améliorer la qualité d'énergie en terme de réduction des pertes actives totales.

Finalement, et pour conclure nous terminons notre travail par une conclusion générale.

# Généralité sur la compensation

---

## I. Introduction

L'électricité est la forme d'énergie la plus facile à utiliser, mais exige des techniques et des investissements très importants pour la faire aboutir jusqu'à l'utilisateur. Cela exige l'installation de divers réseaux qui doivent assurer la canalisation de cette énergie depuis la centrale jusqu'au plus simple utilisateur.

Les postes constituent les nœuds du réseau; les lignes en forment les branches ; ces branches constituent soit des artères est des antennes (ou dérivation) ; soit des mailles (ou boucles).

### I-1. Structure topologique des réseaux :

Les réseaux doivent assurer le transit de l'énergie électrique avec une sécurité suffisante, cette sécurité d'alimentation est augmentée soit :

- Par les lignes aux appareillages plus solides.
- Par des circuits plus nombreux.

Alors il y'a donc un compromis à réaliser entre le coût des investissements supplémentaires et la valeur de ce qu'ils permettent de sauver ce qui conduit à des topologies de réseaux différents. Radia bouclé et maillé [1]

#### I-1-1. Réseaux radiaux :

Un réseau radial issu d'un poste d'alimentation est constitué de plusieurs artères dont chacune va en se ramifiant, cette structure nous permet d'avoir des points communs, de sorte que le réseau soit bouclable mais non bouclé. Car en un point est placé toujours un appareil de coupure, ouvert en régime normal. Cette disposition permet en cas d'incidents sur une artère de reprendre l'alimentation.

Les réseaux radiaux sont des structures simples et peuvent être contrôlés et protégés par un appareillage simple. Ce sont les réseaux les moins onéreux.

1 : source

2 : poste MT/HT

3 : poste MT/BT

4 : consommateurs

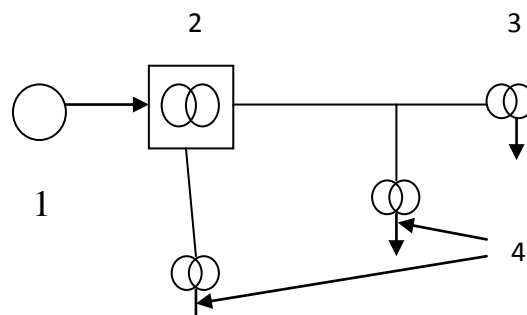


Figure (I.1) : schéma simplifié d'un réseau radial



# Généralité sur la compensation

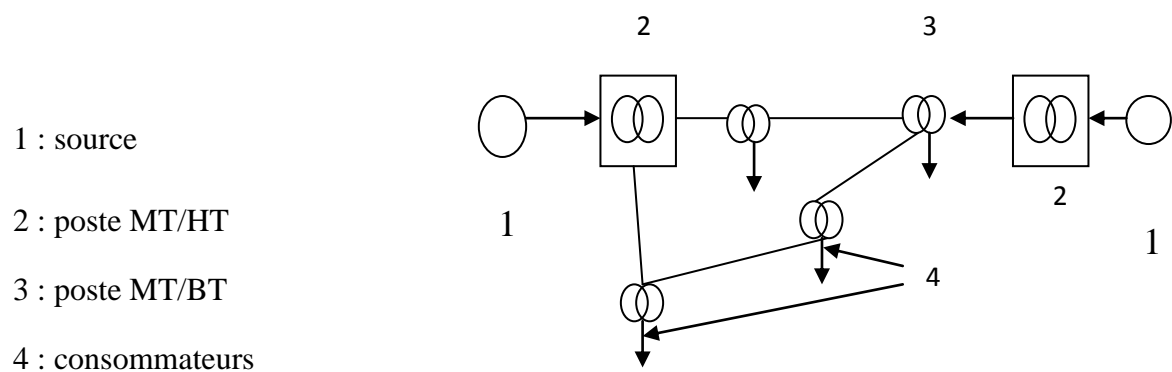
## I -1-2. Réseaux bouclés :

Les réseaux bouclés sont alimentés à la fois par plusieurs sources ; les postes sont raccordés en coupure d'artère cette disposition permet lors d'une coupure, une continuité de service.

L'existence de plusieurs sources en parallèle augmente la sécurité d'alimentation en cas d'avarie de l'une d'elles (transformateurs) ou en cas d'avarie sur une boucle.

Dans ce dernier cas, le tronçon avarié est isolé en deux fractions du réseau. On voit que ce réseau est un peu plus compliqué que le précédent, de plus le contrôle et la protection du réseau nécessitent des dispositifs plus complexes.

Cette structure coûte chère car elle nécessite au moins deux cellules de départ en plus.



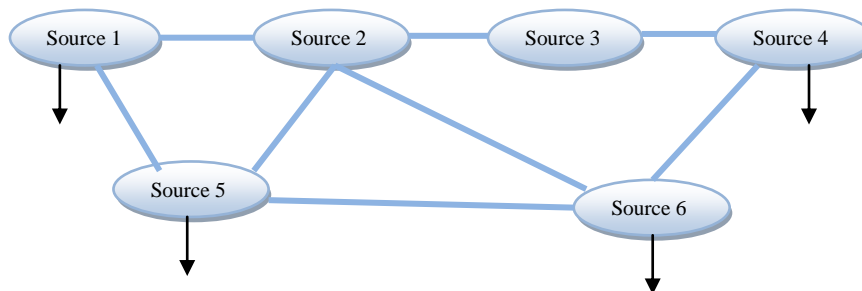
**Figure (I.2) :** schéma simplifié d'un réseau bouclé

## I -1-3. Réseaux maillés :

Ce sont des réseaux où toutes les lignes sont bouclées formant ainsi une structure analogue aux mailles d'un filet, de plus, le nombre de sources débitant en parallèle peut atteindre plusieurs dizaines.

Cette structure nécessite que tous les tronçons de ligne soient capables de supporter des surcharges permanentes et qu'il soit muni à leurs deux extrémités d'appareils de coupure les isolants en cas d'avarie.

On obtient ainsi une meilleure sécurité, mais à un prix plus chers



**Figure (I.3) :** schéma simplifié d'un réseau maillé

### **I -2. Les différentes fonctions du réseau :**

#### **I -2-1. Réseau d'utilisation :**

Ces sont les réseaux de basse tension (BT) qui alimentent les foyers, l'éclairage, les moteurs, les appareils domestiques et doivent présenter une sécurité totale.

#### **I -2-2. Réseaux de distribution :**

Ce sont les réseaux de moyenne tension (MT) qui fournissent aux réseaux d'utilisation les puissances nécessaires demandées. Ils doivent observer des distances limitées de voisinage, c'est pour cela que ces réseaux se réalisent en souterrain dans les villes.

#### **I -2-3. Réseaux de répartition :**

Ce sont les réseaux HT/MT, ils fournissent les puissances nécessaires aux réseaux de distribution reliés entre eux, ils facilitent le secours mutuel entre régions.

#### **I -2-4. Réseaux de transport et d'interconnexions :**

Ils assurent l'alimentation de l'ensemble du territoire national grâce à des transits de puissances importantes.

### **I-3.L'importance de La puissance réactive :**

Le transport de la puissance réactive à longue distance présente une série d'inconvénients tels-que les chutes de tension considérables, les pertes de ligne par effet joule et moins de capacité pour transporter la puissance active.

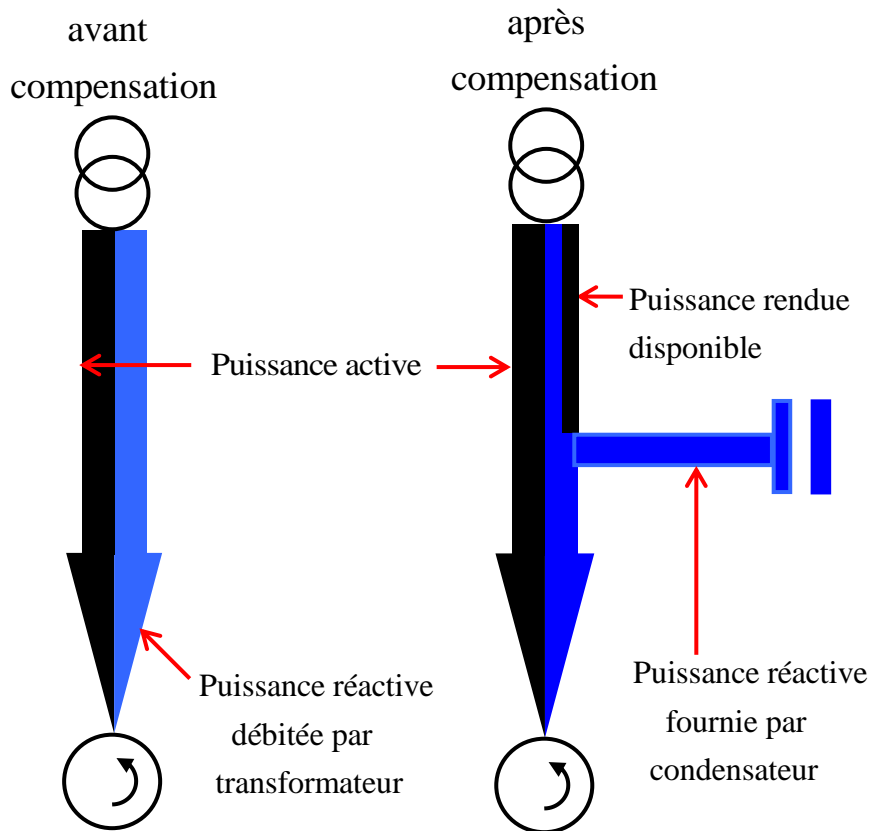
A l'exception de ces aspects purement statiques, la puissance réactive peut jouer un grand rôle dans d'autres aspects dynamiques, tels-que les fluctuations de tension produites par les variations soudaines des charges, le phénomène *flicker* [5], et une meilleure marge pour la stabilité.

Actuellement, avec la complexité des réseaux, la participation des générateurs dans la production de l'énergie réactive est devenue insuffisante. Elle est générée en grande partie par les moyens de compensation existants ou en période creuse, par les lignes de transport.

Afin de garantir une bonne qualité d'énergie il est nécessaire de satisfaire l'équilibre offre-demande de l'énergie réactive, de fournir une tension aussi régulière que possible et de respecter un certain nombre de contraintes techniques.

#### **I -3-1. Principe général de la compensation:**

Le principe de compensation avec des condensateurs peut être représenté par les deux figures ci-après. La figure(I.4) illustre l'échange local d'énergie réactive entre le récepteur et le condensateur. Le courant total fourni par le réseau  $I_{t_2}$  est réduit, le rendement de l'installation se trouve donc amélioré puisque les pertes par effet Joule sont proportionnelles au carré du courant [2].



**Figure (I.4):** Diagramme traduisant l'échange d'énergie et montrant l'intérêt de la compensation.

La figure ci-dessous présente la composition vectorielle des différents courants et pour un courant actif donné, la réduction du courant total dans les conducteurs.

$I_a$  = courant actif consommé

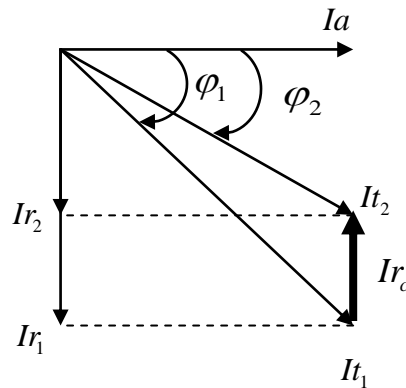
$I_{t_1}$  = courant total avant compensation

$I_{r_1}$  = courant réactif fourni au travers du transformateur avant compensation

$I_{t_2}$  = courant total après compensation

$I_{r_c}$  = courant réactif fourni par le condensateur

$I_{r_2}$  = courant réactif fourni par le transformateur après compensation ( $I_{r_2} = I_{r_1} - I_{r_c}$ ).



**Figure (I.5) :** Composition vectorielle des différents courants, et l'effet de la compensation

## I -3-2. Les moyens de compensation :

En général, les moyens de compensation et de réglage à mettre en œuvre doivent faire face aux fluctuations périodiques liées à l'évolution journalière des transits de puissance mais aussi aux variations brusques liées aux incidents sur le réseau.

Les dispositifs de compensation de l'énergie réactive et de réglage de la tension sont:

- ✓ des condensateurs et inductances fixes ;
- ✓ des compensateurs synchrones ;
- ✓ des compensateurs statiques (SVC) ;
- ✓ des transformateurs à prises variables (en charge ou à vide) ;
- ✓ les groupes générateurs.

L'ajustement rapide et fin de l'énergie réactive en HT et le réglage de tension sont assurés par les groupes générateurs (boucles de réglage de tension) et les condensateurs des postes de transformation vers le réseau de répartition [2] [1].

En distribution, la compensation du réactif se fait au niveau des consommateurs par la tarification qui pénalise un mauvais  $\cos\varphi$ , l'ajustement de la tension se réalisant par les prises en charge des transformateurs au niveau des postes [2].

## I -3-2-1. Condensateurs et inductances fixes

Les bancs de condensateurs installés en dérivation peuvent atteindre quelques Mvar fractionnables par gradins de 2 à 4 Mvar, voire 10 Mvar. Ils sont utilisés pour améliorer le facteur de puissance au niveau de charges inductives. Parmi leurs inconvénients :

- la puissance réactive produite diminue lorsque la tension diminue ( $Q = \omega CV^2$ ) alors qu'elle devrait augmenter ;
- surtensions et surintensités à l'enclenchement.

Les batteries de condensateurs sont fractionnées en gradins mis en ou hors tension par disjoncteurs ou actuellement par thyristors (ce qui supprime toute usure du matériel et accroît la vitesse de réponse), commandés par relais varométrique qui mesure l'erreur entre valeur de consigne et puissance fournie.

Des bancs de condensateurs peuvent être insérés en série avec les conducteurs d'une ligne afin de diminuer sa réactance. On diminue aussi la chute de tension entre la source et la charge comme indiquée sur la figure (I.6). On voit que ce type de compensation diminue l'angle de transport  $\theta$  et agit donc aussi sur le transit de puissance active et augmente la limite de puissance transmissible et la stabilité du réseau [2] [1].

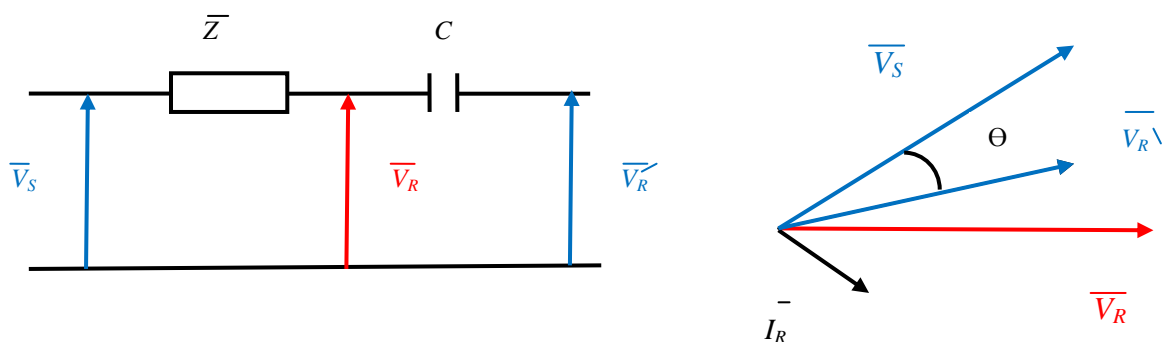


Figure (I.6): Principe de la compensation série

## Généralité sur la compensation

---

Les inductances sont utilisées pour absorber la puissance réactive produite par des lignes longues à très haute tension à faible charge ou des réseaux de câbles. Elles sont généralement raccordées au tertiaire de transformateurs et leur puissance peut aller de 50 Mvar (via un transformateur à trois enroulements) à 400 Mvar en raccordement direct sur des lignes de très haute tension [2].

### **I -3-2-2. Groupes de production et compensateurs synchrones**

Les groupes de production sont les sources de tension du réseau et peuvent produire ou Consommer de l'énergie réactive : une machine synchrone surexcitée fournit de l'énergie réactive comme un condensateur. En sous-excitation, elle absorbe du réactif comme une inductance. Vu l'éloignement électrique entre centres de production et de consommation, les groupes ne compensent pas les charges mais peuvent faire face aux besoins en réactif du réseau.

La fourniture de puissance réactive en surexcitation est limitée par le courant rotorique maximum et en absorption par la stabilité de la machine synchrone. Cette limite peut varier avec des régulateurs de tension.

Un compensateur synchrone était une machine synchrone sans charge, spécifiquement conçue pour la production ou l'absorption de puissance réactive en ajustant l'excitation. Les limites sont les mêmes que pour les groupes de centrales. Des valeurs typiques vont de 20 à 60 Mvar en fourniture et de 10 à 30 Mvar en absorption. Ils sont branchés le plus souvent au tertiaire d'un transformateur. Le grand avantage par rapport aux condensateurs ou inductances passives est leur grande flexibilité sous toutes conditions de charge (réglage continu), par contre leur coût est élevé tant en investissement qu'en maintenance [2].

### **I -3-2-3. Transformateurs avec prises réglables en charge**

Un régleur en charge modifie le rapport de transformation à l'intérieur d'une plage déterminée en augmentant ou diminuant le nombre de spires de l'enroulement haute tension.

Il faut prendre garde de ne pas interrompre le courant ni mettre des spires en court-circuit lors de la commutation. Cela est réalisé par l'insertion temporaire d'une inductance ou d'une résistance. La plage de réglage est typiquement de  $\pm 15\%$  avec

## Généralité sur la compensation

---

une vingtaine de prises (échelon entre 1 et 2 %). Par rapport au réglage nominal, un changement de prises correspond à une injection d'une tension additionnelle au point d'insertion du transformateur, ce qui implique une modification de la répartition de la puissance réactive dans la zone concernée [2].

### I -3-2-4. Compensateurs classiques

L'électronique de puissance a permis, outre des liaisons à courant continu, l'introduction de compensateurs purement statiques, constitués de capacités et d'inductances commandés par des thyristors montés en tête-bêche. On aura ainsi par la mise en parallèle d'une inductance réglable par thyristors (TCR : Thyristor Controlled Reactor) et de batteries de condensateurs commutables également par thyristors, un réglage continu de l'inductance par modification de l'angle d'allumage des thyristors. C'est le principe du compensateur statique (SVC : Static Var Condenser) [2].

### I -4. Différents types de compensation

#### I -4-1. Compensation Shunt

Les condensateurs de puissance sont les plus souvent installés en dérivation sur le réseau. C'est ce que l'on nomme " la compensation Shunt.

Pratiquement, ils sont connectés aux bornes du réseau suivant un couplage étoile ou triangle. Les condensateurs fournissent à la pulsation  $\omega$  une puissance  $Q_C$ , la dimension du condensateur est liée à sa puissance. .

Les condensateurs Shunt sont utilisés soit en basse tension souvent auprès des appareils d'utilisation les plus puissants, soit en moyenne tension où ils sont regroupés en batteries de quelques MVAR.

En moyenne tension, les batteries sont installées par l'intermédiaire d'un disjoncteur sur le jeu de barres moyennes tensions des postes HT / MT. Ces batteries compensent les charges réactives locales et une partie des pertes réactives sur les réseaux en amont [1].



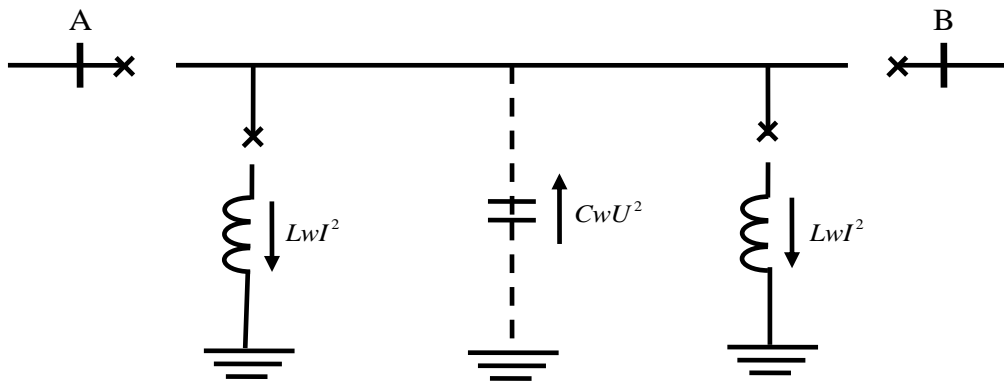


Figure (I.7): Compensation Shunt

## I -4-2. Compensation Série

Les condensateurs sont placés en séries sur une ligne dont ils compensent la réactance.

La compensation série est employée sur certaines lignes à haute tension à la fois très longues et très chargées. Elle est justifiée par des considérations telles que la stabilité. Ce type de compensation est assez exceptionnel.

Mentionnons que les principaux problèmes résident dans la protection contre les surintensités qui traversent les batteries lorsqu'un court-circuit se produit sur la ligne où elles sont installées.

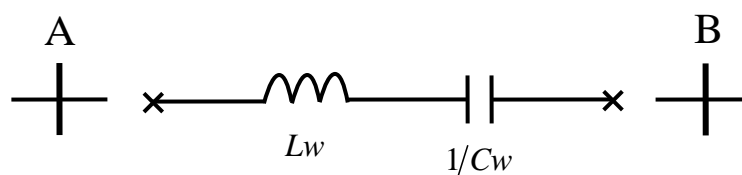


Figure (I.8) : Compensation Série

## I -5. Les avantages compensateurs classiques

- ✓ L'absence d'usure mécanique et un entretien réduit.
- ✓ De faibles pertes.
- ✓ Un faible volume et une installation facile.

## Généralité sur la compensation

---

- ✓ Peuvent être fractionnés suivant les besoins.
- ✓ Soit leur prix est moins élevé que les compensateurs rotatifs, qu'elle que soit la puissance.

### I -6. Les inconvénients compensateurs classiques

- ✓ La puissance réactive fournie n'est pas réglable simplement.
- ✓ La puissance réactive fournie varie avec la tension d'alimentation.
- ✓ La mise sous tension provoque un violent appel de courant.
- ✓ Si la fréquence de résonance avec l'inductance de la source est proche de celle d'un harmonique existant, cet harmonique est amplifié et peut devenir gênant ou dangereux.
- ✓ L'inconvénient le plus important c'est le régime transitoire après l'enclenchement et déclenchement parce que :

L'enclenchement d'une batterie de condensateurs destinée à fonctionner en dérivation sur un réseau est accompagné d'un régime transitoire résultant de la charge de la batterie.

### Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre un aperçu général sur la compensation conventionnelle des réseaux électrique on commençant par une petite introduction, On a vu brièvement la structure topologie des réseaux et leur fonction.

Puis ont intéressé à l'importance de l'énergie réactive et comment la compensée On 'a vu les différentes moyens de compensation et les type existe shunt et série Enfin on a présenté les avantages et les inconvénients des compensateurs statique.

## **II.Introduction**

Tenant compte de l'évolution récente des réseaux de transport d'énergie électrique, et devant les Problèmes de transit de puissance, il sera de plus en plus difficile d'assurer dans l'avenir un contrôle fiable des transferts d'énergie dans les réseaux fortement interconnectés en utilisant des dispositifs de réglage classique à faible fréquence de manœuvre, et a risque de vieillissement accéléré tel que les transformateurs déphaseurs, les transformateurs à prises variables en charge, et les compensateurs de types série et shunt.

La compagnie américaine EPRI (Electric power research institue) a lancé en 1988 un projet d'étude d'une nouvelle génération de dispositif de contrôle rangés sous l'appellation FACTS (Flexible AlternatingCurrent Transmission Systems) qui met en relief les nouvelles possibilités de l'électronique de puissance dans la commande, et le contrôle du transport d'énergie électrique en courant alternatif afin de mieux maîtriser le transit de puissance dans les lignes électriques [6].

### **II-1. Définition des FACTS**

Selon IEEE, les FACTS (abréviation anglaise de Flexible AC Transmission Systems), sont définis comme suit :

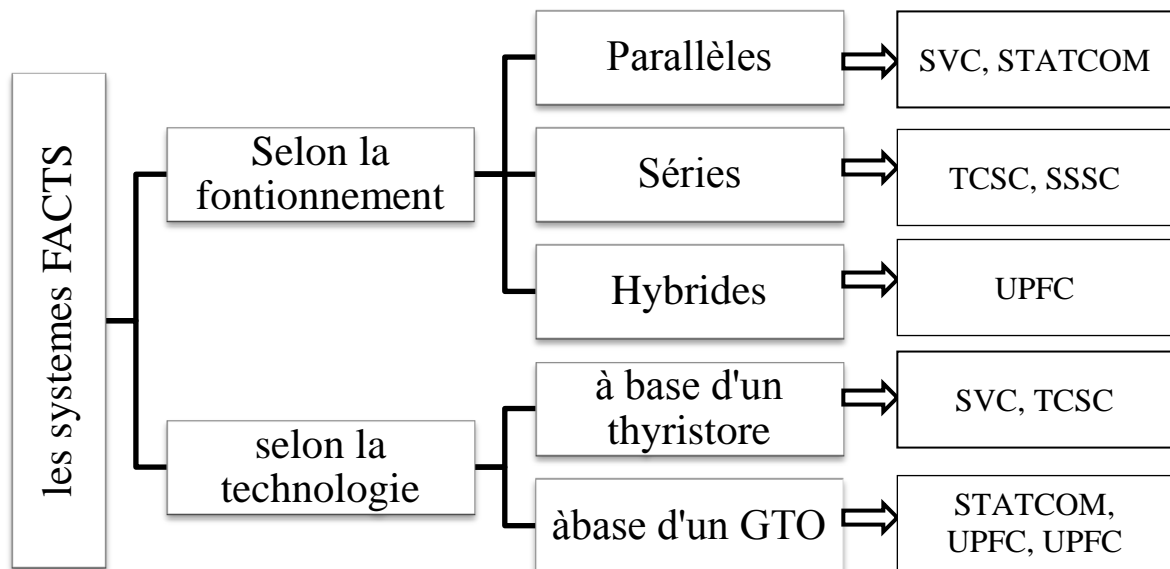
Ce sont des systèmes à courant alternatif incorporant des éléments d'électronique de puissance et d'autres contrôleurs statiques pour l'amélioration de la contrôlabilité et la capacité du transit de la puissance.

### **II -2.Classification des systèmes FACTS**

Les systèmes de transmission à courant alternatif (FACTS) traduisent un concept qui regroupe tous les dispositifs à base d'électronique de puissance qui permettent d'améliorer L'exploitation du réseau électrique. La technologie de ces systèmes (interrupteur statique) leur assure une vitesse beaucoup plus que celle des systèmes électromécaniques classiques, L'intérêt de ces systèmes et non seulement de pouvoir contrôler l'écoulement de puissance Dans les réseaux électriques mais aussi

d'augmenter la capacité effective de transport jusqu'à leur limite thermique maximale tout en maintenant voire en améliorant la stabilité des réseaux électriques [3], [4].

Les systèmes "FACTS" peuvent être classés selon la fonction et la technologie comme suit figure(II.1) :



**Figure (II.1):**classification des dispositifs FACTS

La figure(II.2) montre l'influence de différents systèmes FACTS sur la puissance active, puissance réactive et réglage de tension.

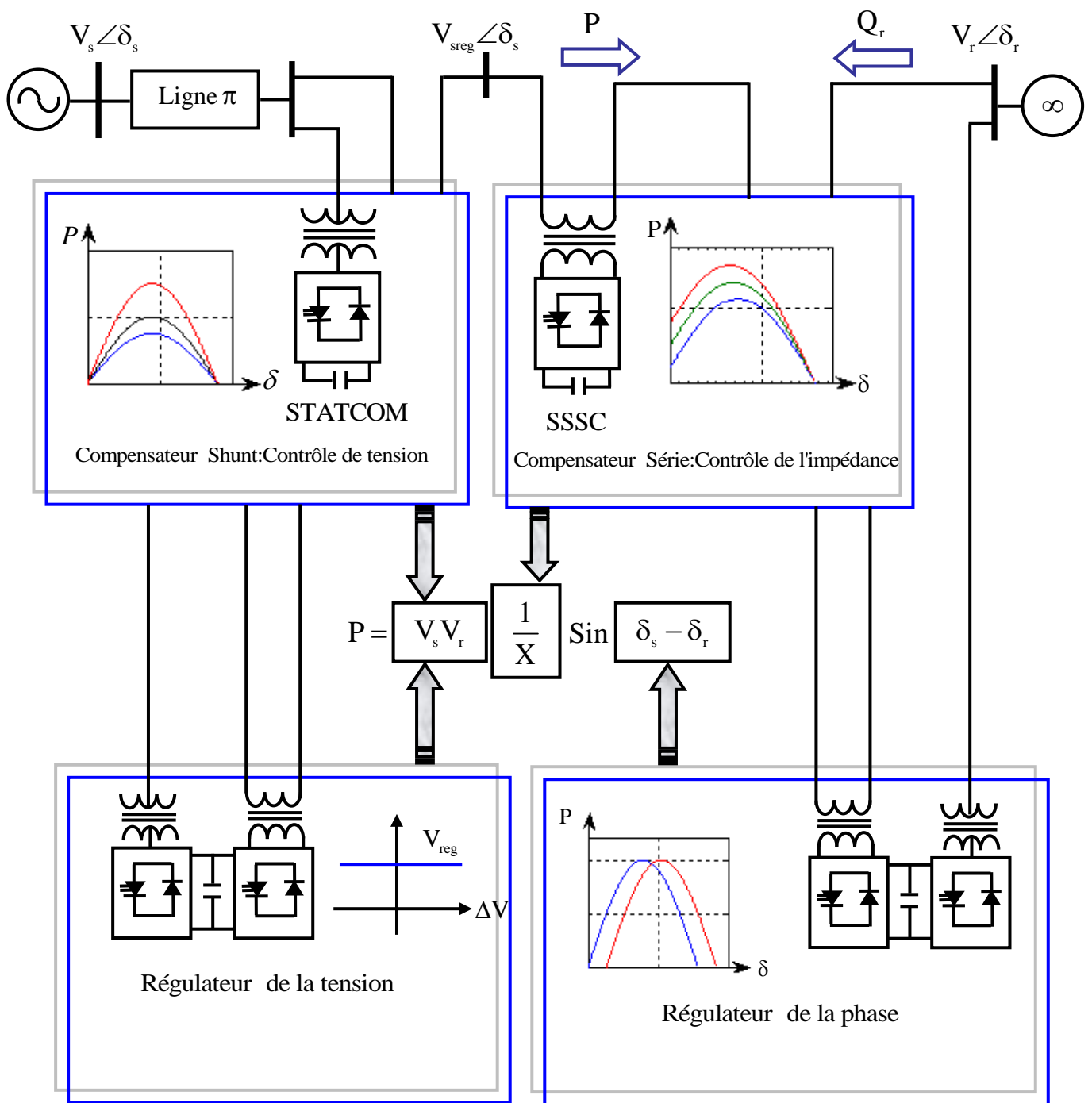


Figure (II.2) : L'influence de différents systèmes FACTS sur la puissance active, puissance réactive et réglage de tension

### **II-3. Dispositif de compensation dynamique shunt**

Selon la demande des consommateurs, les lignes électriques doivent transporter des puissances actives et aussi des puissances réactives. Afin d'éviter des pertes supplémentaires à cause de la transmission du courant réactif et pour augmenter la stabilité des réseaux interconnectés il est nécessaire de compenser la puissance réactive au niveau des sous stations d'interconnexion. L'apparition d'équipements utilisant l'électronique de puissance revient vers la fin des années soixante 60 [1].

L'avantage de ces dispositifs permet d'éliminer les parties mécaniques de rendement mauvais et de réaction assez lente, 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 permettait de régler l'énergie électrique réactive absorbée par l'inductance du dispositif [4].

En effet tous les compensateurs parallèles injectent du courant au réseau à travers les points de raccordement. La connexion d'une impédance variable en parallèle sur le réseau électrique résulte en une consommation ou une injection d'un courant variable, cette injection de courant modifie les puissances actives et réactives qui transitent dans la ligne [5].

Les compensateurs parallèles les plus utilisés sont :

#### **II-3-1. Compensateur parallèle à base de GTO thyristors**

Il s'agit de :

✚ **TCR**( Thyristor Controlled Reactor ) ou **TSR** (Thyristor Switched Reactor )

Un circuit TCR est composé d'une impédance placée en série avec deux thyristors montés en antiparallèle, comme le montre la figure (II.3), la valeur de l'impédance est continuellement changée par l'amorçage des thyristors [6].

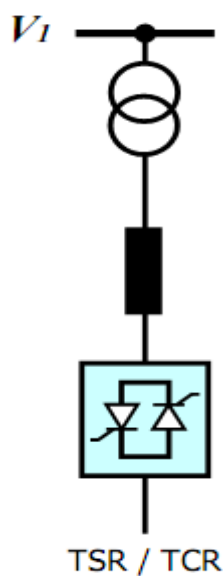
Un thyristor se met à conduire quand un signal de gâchette lui est envoyé, et la tension à ses bornes est positive, il s'arrête de conduire lorsque le courant qui le traverse s'annule.

Un dispositif TCR seul n'est pas suffisant pour pouvoir compenser la puissance réactive dans un réseau, car il ne dispose pas de source de puissance réactive.

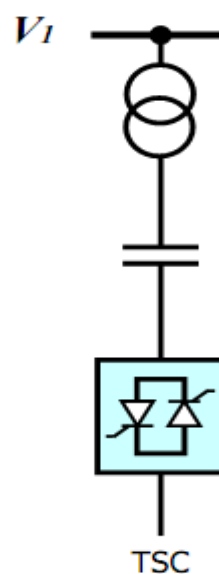
Généralement on dispose avec un TCR des bancs de condensateurs comme source de puissance réactive, et le TCR contrôle cette source de puissance [6].

### ✚ TSC (Thyristor Switched Capacitor)

Le circuit TSC est composé d'une réactance placée en série avec deux thyristors montés en antiparallèle, comme le montre la figure (II,4), pour un TSC les thyristors fonctionnent en pleine conduction [8], [10].



**Figure (II.3) :** Schéma du TCR



**Figure (II.4) :** Schéma du TSC

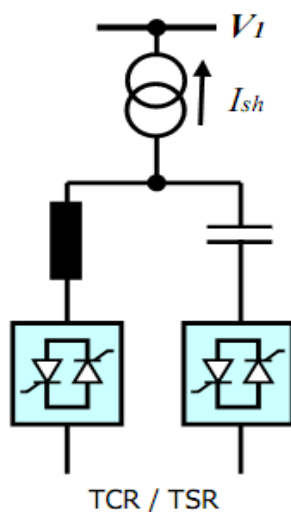
### ✚ SVC (Static Var Compensator)

Le SVC est une association des dispositifs TCR, TSC, banc de capacités fixes et des filtres d'harmoniques. Ces dispositifs constituent le compensateur hybride, plus connu sous le nom de SVC (compensateur statique d'énergie réactive) [6]. Un SVC est une impédance continuellement ajustable capacitive (+V) à inductive (-V), qui peut rapidement répondre à des modifications du réseau pour contrebalancer les variations de charge ou les conséquences d'un défaut [7].

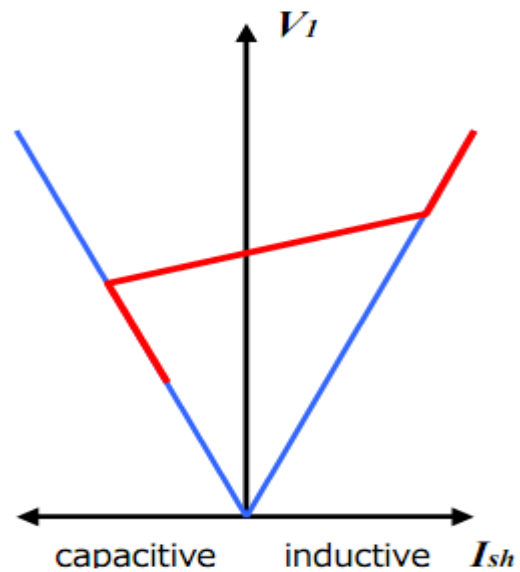
Le courant traversant la réactance est contrôlé par les valves à thyristors. Il peut donc varier entre zéro et sa valeur maximale grâce au réglage de l'angle d'amorçage des thyristors. Le système de contrôle qui génère les impulsions de gâchette des thyristors mesure soit la tension au point de connexion soit la puissance réactive dans la charge associée et calcule l'instant auquel il faut amorcer les valves [7].

Le compensateur statique d'énergie réactive (SVC) a été installé pour la première fois en 1979 en Afrique du sud [8]. La caractéristique statique est donnée sur la figure (II.6). trois zones de fonctionnement sont distinctes [8] :

- $f$  Une zone où seules les capacités sont connectées au réseau.
- $f$  Une zone de réglage où l'énergie réactive et une combinaison de TCR et de TSC.
- $f$  Une zone où le TCR donne son énergie maximale, les condensateurs sont déconnectés.



**Figure (II.5):**Schéma du SVC



**Figure (II.6) :** Caractéristique d'un SVC

### ✚ TCBR (Thyristor Control Breaking Resistor)

Ce type de compensateur se monte en parallèle, il est utilisé pour améliorer la stabilité du réseau pendant la présence des perturbations [4]. La figure (II.7) représente un TCBR en parallèle avec un SVC équipé d'un banc de condensateurs et d'un filtre d'harmonique.



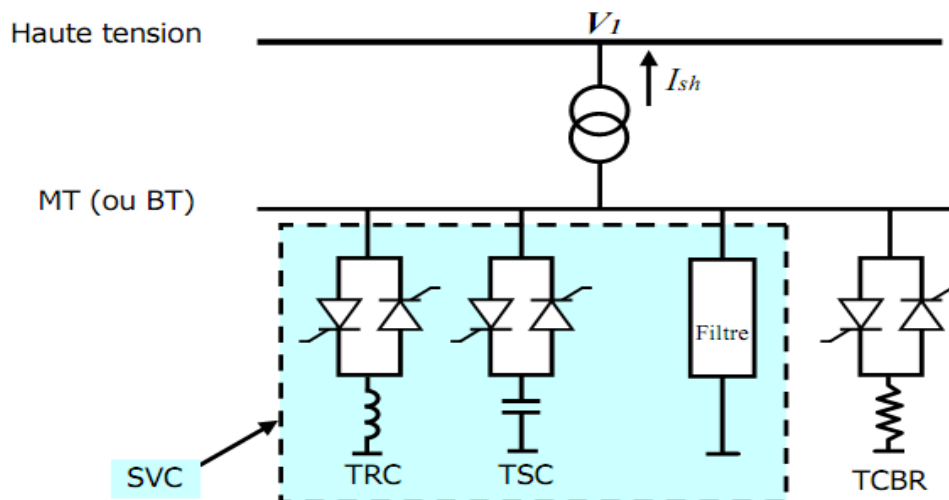


Figure (II.7) : Schéma du SVC et TCBR.

### II-3-2. Compensateur parallèle à base de GTO thyristors STATCOM

Le **STATCOM** (STATIC synchronous COMPensator) fut le premier FACTS utilisant le VSC (onduleur à source de tension) à être introduit dans les réseaux électriques [12]. Un STATCOM est un convertisseur statique à source de tension connecté en parallèle à un réseau alternatif en général par le biais d'un transformateur abaisseur. En réglant le déphasage du VSC égal à celui de la tension alternative au point de connexion, le flux de courant dans l'impédance de réseau est parfaitement réactif. Le STATCOM, a connu jusqu'à présent différentes appellations [9] :

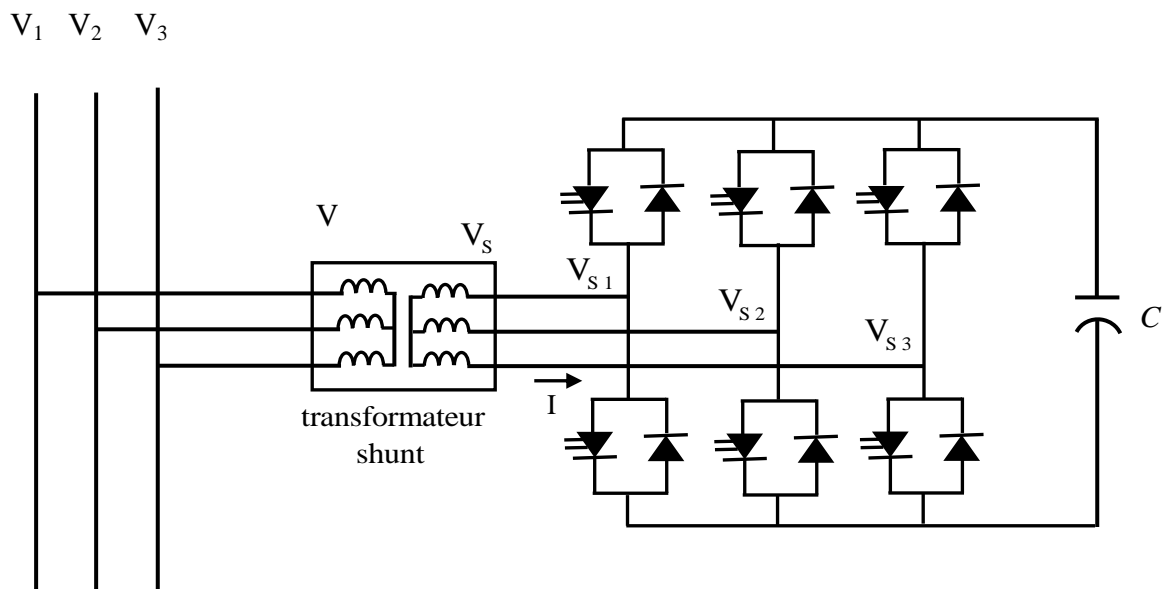
- **ASVC** (Advanced Static Var Compensator)
- **STATCON** (STATIC CONDenser)
- **SVG** (Static Var Generator)
- **SVC light**
- **SVC plus**

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 développements des interrupteurs, GTO de forte puissance [6]. Le STATCOM a une fonction comparable à celle des SVC avec des performances dynamiques plus importantes. Le STATCOM présente plusieurs avantages [1], [11] à savoir :

- L'étendue de la plage d'opération est plus large qu'un SVC classique.

- Les performances dynamiques sont plus élevées qu'avec un SVC classique.
- Bonne réponse à faible tension : le STATCOM est capable de fournir son courant nominal même lorsque la tension est presque nulle.
- Il ne présente pas d'élément capacitif qui puisse provoquer des résonances avec des éléments inductifs du réseau.
- Un contrôle optimal de la tension, les phases sont contrôlées séparément pendant les perturbations du système.
- Une flexibilité opérationnelle maximale est obtenue par la disponibilité de cabines relocalisables.
- Un design modulaire du convertisseur permet une adaptation pour une grande plage de puissance.

La figure (II.8) représente le schéma de base d'un STATCOM, où les cellules de commutation sont bidirectionnelles formées de GTO et de diodes en antiparallèle. Le rôle de STATCOM est d'échanger de l'énergie réactive avec le réseau. Pour se faire, l'onduleur est couplé au réseau par l'intermédiaire d'une inductance, qui est en général l'inductance de fuite du transformateur de couplage [10].



**Figure (II.8) :** Schéma de base d'un STATCOM.

### II-3-2-1. Principe de fonctionnement:

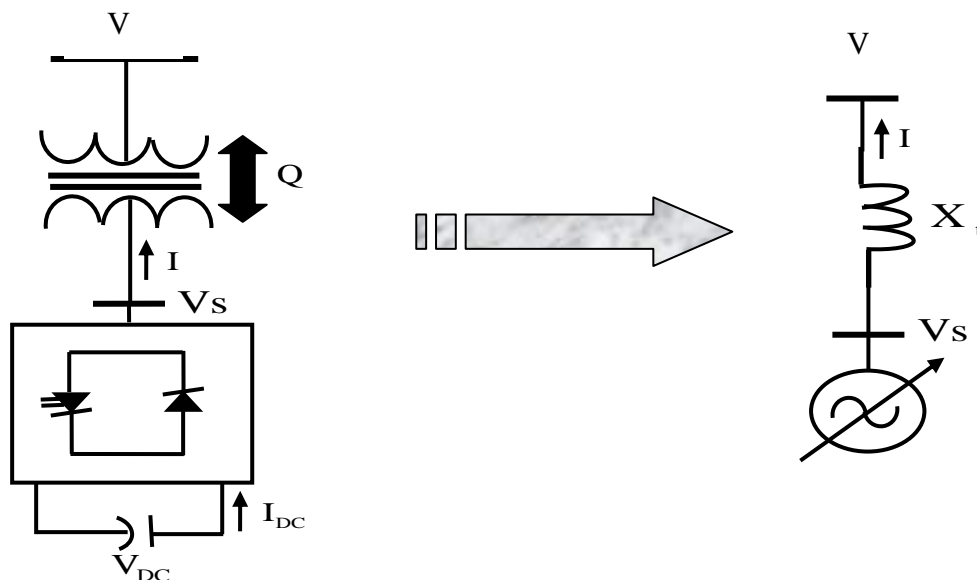
Le principe de fonctionnement de STATCOM est similaire à celui du compensateur synchrone. Les tensions de sortie sont générées par un onduleur au lieu d'être créées par un groupe tournant.

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 forte puissance.

Les cellules de commutation sont bidirectionnelles, c'est-à-dire formées de GTO et de diodes en antiparallèle.

Le rôle de STATCOM est d'échanger d'énergie réactive avec le réseau

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  $E$ .

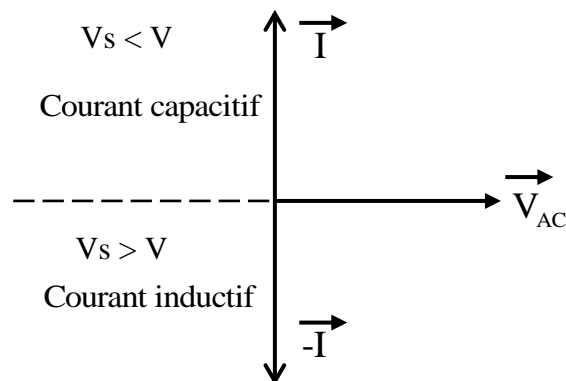


**Figure (II.9) :** Présentation d'un compensateur STATCOM

Le fonctionnement peut être décrit de façon suivante :

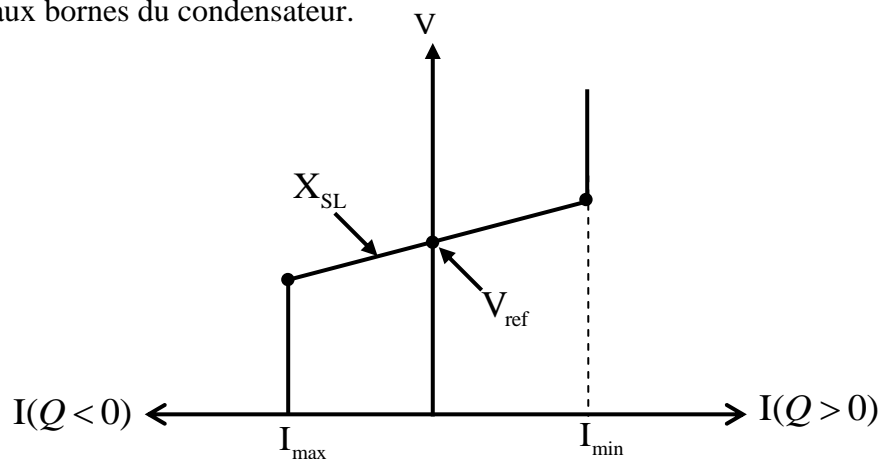
- Si,  $V_s < V$ , le courant circulant dans l'inductance est déphasé de  $+\frac{\pi}{2}$  par rapport à la tension  $V$  et le courant est capacitif.
- Si  $V_s > V$ , le courant circulant dans l'inductance est déphasé de  $-\frac{\pi}{2}$  par rapport à la tension  $V$  et le courant est inductif.

- Si,  $V_s = V$ , le courant circulant dans l'inductance est nul, il n'y a pas d'échange d'énergie.



**Figure (II.10) :** Diagramme vectoriel de STATCOM

On considère dans ce fonctionnement que les tensions sont triphasées et équilibrées. Par ailleurs, l'amplitude de la tension de sortie  $V_s$  est proportionnelle à la tension continue aux bornes du condensateur.



**Figure(II.11) :** Caractéristique statique du STATCOM

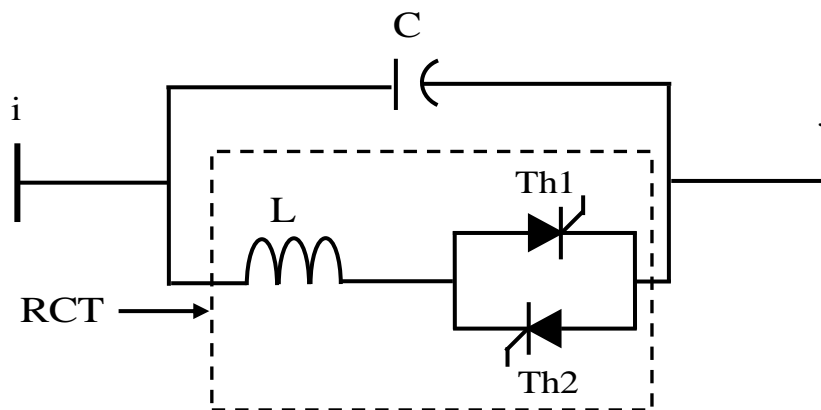
## II-4. Dispositif de compensation dynamique série

### II-4-1. Compensateurs séries à base de thyristors TCSC

**TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) :** il est constitué d'une inductance en série avec un gradateur et l'ensemble en parallèle avec une capacité  
Figure(II.12)

Le TCSC placé en série dans une ligne de transport permet de contrôler le flux de

puissance et d'élever la capacité de transfert des lignes en agissant sur la réactance TCSC  $X$  qui varie selon l'angle de retard à l'amorçage des thyristors  $\alpha$  donné par la formule (1.15).[1][8]



**Figure(II.12) :** schéma de base d'un TCSC

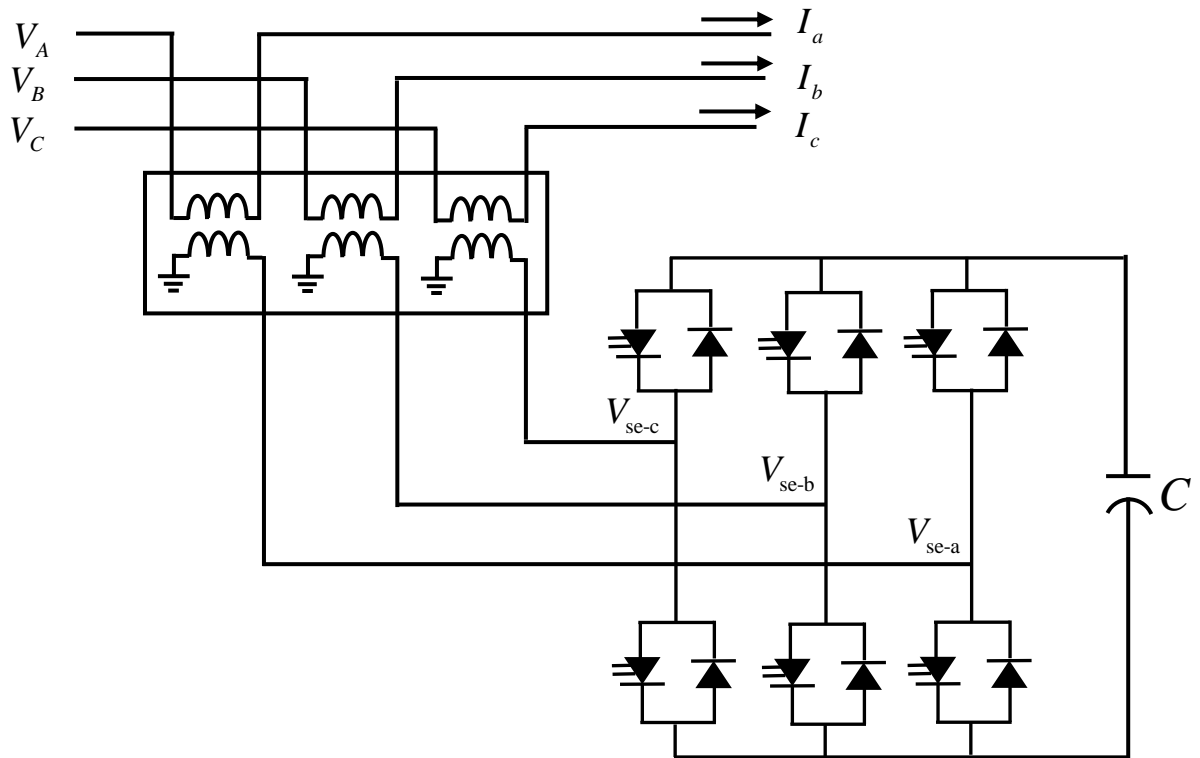
$$X_{TCSC}(\alpha) = \frac{jL\omega}{\frac{2}{\pi} \left( \pi - \alpha + \frac{\sin(2\alpha)}{2} \right) - LC\omega^2} \quad (\text{II.1})$$

En supposant que le TCSC est installé en série dans une ligne entre les deux jeux de barre l et m de la figure 1.6.b, la puissance qui transite entre ces deux jeu de barres est régitpar l'équation (II.2) suivante:

$$P_{sr} = \frac{|V_s||V_r|}{X_{TCSC}} \cdot \sin(\theta_s - \theta_r) \quad (\text{II.2})$$

#### II-4-2. Compensateurs hybrides à base de GTO thyristors SSSC

**SSSC (Static Synchronous Series Compensator)** c'est l'un des plus important dispositifs FACTS; similaire à un STATCOM mais avec une tension de sortie injectée en série dans la ligne, son schéma de principe est donné par la figure1.7. Ce dispositif appelé aussi DVR (Dynamic Voltage Restorer) est utilisé généralement dans les réseaux dedistribution afin de résoudre les problèmes de qualité d'énergie tel que les creux de tensions et maintenir ces dernières à des niveaux constants. [11][8]



Figure(II.13): schéma de base du SSSC

Dans le but d'un fonctionnement stable, ce dispositif performe les mêmes fonctions d'un SPS (static phase shifter) ou d'une impédance série variable de compensation : il injecte une tension en quadrature avec une tension des extrémités de la ligne pour contrôler le flux de puissance active. Et comme se système ne consomme pas du réactive à partir du réseau et possède son propre énergie réactive stockées dans les batteries de condensateur il a l'aptitude de contrôler à la fois la puissance active et réactive. Sa caractéristique statique est donnée sur la figureII.14suivante:

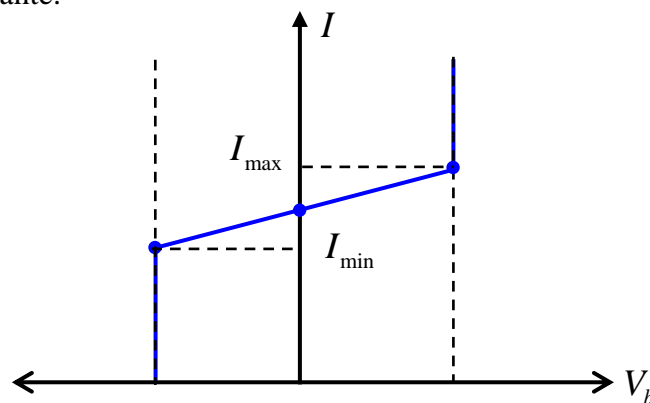


Figure II-14 : Caractéristique statique du SSSC

Dans le model adopté pour ce dispositif la valeur de la source de tension connectée en série et donnée par la formule:

$$V_{se} = |V_{se}|(\cos \delta_{se} + j \sin \delta_{se}) \quad (II.3)$$

### II-5. Dispositif de compensation dynamique hybride

#### II-5-1. Compensateurs hybrides à base de GTO thyristors UPFC

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

Ce dispositif est l'union de deux compensateurs l'un est un compensateur série et l'autre est un compensateur parallèle, le concept de ce dispositif à été présenté en 1990 par L. Gyugyi [6]. Il possède à la fois la fonctionnalité de trois compensateurs (série, parallèle et déphaseur).

Il est capable de contrôler simultanément et indépendamment la puissance active et la puissance réactive. Il peut contrôler les trois paramètres associés au transit de puissance à savoir la tension de la ligne, l'impédance de la ligne et le déphasage des tensions aux extrémités de la ligne. Son schéma de base est donné par la figure (II.15). L'UPFC est constitué de deux onduleurs de tension triphasés, l'un est connecté en parallèle au réseau par l'intermédiaire d'un transformateur et l'autre est connecté en série à travers un deuxième transformateur. Les deux onduleurs sont interconnectés par un bus continu représenté par le condensateur [11].

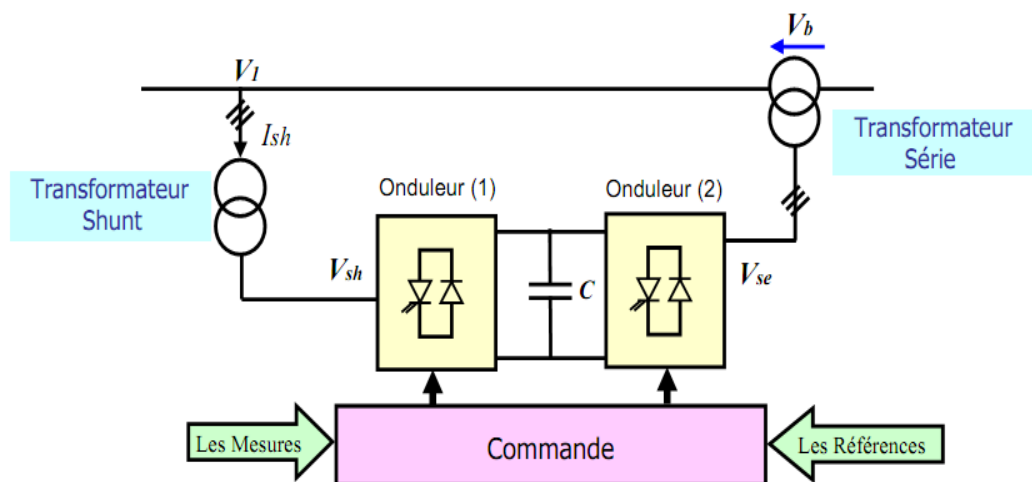


Figure (II-15) : schéma de base d'un UPFC

L'UPFC permet à la fois le contrôle de la puissance active et celui de la tension de la ligne, il est capable d'accomplir les fonctions des autres dispositifs FACTS à savoir le réglage de la tension, la répartition de flux d'énergie, l'amélioration de la stabilité et l'atténuation des oscillations de puissance.

Dans la figure (II-15) l'onduleur (1) est utilisé à travers la liaison continue pour fournir la puissance active nécessaire à l'onduleur (2). Il réalise aussi la fonction de compensation réactive puisqu'il peut fournir ou absorber de la puissance réactive, indépendamment de la puissance active, au réseau. L'onduleur (2) injecte la tension  $V_b$  et fournit les puissances actives et réactives nécessaires à la compensation série.

L'UPFC offre une flexibilité énorme qui permet le contrôle de la tension, de l'angle de transport et de l'impédance de la ligne par un seul dispositif comprenant seulement deux onduleurs de tension triphasés. De plus, il peut basculer de l'un à l'autre de ces fonctions instantanément, en changeant la commande de ses onduleurs, ce qui permet de pouvoir faire face à des défauts ou à des modifications du réseau en privilégiant temporairement l'une des fonctions [5].

### **II-6. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents type de dispositifs FACTS shunt série et hybride, leur technologie et mode de fonctionnement. Le prochain chapitre sera consacré à la modélisation du compensateur série (TCSC) afin de l'intégrer dans le problème de l'écoulement de puissance.



Ce chapitre est composé de deux parties la première est consacré à l'étude générale du problème de répartition de la charge et la deuxième partie à la modélisation et l'intégration d'un compensateur série TCSC dans le problème de l'écoulement de puissance.

## Première Partie :

### III. Introduction

La répartition des charges (*load flow ou power flow*) est l'un des principaux problèmes qui se pose aux gestionnaires d'un système de production - transport d'énergie électrique. Dans tout ensemble de centrales électriques alimentant un ensemble de consommateurs par l'intermédiaire d'un réseau de transport maillé, on doit déterminer la répartition des puissances fournies par ces centrales à un instant donné tout en respectant un ensemble de contraintes techniques et économiques.

La résolution du problème de la répartition des charges, nous permet de déterminer les valeurs du module et de la phase de la tension en chaque nœud du réseau pour des conditions de fonctionnement données. Ce qui nous permettra de calculer les puissances transitées et générées et les pertes. Pour résoudre ce problème, il est nécessaire de déterminer les conditions de l'opération en régime permanent, d'un système de puissance, qui sont :

- La formulation d'un modèle mathématique approprié.
- La spécification d'un certain nombre de variables et de contraintes dans les nœuds du système.
- La résolution numérique du système.

#### III-1. Modélisation du système électrique

Pour un réseau à  $n$  nœuds, les équations reliant les tensions nodales et les courants injectés, sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} I = Y * V \\ I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \\ i = 1 \dots \dots \dots \dots \dots, n \end{array} \right. \quad \text{(III-1)}$$

## Modélisation et intégration du TCSC dans l'EP

---

En pratique, le système est connu par les puissances apparentes injectées. Les  $n$  équations complexes se décomposent en  $2n$  équations réelles :

$$S_i = P_i + Q_i = V_i I_i^* \quad (\text{III-2})$$

$$S_i^* = P_i - Q_i = V_i^* \sum_{j=0}^n Y_{ij} V_j \quad (\text{III-3})$$

$$P_i = V_i \sum_{j=0}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (\text{III-4})$$

$$Q_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (\text{III-5})$$

Ou, en exprimant les tensions en forme cartésienne

$$P_i = e_j \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) + f_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) \quad (\text{III-6})$$

$$Q_i = f_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) - e_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) \quad (\text{III-7})$$

Ou :

$V_i \ \theta_i$ : Le module et la phase de la tension au nœud  $i$ .

$P_i \ Q_i$ : Les puissances active et réactive injectées au nœud  $i$ .

$G_{ij} + jB_{ij}$ : L'élément complexe  $Y_{ij}$  de la matrice des admittances.

$\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$ : La différence des phases entre les nœuds  $i$  et  $j$ .

$e_i, f_i$ : la partie réelle et imaginaire de la tension au nœud  $i$ .

Chaque nœud est caractérisé par quatre variables :  $P_i, Q_i, V_i, \theta_i$ . Si on connaît deux des quatre variables en chaque nœud, les équations En pratique, le problème se pose autrement. Pour cela il faut classifier les nœuds du système comme suit :

- *Nœuds P-V* : Pour ce type de nœuds, on associe les centrales de production. On spécifie la puissance active et le module de la tension. Les variables à déterminer sont la phase de la tension et la puissance réactive.
- *Nœuds P-Q* : Pour ce type de nœuds, on associe généralement les charges. Ces dernières sont caractérisées par la consommation des puissances active et réactive. On peut aussi associer des générateurs avec des puissances active et

réactive fixées. Les variables à déterminer sont le module et la phase de la tension.

- *Nœuds  $V-\theta$*  : Pour ce type de nœud on associe la centrale de production la plus puissante.

Dans un nœud  $k$  (*nœud de référence ou slack bus*), on spécifie la phase ( $\theta$ ) et le module de la tension. Les valeurs à déterminer sont les puissances active et réactive.[12]

### III-2 Classification des variables et des contraintes d'un système

La complexité du système électrique est directement proportionnelle aux nombres des nœuds qu'il contient. Pour cela, afin de faciliter les calculs et expliquer le fonctionnement correct des grands systèmes, il faut classer les différentes variables et contraintes.

#### III-2-1. Classification des variables

Généralement le fonctionnement du système électrique peut être décrit en fonction de six variables pour chaque nœud considéré :

$P_{ci}, Q_{ci}$ : Puissances active et réactive consommées au nœud  $i$ .

$P_{gi}, Q_{gi}$ : Puissances active et réactive générées au nœud  $i$ .

$V_i$ : Module de la tension au nœud  $i$ .

$\theta_i$ : Angle de phase au nœud  $i$ .

Ces variables sont généralement divisées en trois groupes :

- ✓ Les variables incontrôlables : Ce sont les puissances actives et réactive liées à la consommation. Ses variables sont représentées par un vecteur **P**.
- ✓ Les variables indépendantes ou de contrôle : Ce sont généralement les puissances actives et réactive générées. On peut aussi, selon des cas, considérer des tensions aux nœuds de génération ou les rapports de transformation des transformateurs avec régulateur en charge comme variable de contrôle. Ses variables sont représentées par un vecteur **U**.
- ✓ Les variables dépendantes ou d'état : Les tensions en module et en phase représentant l'état du système. Ses variables sont représentées par un vecteur **X**.

## III-2-2. Classification des contraintes

Contrairement aux objectifs, les contraintes sont faciles à définir, parce qu'elles sont liées à la nature physique des éléments du réseau. On distingue les contraintes sur les variables dépendantes, dites contraintes de sécurité et limites sur les variables indépendantes. Lors d'une répartition des charges ou une optimisation, les contraintes doivent être vérifiées exactement, ce qui constitue un avantage dans la plupart des résultats obtenus [12].

### III-2-2-1. Contraintes sur les variables dépendantes

Les contraintes liées à la sécurité des réseaux sont généralement au nombre de quatre :

- Contraintes d'équilibre entre la production et la consommation :

En régime normal, et à tout moment, l'égalité entre la production et la consommation des puissances active et réactive doit être assurée, soit :

$$\sum_{i=1}^{n_g} P_{gi} - \sum_{i=1}^{n_c} P_{ci} - P_L = 0 \quad (\text{III-8})$$

$$\sum_{i=1}^{n_g} Q_{gi} - \sum_{i=1}^{n_c} Q_{ci} - Q_L = 0 \quad (\text{III-9})$$

$P$ : Pertes actives totales

$Q$ : Pertes réactives totales.

$n_c$ : Nombre de nœuds de consommation.

$n_g$ : Nombre de nœuds de génération.

Toute atteinte à cet équilibre se répercute sur la valeur de la fréquence et les tensions du réseau.

- Contraintes sur les modules de la tension :

Les conditions d'exploitation des réseaux fixent les limites :

- des tensions maximales par la tenue diélectrique du matériel et la saturation des transformateurs.

- des tensions minimales par l'augmentation des pertes et le maintien de la stabilité des alternateurs. On aura pour tous les nœuds, la condition suffisante et nécessaire à savoir :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_i \min \leq V_i \leq V_i \max \\ i = 1 \dots \dots \dots, n \end{array} \right. \quad (\text{III-10})$$

$V$ : Module de la tension au nœud  $i$ .

$V_i^{\min}$ ,  $V_i^{\max}$ : Respectivement limites minimale et maximale de la tension.

Le respect des contraintes de tension est d'une importance primordiale pour la sécurité d'exploitation et du matériel. Une violation de la limite supérieure que l'on observe parfois en faible charge peut constituer un danger pour l'isolation du matériel. Par ailleurs, des tensions trop basses nuisent à l'exploitation rationnelle du réseau, et peuvent conduire à son écroulement.

- Contraintes sur la capacité de transit de la ligne :

La puissance transitée dans une ligne ne doit, en aucun cas, dépasser la limite maximale,

$$S_{ij} \leq S_{ij}^{\max} \quad (\text{III-11})$$

Avec :

$$S_{ij} = \sqrt{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2} \quad (\text{III-12})$$

$S_{ij}$ : Puissance apparente transitée dans la ligne  $i - j$ .

$S_{ij}^{\max}$ : Puissance apparente maximale transitée dans la ligne  $i - j$ .

$P_{ij}$ : Puissance active transitée dans la ligne  $i - j$ .

$Q_{ij}$ : Puissance réactive transitée dans la ligne  $i - j$ .

En général, à partir des contraintes des puissances transitées, nous déterminons les contraintes de courant correspondant aux lignes et aux transformateurs. On limite les courants transités pour des raisons de surcharge et de stabilité

### III-2-2.2. Contraintes sur les variables indépendantes

Ces contraintes sont liées à la nature physique des éléments du réseau, soit :

➤ **Contraintes sur la production :**

La puissance produite par chaque groupe est bornée supérieurement par la puissance maximale qu'il peut fournir et inférieurement par le minimum, qui est conditionnée

par le rendement de ce groupe et les contraintes sur la turbine. Pour tous les nœuds de production, les contraintes active et réactive sont :

$$\begin{cases} P_i^{g,min} \leq P_i^g \leq P_i^{g,max} \\ Q_i^{g,min} \leq Q_i^g \leq Q_i^{g,max} \\ i = 1 \dots \dots \dots n_g \end{cases} \quad (III-13)$$

➤ **Contraintes sur les rapports de transformation :**

Le rapport de transformation des transformateurs avec régleur en charge, peut varier selon la position du régleur. Ce dernier doit être limité entre deux bornes, minimale et maximale, soit :

$$\begin{cases} a_k^{min} \leq a_k \leq a_k^{max} \\ k = 1 \dots \dots \dots nt \end{cases} \quad (III-14)$$

*nt*: nombre de transformateur.

### III -3.Algorithmes de résolution du problème de la répartition des charges

#### III -3-2.Méthode de Newton-Raphson

Cette méthode se base sur le développement en série de Taylor. Cette dernière s'obtient successivement à partir des approximations du premier ordre :

$$f(x) \approx f(X^{k+1}) + f'(X^k) \cdot (X^{k+1} - X^k) = 0 \quad (III-15)$$

Ou :  $f' = \frac{\partial f}{\partial x}$  est le Jacobien de f(x). A partir d'une valeur initiale  $x^0$ , on obtient les corrections  $\Delta X^k$  en résolvant le système linéaire :

$$-f'(X^k) \cdot \Delta X^k = f(X^k) \quad (III-16)$$

Et les nouvelles valeurs  $X^{k+1}$  de :

$$X^{k+1} = X^k + \Delta X^k \quad (III-17)$$

Dans le réseau, on corrige l'angle et le module de la tension qui sont donnés par les deux équations :

$$\Delta P_i = P_i^{spe} - P_i^{cal} = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (III-18)$$

$$\Delta Q_i = Q_i^{spe} - Q_i^{cal} = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (\text{III-19})$$

Avec cette notation et en divisons la Jacobéenne en sous matrices, l'expression (III-17) appliquée au problème de la répartition des charges, se convertit, en un système matriciel suivant :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}^k = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix}^k \cdot \begin{bmatrix} \Delta V \\ \Delta \theta \end{bmatrix}^k \quad (\text{III-20})$$

La variable  $\Delta V$  peut être divisée par  $V$  :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}^k = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix}^k \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \frac{\Delta V}{V} \end{bmatrix}^k \quad (\text{III-21})$$

et l'expression (III-18) en système matriciel est :

$$\begin{bmatrix} \theta \\ V \end{bmatrix}^{k+1} = \begin{bmatrix} \theta \\ V \end{bmatrix}^k + \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix}^k \quad (\text{III-22})$$

Avec :

$$H_{ij} = \frac{d_i}{d\theta_j}, \quad M_{ij} = \frac{dQ_i}{d\theta_j}, \quad N_{ij} = \frac{dP_i}{dV_j} \cdot V_j, \quad L_{ij} = \frac{dQ_i}{dV_j} \cdot V_j$$

La matrice du Jacobien à comme éléments :

- Pour  $i = j$  :

$$H_{ii} = -Q_i - B_{ii} \cdot V_i^2 \quad (\text{III-23})$$

$$M_{ii} = P_i - G_{ii} \cdot V_i^2 \quad (\text{III-24})$$

$$N_{ii} = P_i - G_{ii} \cdot V_i^2 \quad (\text{III-25})$$

$$L_{ii} = Q_i - B_{ii} \cdot V_i^2 \quad (\text{III-26})$$

- Pour  $i \neq j$  :

$$H_{ij} = V_i \cdot V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (\text{III-27})$$

$$N_{ij} = V_i \cdot V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} - B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (\text{III-28})$$

$$L_{ij} = H_{ij} \quad (\text{III-29})$$

$$M_{ij} = -N_{ij} \quad (\text{III-37})$$

Pour chaque itération, on calcul  $\left[\Delta\theta, \frac{\Delta V}{V}\right]$  en résolvant le système (III-28). Le processus s'arrêtera pour  $|\Delta P| \leq \varepsilon$  et  $|\Delta Q| \leq \varepsilon$ .

### Deuxième Partie

#### III-4. Introduction

Les bouleversements récents apparus dans le domaine de la fourniture d'électricité ont placé les exploitants des réseaux de Transport face à de nouvelles opportunités mais également de nouveaux défis. Ils proviennent principalement de la forte augmentation des transferts d'énergie entre régions et /ou entre pays, des effets de la dérégulation, de considérations politiques, économiques et écologiques en ce qui concerne la construction de nouvelles lignes.

Techniquement, il est possible de remédier au manque de capacité de transport en créant de nouvelles lignes et/ou de nouveaux générateurs.

Dans la pratique, pour diverses raisons, cela n'est pas toujours réalisable, ni souhaitable. La création de nouvelles lignes et/ou l'extension de postes existants peuvent se révéler trop coûteuses et demander des délais trop longs.

L'obtention de nouveaux droits de passage peut être difficile voire impossible à obtenir. Enfin, l'impact sur l'environnement prend de plus en plus d'importance et doit être sérieusement pris en compte dans les procédures de développement du Transport d'électricité.

Les capacités séries contrôlées par thyristor (TCSC), utilisant une électronique de puissance dernier cri, peuvent aider à s'affranchir de ces contraintes, dans tous les cas où il est nécessaire de transporter de grandes quantités d'énergie sur de longues distances ou lors de la mise en place de liaisons entre pays ou entre régions. C'est une alternative très favorable du point de vue technique, économique et environnemental. Les principaux avantages de l'insertion de TCSC dans un réseau électrique sont:

- ✓ Compensation du déséquilibre des courants de charge
- ✓ Amélioration de la stabilité dynamique, de l'amortissement des oscillations de puissance et de la stabilité de la tension.



- ✓ Réduction des risques de résonance hypo synchrone.
- ✓ Diminué les pertes et la chute de tension.

### III-5. Dispositifs de compensation dynamique série

#### III-5-1. Compensateurs séries à base de thyristors

Les compensateurs série à base de thyristors les plus connus sont :

##### ✚ TCSC (thyristor controlled series capacitor)

Un module de TCSC est composé d'un banc de condensateur en parallèle avec une inductance commandée par thyristors, l'impédance totale vue par la ligne est une combinaison parallèle de capacité et de l'inductance équivalente variable selon l'angle d'allumage des thyristors figure (III-1). On peut aligner plusieurs modules commandés en série dans la ligne à compenser [11].

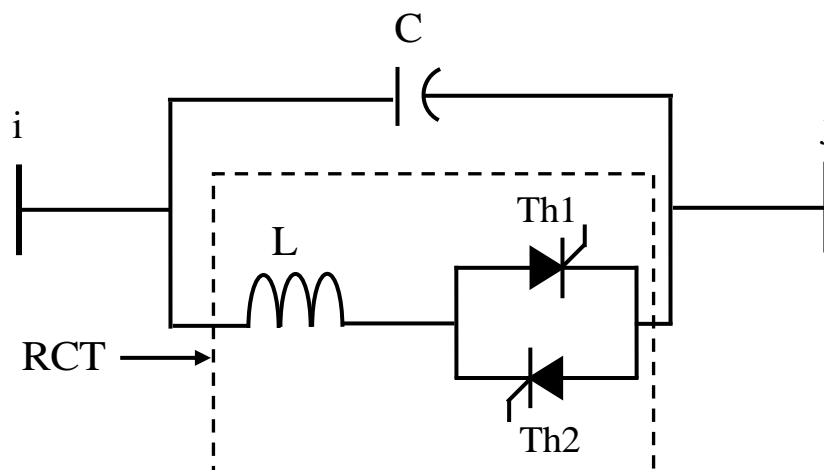


Figure (III-1).: Structure d'un TCSC

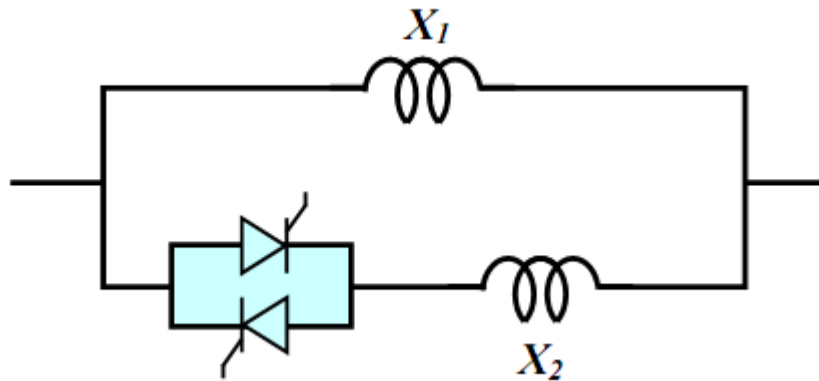
##### ✚ TSSC (Thyristor Switched Series Capacitor)

La différence entre ce système et le TCSC est que l'angle d'amorçage est soit de 90 degrés soit de 180 degrés [1].

##### ✚ TCSR (Thyristor Controlled Series Reactor)

Le TCSR est un compensateur inductif qui se compose d'une inductance en parallèle avec une autre inductance commandée par thyristors afin de fournir une réactance inductive série variable [1]. Lorsque l'angle d'amorçage de réactance contrôlée est

égal à 120 degrés, le thyristor cesse de conduire, et la réactance non contrôlée  $X_1$  agit comme un limiteur de courant de défaut. Pendant que l'angle d'amorçage diminue en dessous de 180 degrés, la réactance équivalente jusqu'à l'angle de 90 degrés, où elle est la combinaison des deux réactances en parallèle [1].



**Figure (III-2):** Structure d'un TCSR

### ✚ TSSR (Thyristor Switched Series Reactor)

La différence entre ce système et le TCSR est que l'angle d'amorçage peut être soit de 90 degrés soit de 180 degrés [1].

#### III-5-1-1. Définition d'un TCSC :

Un TCSC est constitué de deux branches parallèles. La première comprend deux thyristors T1 et T2 branchés tête-bêche en série avec une inductance L. Cette branche est appelée TCR ou « Thyristor Controlled Reactor » pour inductance contrôlée par thyristor qui peut être comparée à une inductance variable.

La seconde branche ne contient qu'un condensateur C. L'inductance variable, montée en parallèle avec ce condensateur, permet de faire varier l'impédance du TCSC en compensant tout ou partie de l'énergie réactive produite par le condensateur.

La modification de la valeur de cette impédance se fait en jouant sur l'angle d'amorçage des thyristors, i.e. l'instant dans une période où les thyristors commencent à conduire. Il y a une zone critique correspondant à la résonance du circuit LC

## III-5-1-2.Principe de fonctionnement d'un TCSC :

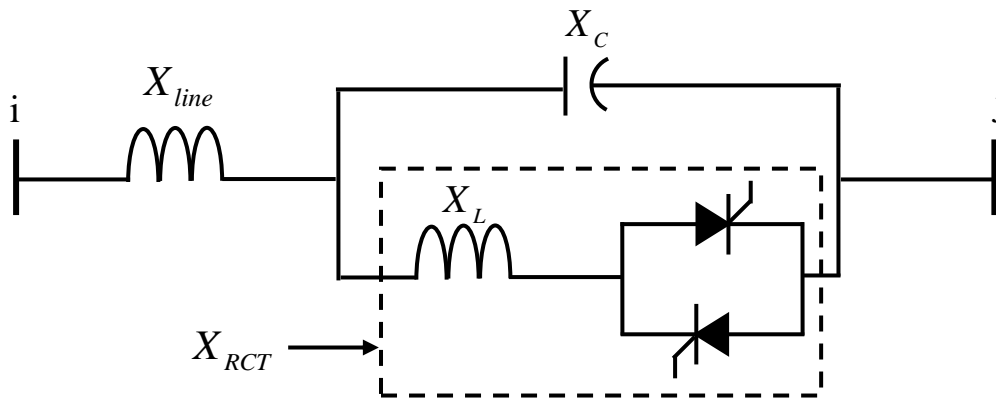
Le TCSC est composé d'une inductance en série avec un gradateur à thyristor, le tout en parallèle avec un condensateur. Le TCSC est inséré sur la ligne de transmission (Figure(III-2))

Où

$X_C$  : est l'impédance du condensateur du TCSC.

$X_L$  : est l'impédance de l'inductance du TCSC.

$X_{line}$  : est l'impédance de la ligne.



**Figure (III-2) :** Insertion d'un TCSC sur une ligne

A la réactance variable tel qu'un RCT (Réactances Commandées par Thyristor) et relié à travers un condensateur en série. Quand l'angle d'amorçage de RCT est de 180 degrés, le réacteur devient non conduisant et le condensateur en série a sa impédance normale. Pendant que l'angle est avancé de 180 degrés, l'impédance capacitive augmentée. A l'autre extrémité, quand l'angle d'amorçage de RCT est de 90 degrés, le réacteur devient entièrement conduisant, et toute impédance devient inductive, par ce que l'impédance de réacteur est conçue pour être beaucoup inférieure au condensateur en série impédance. Avec 90 degré, le TCSC aide en limitant le courant de défaut. Inductive de série sans a –coup variable.

Quand l'angle d'amorçage du RCT est de 180 degrés, lui des arrêts conduisant, et les actes non contrôlés de réacteur comme limiteur de courant de défaut.

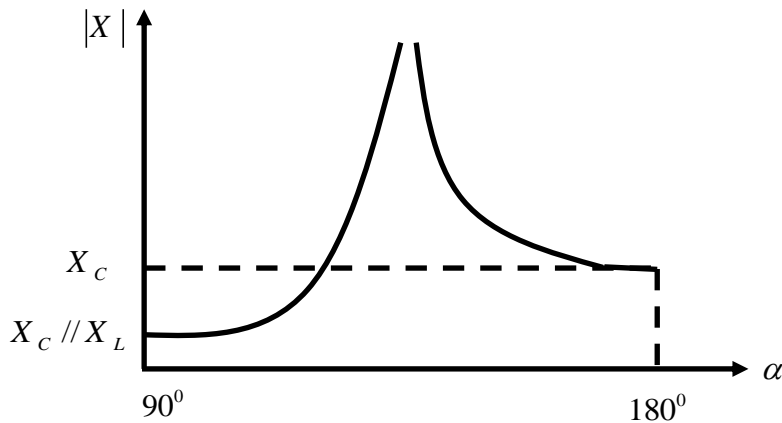


Figure (III-3): Impédance du TCSC en fonction de l'angle

### III-5-1-3 Modélisation de TCSC :

La compensation série est parmi les meilleures techniques actuellement connue pour accroître la capacité de transfert de puissance des lignes de transmission. Les condensateurs séries fonctionnent en insérant une source de tension en série avec la ligne de transmission avec une polarité inverse à celle de la chute de tension à travers la ligne.

Le modèle mathématique de TCSC est dans le schéma de la figure(III-3)

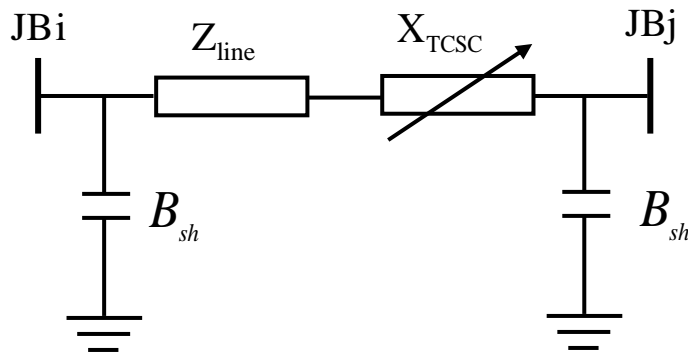


Figure (III-3): modèle mathématique de TCSC

Le TCSC devient analogue à une impédance contrôlable, qui est le résultat de la mise en parallèle de la réactance équivalente d'un composant TCR et une capacité.

$$X_{TCSC}(\alpha) = j \frac{X_C X_L}{\frac{X_C}{\pi} (2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha) - X_L} \quad (III- 30)$$

$$X_{TCSC} = X_C - (X_C + X_{LC}) \frac{2\sigma + \sin 2\sigma}{\pi} + \frac{4X_{LC}^2 \cos^2 \sigma}{X_L} \left( \frac{\rho \tan \rho\sigma - \tan \sigma}{\pi} \right) \quad (\text{III- 31})$$

$$\sigma = \pi - \alpha, \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad \rho = \omega_0 / \omega, \quad X_{LC} = \frac{X_C X_L}{X_C - X_L}$$

Où

$X_C$  : la réactance capacitive nominal;

$X_L$  : la réactance inductive.

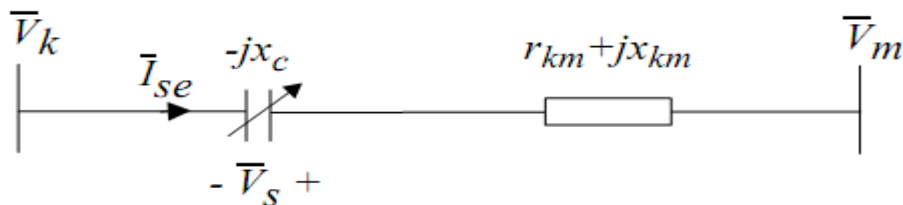
$\alpha$  : représente l'angle de retard à l'amorçage des thyristors

Le dispositif peut opérer en trois modes différents :

- a) Mode hors circuit : les thyristors sont en conduction pleine
- b) Mode bloqué : les thyristors sont bloqués
- c) Mode variable : la conduction des thyristors est contrôlée par un signal d'amorçage et donc le TCSC a une réactance contrôlables dans les régions inductives et capacitives. Ce dernier cas a un grand intérêt. Les angles d'amorçage des thyristors peuvent changer de  $90^0$  jusqu'à une valeur maximum dans une plage de fonctionnement inductif et de fonctionnement capacitif.

### III-5-1-4. Le modèle d'injection :

Dans la section suivante, le modèle d'injection de TCSC avec et sans pertes est dérivé. La figure (III-4) montre le schéma équivalent d'un TCSC :

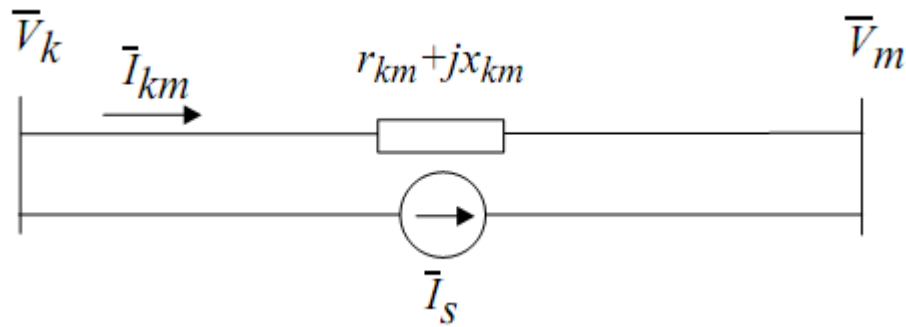


**Figure (III-4) :** Schéma équivalent d'un TCSC.

Situé entre le jeu de barres k et m dans le système de transmission. D'après la figure(III-4), nous avons :

$$\bar{I}_{se} = \frac{\bar{V}_k - \bar{V}_m}{r_{km} + j(x_{km} - x_c)} \quad (\text{III- 32})$$

L'influence du condensateur est équivalente à une source de tension qui dépend des tensions  $V_k$  et  $V_m$ . Le modèle d'injection est obtenu en remplaçant la tension de la source par une source de courant équivalent comme montré dans la figure(III-5).



**Figure (III-5) :** Modèle d'injection : représentation en source de courant.

On à :

$$\bar{V}_s = -jx_c \bar{I}_{se} \quad (\text{III- 33})$$

$$\bar{I}_s = \frac{\bar{V}_s}{r_{km} + jx_{km}} = -\frac{jx_c \bar{I}_{se}}{r_{km} + jx_{km}} \quad (\text{III- 34})$$

En se basant sur le schéma unifilaire de la Figure (III-6), les puissances injectées aux niveaux des jeux de barres sont formulées par les équations suivantes :

$$\bar{S}_{ks} = \bar{V}_k (-\bar{I}_s)^* = \bar{V}_k \left( \frac{jx_c}{r_{km} + jx_{km}} \cdot \frac{\bar{V}_k - \bar{V}_m}{r_{km} + j(x_{km} - x_c)} \right)^* \quad (\text{III- 35})$$

$$\bar{S}_{ms} = \bar{V}_m (-\bar{I}_s)^* = \bar{V}_m \left( \frac{-jx_c}{r_{km} + jx_{km}} \cdot \frac{\bar{V}_k - \bar{V}_m}{r_{km} + j(x_{km} - x_c)} \right)^* \quad (\text{III- 36})$$

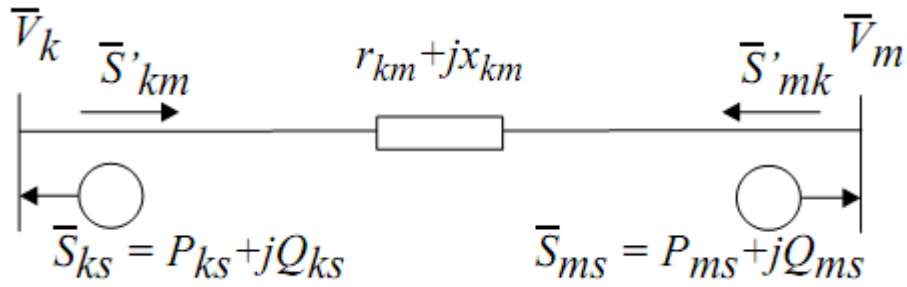


Figure (III-6) : Modèle d'injection : puissance injectées équivalentes.

Les composantes actives et réactives des sources d'injection sont avec la résistance de ligne négligée  $r_{km}=0$

$$P_{ks} = -B_e V_k V_m \sin(\theta_k - \theta_m) \quad (\text{III- 37})$$

$$P_{ms} = -P_{ks} \quad (\text{III- 38})$$

$$Q_{ks} = -B_e (V_k^2 - V_k V_m \cos(\theta_k - \theta_m)) \quad (\text{III- 39})$$

$$Q_{ms} = -B_e (V_m^2 - V_m V_k \cos(\theta_m - \theta_k)) \quad (\text{III- 40})$$

Ou

$$B_e = -\frac{x_c}{x_{km}-x_c} \cdot \frac{1}{x_{km}} \quad (\text{III- 41})$$

## IV.2. Emplacement optimal des systèmes FACTS

Un grand nombre de travaux de recherche a été réalisé sur la détermination de l'emplacement optimal de dispositifs FACTS dans un réseau électrique. Ils se différencient principalement les uns des autres par :

- Les régimes de fonctionnement pour lesquels les dispositifs sont installés ;
- Les modèles adoptés pour les dispositifs FACTS ;
- Les méthodes et les critères d'optimisation ;
- La taille et la topologie des réseaux utilisés dans les simulations.

L'emplacement optimal des systèmes FACTS est un axe de recherche très important. Beaucoup de méthodes ont été proposées pour optimiser l'emplacement des dispositifs FACTS, ces méthodes différentes selon le type du compensateur (shunt, série ou hybride), d'une manière générale, le bon emplacement permet d'améliorer les points suivants :

- ✚ Réduction des pertes de puissance active d'une ligne particulière.
- ✚ Réduction des pertes de puissance totale du système.
- ✚ Réduction des surcharges dans les lignes.
- ✚ Réduction de la déviation de tension.

Pour les compensateurs FACTS type série, plusieurs indices ont été proposés pour le choix optimal de l'emplacement de ces compensateurs, dans cette étude l'indice suivant est utilisé pour le choix de l'emplacement du compensateur TCSC.

$$a_{ij} = \frac{\partial Q_L}{\partial a_{ij}} \quad (\text{III- 42})$$

$$\frac{\partial Q_L}{\partial a_{ij}} = \frac{[V_i^2 + V_j^2 - 2V_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)]}{(R_{ij}^2 - X_{ij}^2)^2} (R_{ij}^2 - X_{ij}^2) \quad (\text{III- 43})$$

### Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présentés en premier lieu le noyau mathématique qui est l'écoulement de puissance basé sur la méthode de Newton-Raphson permettant de calculer les tensions, les puissances transitées ainsi que les pertes totales. La deuxième partie présente la modélisation du compensateur série ainsi que son intégration dans le problème de l'écoulement de puissance, finalement nous avons exposé en bref l'importance de l'emplacement du compensateur TCSC dans les réseaux électriques.



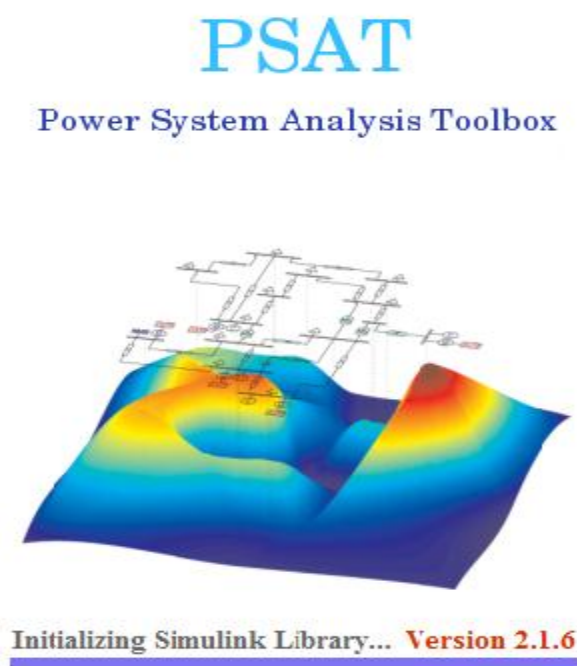
### IV. Introduction

MATLAB est un moyen efficace pour résoudre plusieurs problèmes liés au domaine de modélisation et d'optimisation. Il dispose d'un compilateur en langage de haut niveau très proche de techniques d'écriture naturelles. Il possède une vaste collection de fonctions bien conçues et des outils pour aider à toutes sortes d'applications. La simulation réalisée dans le cadre de ce projet est réalisée par PSAT basé sur l'environnement MATLAB.

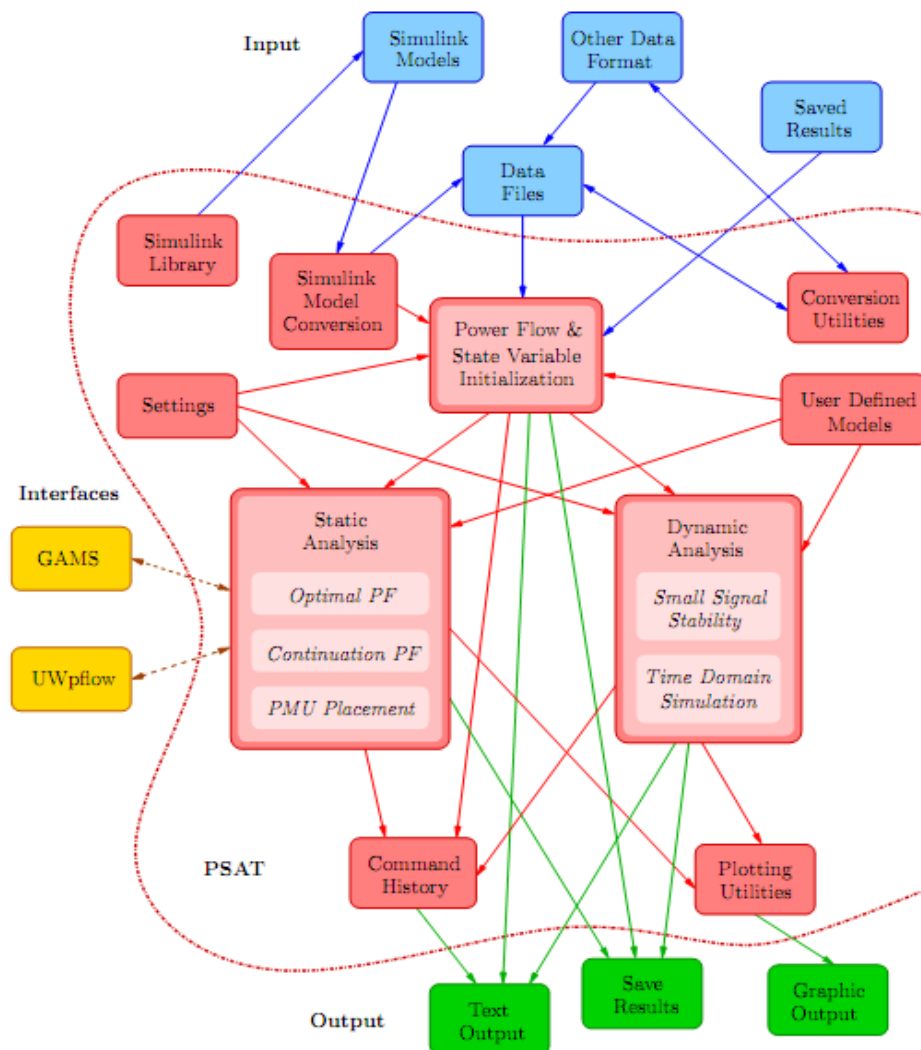
#### IV.1. Analyse des réseaux électriques par le logiciel (PSAT)

PSAT est un logiciel librement distribué conçu par Federico Milano basé sur MATLAB pour l'analyse et l'optimisation des réseaux électriques. L'interface graphique interactive du PSAT permet à l'utilisateur de calculer :

- Ecoulement de puissance par la méthode de Newton Raphson.
- Accroissement continue de la charge (Continuation power flow)
- Optimisation de l'écoulement de puissance (Optimal power flow)
- Analyse de la stabilité des réseaux électriques.
- Intégration des systèmes FACTS dans les réseaux de transport.



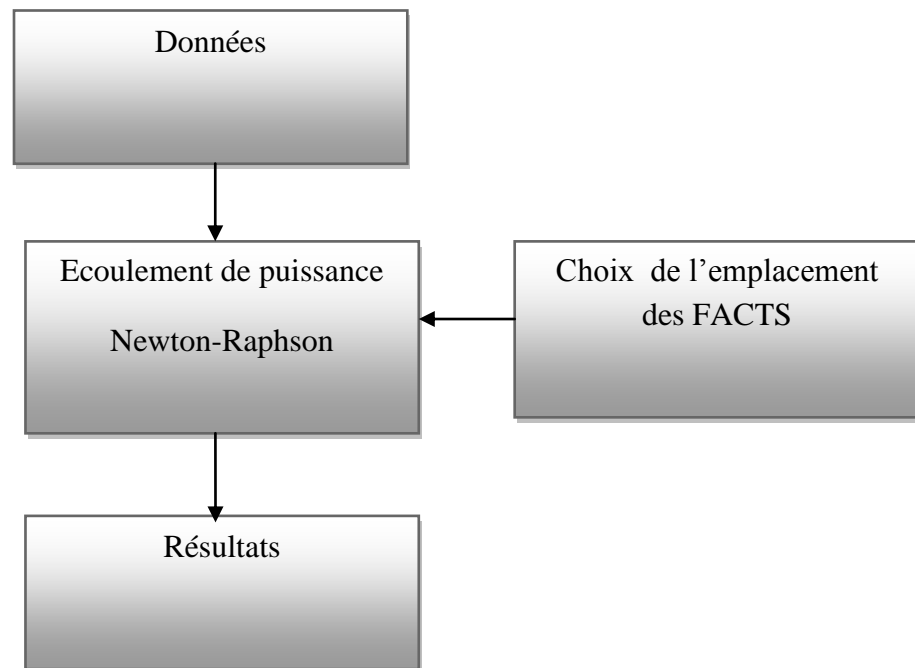
**Figure(IV.1) :** Interface graphique du PSAT



Figure(IV.2) : Schéma synoptique du PSAT

### IV.3.Simulation

Cette partie est consacrée à la simulation de l'intégration du compensateur TCSC dans deux réseaux tests, le modèle d'injection du TCSC proposé dans le chapitre 3 est utilisé par PSAT. L'objectif principal est de minimiser les pertes totales par l'installation de la compensation série, l'outil de calcul utilisé et l'écoulement de puissance basé sur la méthode de Newton-Raphson, il faut noter que les contraintes de sécurité ne sont pas prises en considération, notre but dans cette étude est de voir l'effet de l'intégration de la compensation série sur les pertes actives totales. La Figure (IV.3) montre les étapes de base de simulation basées sur PSAT.

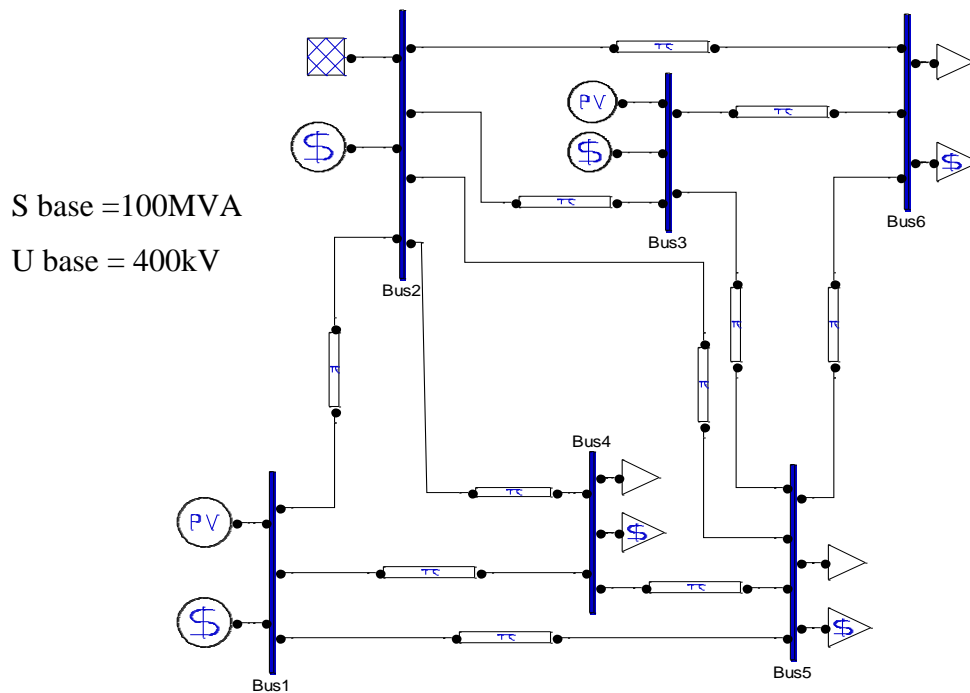


**Figure(IV.3) :** Etapes de simulation

### **IV.4.Réseau test 1: IEEE 6-Bus**

#### **IV.4.1. Régime normal (sans compensation)**

Le schéma unifilaire du réseau test « 6-bus » est montré dans la figure(IV.4). Les données des jeux de barres ainsi que les caractéristiques des branches sont indiquées dans les tableaux (IV.1- IV.2).



Figure(IV.4) : Réseau test IEEE 6 bus

Tableau (IV.1) : Données des jeux de barres

Bus (N°)	Type de bus	V (pu)	Phase (rad)	P (pu)	Q (pu)
2	référence	1.00	0.00	-	-
1	PV	1.05	0.00	0.9	-
3	PV	1.00	0.00	-	-
4	PQ	1.00	-	0.90	0.60
5	PQ	1.00	-	1.0	0.70

Tableau (IV.2) : Caractéristiques techniques des branches

Line	R (pu)	X (pu)	B (pu)	I <sub>max</sub>
2-6	0.07	0.2	0.05	0.9147
2-3	0.05	0.25	0.06	0.3082
2-5	0.1	0.3	0.04	0.7114

## Simulation et résultats

2-4	0.05	0.1	0.02	1.3740
2-1	0.1	0.2	0.04	0.2591
1-4	0.05	0.2	0.04	0.9193
1-5	0.08	0.3	0.06	0.8478
3-6	0.02	0.1	0.02	1.3973
3-5	0.12	0.26	0.05	0.6585
5-6	0.1	0.3	0.06	0.2
5-4	0.2	0.4	0.08	0.1796

Les résultats de l'écoulement de puissance de ce réseau IEEE 6 bus sont illustrés dans les Tableaux (IV.3-IV.4 et IV.5).

**Tableau (IV.3) :** Résultats de l'écoulement de puissance : tension et angle.

Bus (N°)	V (pu)	Phase (rad)	P gen (pu)	Q gen (pu)	P load (pu)	Q load (pu)
1	1.05	0.02534	0.9	0.31409	0	0
2	1.05	0	1.3988	0.65025	0	0
3	1.05	-0.03529	0.6	0.70318	0	0
4	0.98592	-0.04064	0	0	0.9	0.6
5	0.96854	-0.07261	0	0	1	0.7
6	0.99121	-0.0735	0	0	0.9	0.6

**Tableau (IV.4) :** Résultats de l'écoulement de puissance : puissances transitées et les pertes dans les branches.

from	to	Line (pu)	P flow (pu)	Q flow (pu)	P loss (pu)	Q loss (pu)
3	2	1	-0.14907	-0.00052	0.00106	-0.06087
6	3	2	-0.49297	-0.48635	0.00957	0.027
5	4	3	-0.07739	-0.0397	0.00128	-0.07385
5	3	4	-0.23475	-0.21583	0.01178	-0.02548
6	5	5	0.0199	0.0388	0.00051	-0.05607

4	2	6	-0.58578	-0.34002	0.02326	0.02578
2	1	7	-0.11103	0.03524	0.00142	-0.04127
4	1	8	-0.39289	-0.22583	0.01013	-0.00097
5	1	9	-0.37093	-0.17597	0.0136	-0.01023
6	2	10	-0.42692	-0.15245	0.01415	-0.01169
5	2	11	-0.29755	-0.17363	0.01199	-0.00483

Tableau (IV.5) : Résultats de l'écoulement de puissance : les pertes totales

<b>Pertes totales active (pu)</b>	<b>0.09875</b>
<b>Pertes totales réactive (pu)</b>	<b>-0.23248</b>

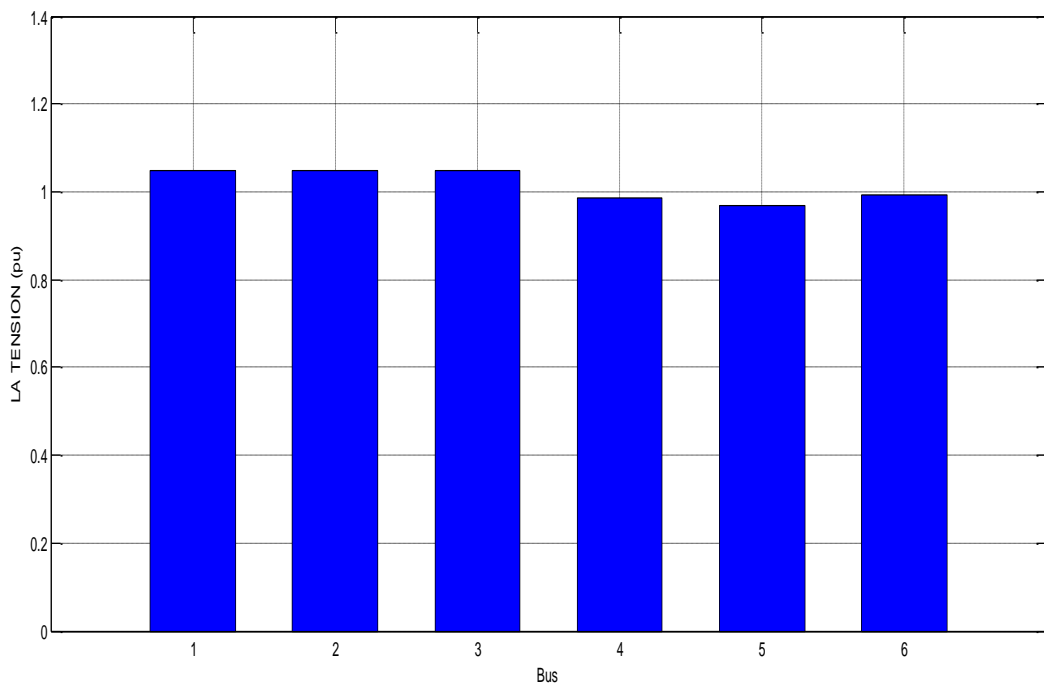
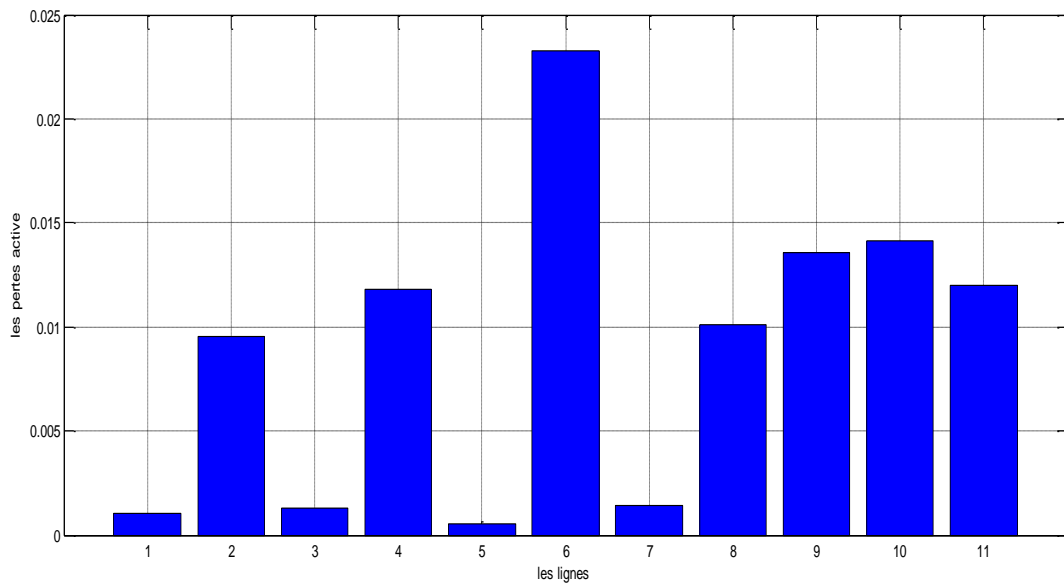
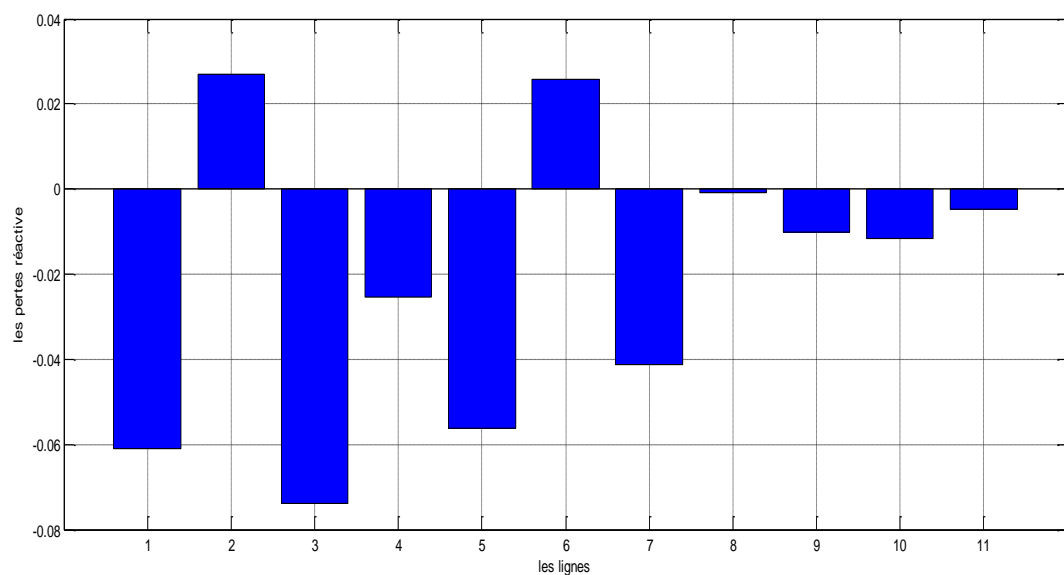


Figure (IV.5) : Profile de tension aux niveaux des jeux de barres.



**Figure(IV.6) :** Répartitions des pertes actives dans les branches :Réseau IEEE-6bus

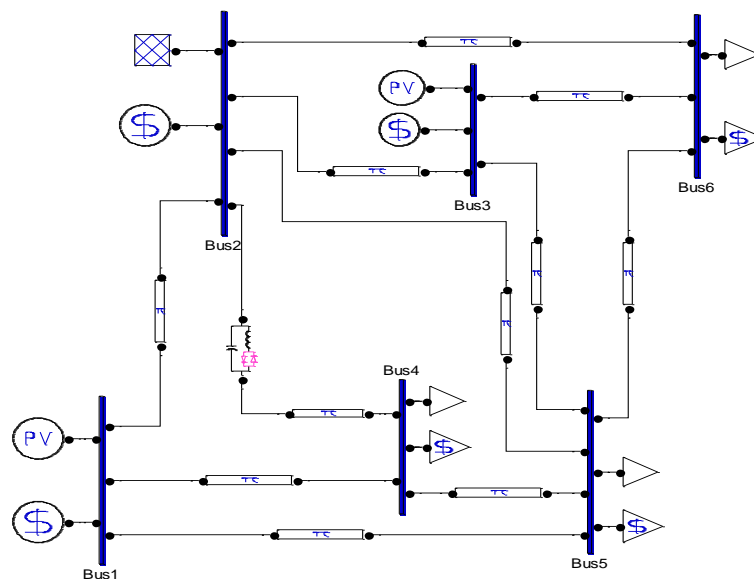


**Figure(IV.7) :** Répartitions des pertes réactives dans les branches : Réseau IEEE-6bus

D'après les résultats du tableau (IV.4) et la figure (IV.6) montrent clairement que les pertes active dans la branche 6 (entre Jb2-4) sont élevées. Cette branche est considérée comme candidate pour l'emplacement du compensateur série (TCSC) afin de réduire les pertes totales dans le réseau.

### IV.4.2.1. Régime normal (avec compensation : ligne 6)

Afin de démontrer l'efficacité de la compensation série ainsi que le bon choix de l'emplacement de cette dernière, un TCSC est installée dans la branche 6 (Jb2-4). La Figure IV.8 montre l'installation du compensateur série (TCSC) dans le réseau test IEEE 6Bus. Le tableau (IV.6) montre la variation des pertes totales en fonction du degré de compensation, qui est considéré variable entre : 10% et 70%.

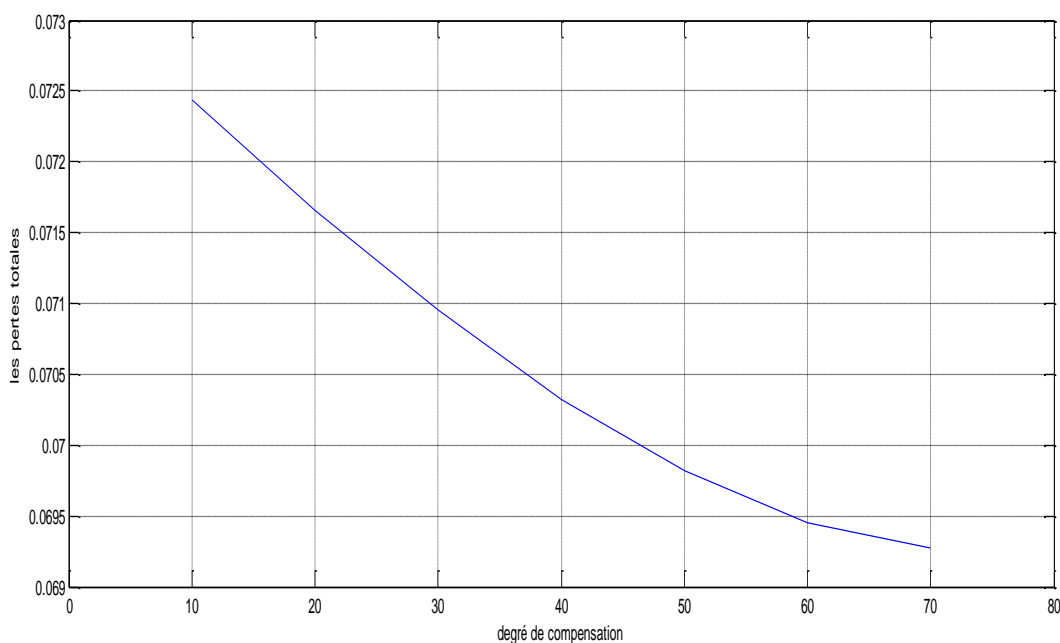


**Figure(IV.8) :** Installation d'un TCSC au niveau de la branche6 (Jb2-4)

**Tableau (IV.6) :** Variation des pertes en fonctiondu degré de compensation.

Compensation (%)	P flow (pu)	Q flow (pu)	Pertes totales active (pu)
10%	2.0149	1.8516	0.07244
20%	1.8545	1.6931	0.07166
30%	1.6823	1.5251	0.07095
40%	1.4969	1.3468	0.07032
50%	1.2968	1.1573	0.06982
60%	1.0802	0.95549	0.06945
70%	0.84486	0.74021	0.06927





**Figure(IV.9) :** Variation des pertes totales en fonction du degré de compensation.

Après avoir installé le compensateur série (TCSC), on remarque une réduction des pertes totales par rapport au régime normal sans compensation.

#### IV.4.2.2. Cas normal (avec compensation de la ligne 5)

Cette section est consacrée à prouver l'importance de l'emplacement du compensateur série. Le TCSC est installé dans la branche 5 (Jb6-5). Les résultats de l'écoulement de puissance pour un degré de compensation de 50% sont récapitulés dans le Tableau (IV.7).

**Tableau (IV.7) :** Pertes totales : Emplacement du TCSC à la branche 5 (Jb6-5)

Compensation (%)	P flow (pu)	Q flow (pu)	Pertes totales active (pu)
50%	0.05553	0.53586	0.09957

on remarque que les pertes totales engendrées sont supérieures à celle trouvées par l'emplacement du compensateur TCSC dans la branche 6, on peut conclure que le meilleur emplacement de TCSC est dans la ligne 6.

### IV.4.2.3.Cas anormal (avec augmentation de la charge de 10% sans compensation)

Pour ce cas, nous avons réaliser une augmentation uniforme de la charge selon les formules suivantes :

$$P_{ch(new)}= P_{ch(nom)}*\gamma$$

$$Q_{ch(new)}= Q_{ch(nom)}*\gamma$$

avec  $\gamma = 1.1$  : facteur de surcharge

Les résultats de l'écoulement de puissance sont récapitulés dans les tableaux (IV.8 et IV.9).On remarque que les pertes totales sont augmentés à la valeur 0.1244(p.u), cette augmentation de la charge à engendré une déviation detension dans quelques jeux de barres.

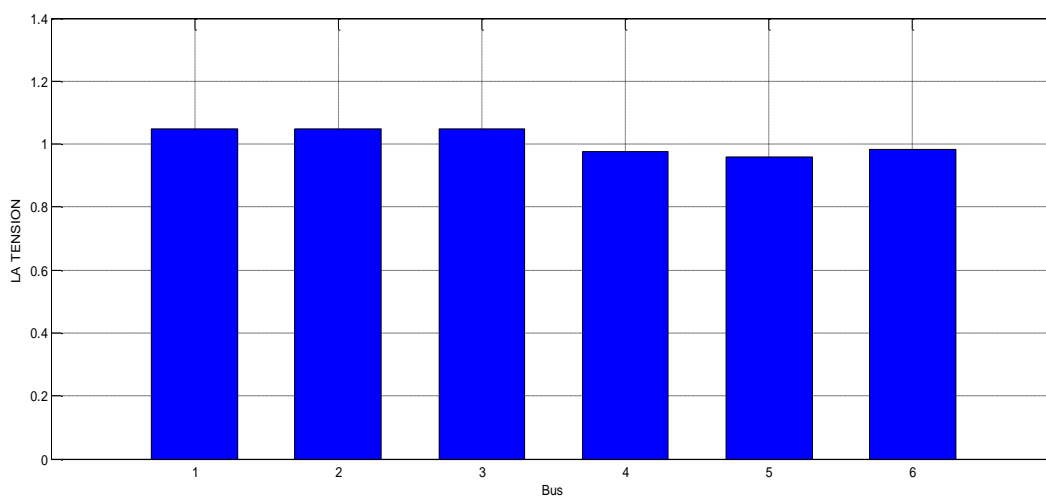
**Tableau(IV.8) :** Résultats de l'écoulement de puissance avec augmentation de la charge (=10%)

<b>Bus (N°)</b>	<b>V (pu)</b>	<b>Phase (rad)</b>	<b>P gen (pu)</b>	<b>Q gen (pu)</b>	<b>P load (pu)</b>	<b>Q load (pu)</b>
<b>1</b>	1.05	0.01769	0.9	0.40463	0	0
<b>2</b>	1.05	0	1.7044	0.71001	0	0
<b>3</b>	1.05	-0.04695	0.6	0.82359	0	0
<b>4</b>	0.97761	-0.04876	0	0	0.99	0.6
<b>5</b>	0.95772	-0.08599	0	0	1.1	0.77
<b>6</b>	0.98366	-0.08675	0	0	0.99	0.66

## Simulation et résultats

**Tableau (IV.9):**Résultats de l'écoulement de puissance : puissances transitées dans les lignes avec augmentation de la charge 10% :

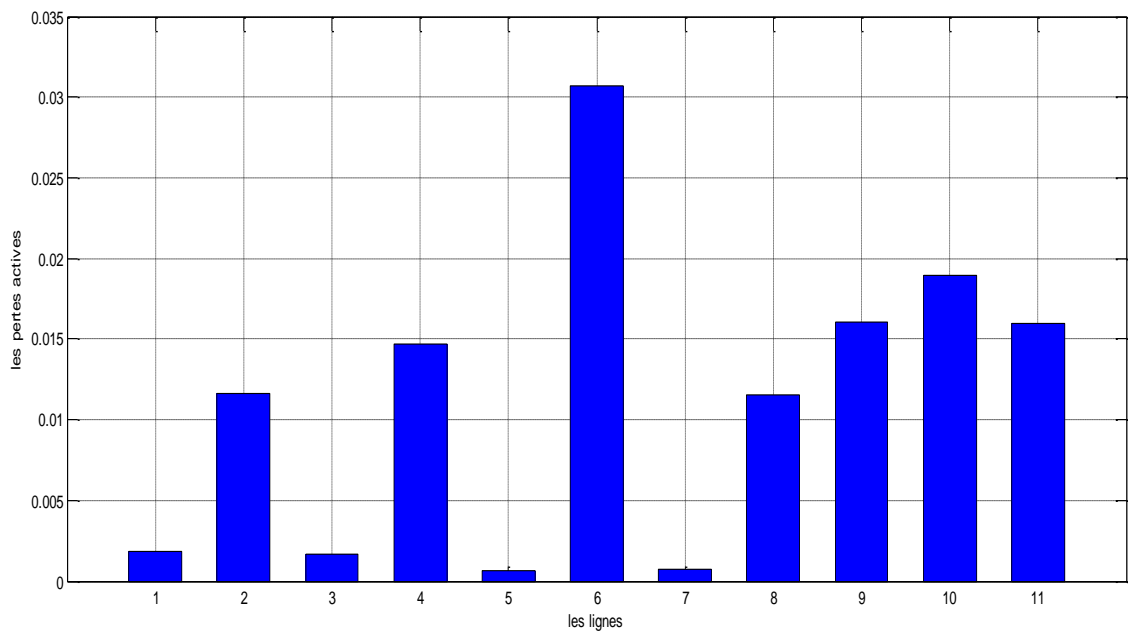
from	to	Line	P flow (pu)	Q flow (pu)	P loss (pu)	Q loss (pu)
3	2	1	-0.19807	0.0114	0.00187	-0.05681
6	3	2	-0.51909	-0.55021	0.01161	0.03734
5	4	3	-0.0881	-0.03864	0.00169	-0.07153
5	3	4	-0.25267	-0.24328	0.0147	-0.01863
6	5	5	0.02338	0.04824	0.00067	-0.05452
4	2	6	-0.67844	-0.36582	0.03072	0.04086
2	1	7	-0.07767	0.01765	0.00069	-0.04272
4	1	8	-0.40135	0.26129	0.0115	0.00482
5	1	9	-0.39276	-0.19937	0.01603	-0.00048
6	2	10	-0.49428	-0.15803	0.01897	0.00245
5	2	11	-0.34377	-0.18596	0.01595	0.00745



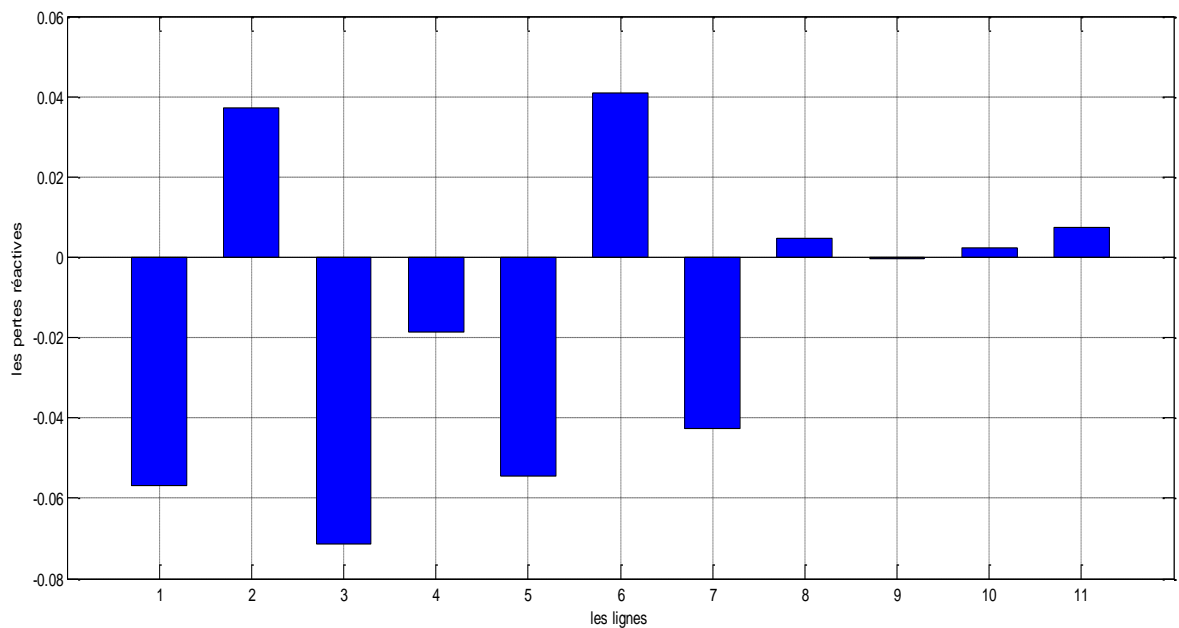
**Figure(IV.10) :** La tension de chaque jeu barre avec augmentation de la charge

Les pertes totale de cette augmentation est comme montré le tableau (IV.10)

<b>Pertes totales active (pu)</b>	0.1244
<b>Pertes totales réactive (pu)</b>	-0.15178



**Figure(IV.11) :** Les pertes actives avec augmentation de la charge de 10% : sans compensation

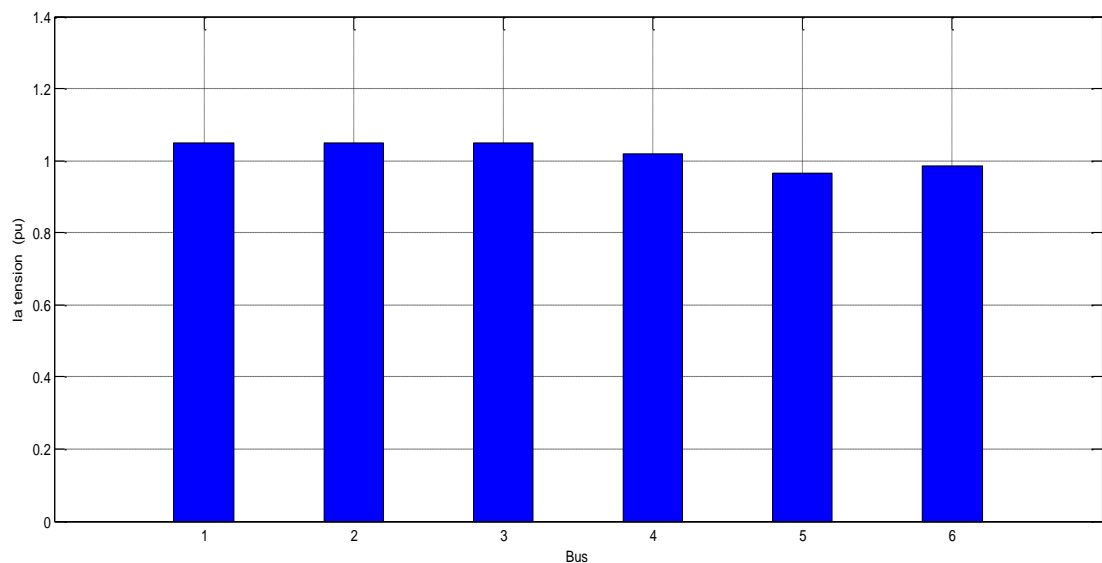


**Figure(IV.12) :** Les pertes réactives avec augmentation de la charge de 10% sans compensation.

#### IV.4.2.4.Cas anormal (avec augmentation de la charge de 10% avec compensation)

Tableau(IV.11) : Résultats de l'écoulement de puissance avec augmentation de la charge de 10% après la compensation de la ligne 6 de degré de compensation 50%.

Bus (N°)	V (pu)	Phase (rad)	P gen (pu)	Q gen (pu)	P load (pu)	Q load (pu)
1	1.05	0.02763	0.9	0.15235	0	0
2	1.05	0	1.6657	0.96765	0	0
3	1.05	-0.04298	0.6	0.78421	0	0
4	1.0193	-0.03623	0	0	0.99	0.6
5	0.96468	-0.07924	0	0	1.1	0.77
6	0.98512	-0.08324	0	0	0.99	0.66

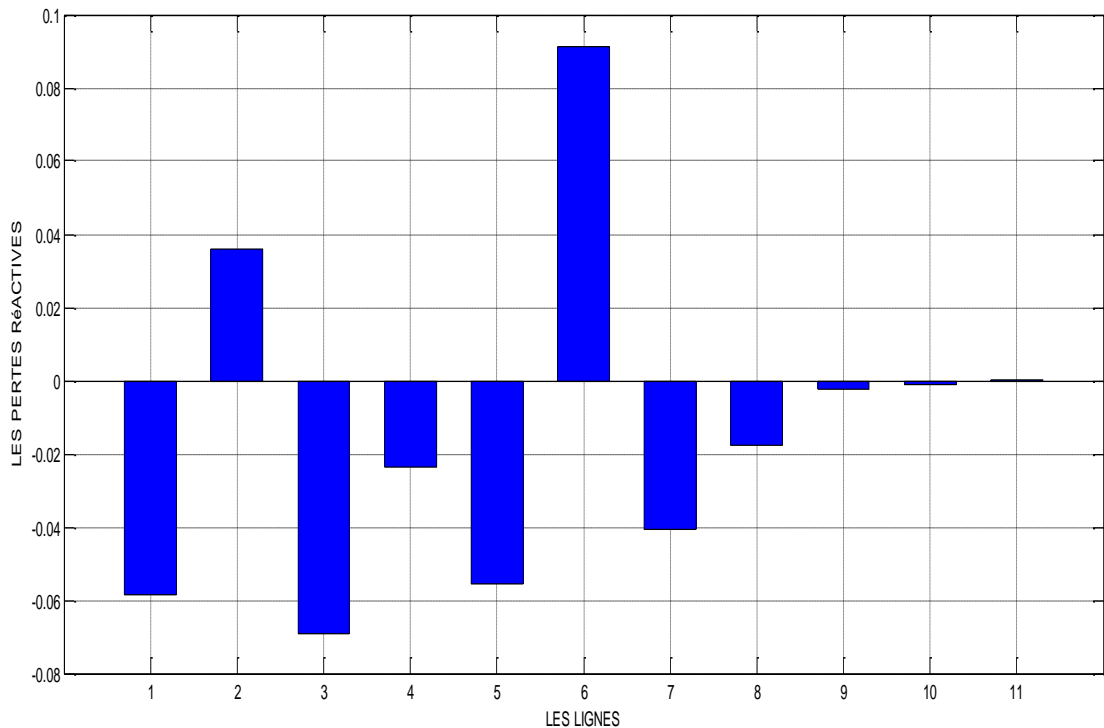


Figure(IV.13) : Profile de tension : après la compensation

Tableau(IV.12) : Puissances transités dans les lignes

from	to	Line	P flow (pu)	Q flow (pu)	P loss (pu)	Q loss (pu)
3	2	1	-0.18143	0.00728	0.00157	-0.05832
6	3	2	-0.5216	-0.53618	0.01132	0.03587

5	4	3	-0.13634	-0.09851	0.0048	-0.06918
5	3	4	-0.23591	-0.2284	0.0126	-0.02352
6	5	5	0.00875	0.03512	0.00043	-0.05573
4	2	6	-1.5106	-1.192	0	0.09147
2	1	7	-0.12099	0.04055	0.00168	-0.04073
4	1	8	-0.39976	-0.07743	0.00624	-0.01786
5	1	9	-0.39976	-0.17642	0.01563	-0.00237
6	2	10	-0.47715	-0.15894	0.01773	-0.00116
5	2	11	-0.31968	-0.17582	0.01364	0.00025



**Figure(IV.14) :** Les pertes réactives après la compensation

La section suivant représente une comparaison de compensation entre les branches 6 et 5 avec augmentation de charge de 10%, la variation des pertes totales par rapport la branche 5 est récapitulée dans le tableau(IV.13). La figure (IV.15) montre les pertes totales a la branche 6 et 5 en augmentation de la charge en fonction degré de

## Simulation et résultats

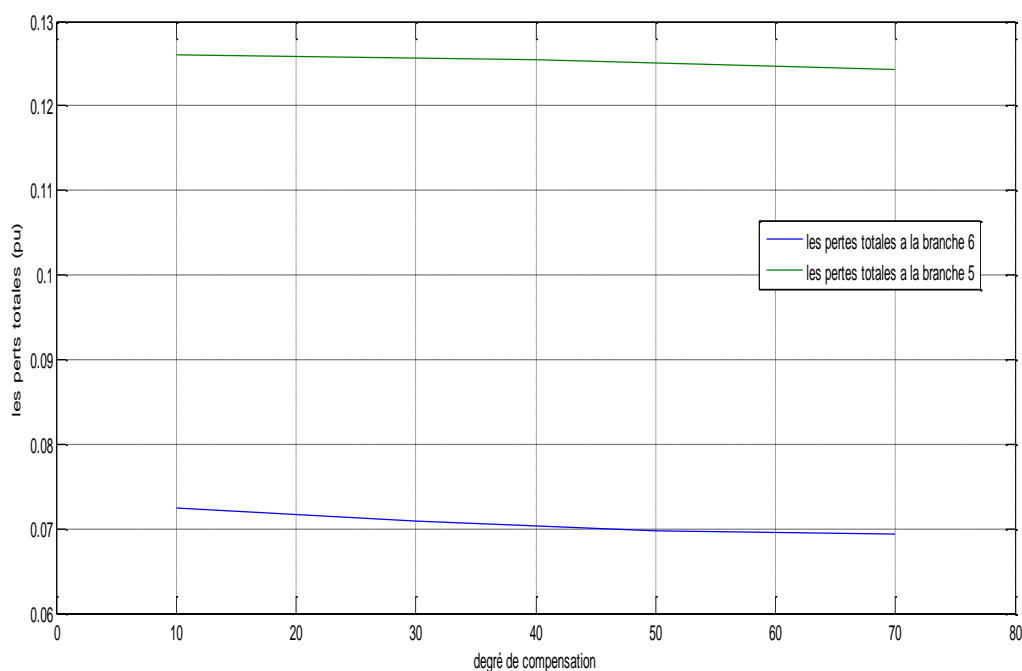
compensation de 10% à 70%, d'après cette figure on a remarqué que les pertes totales dans la branche 5 est supérieur par rapport à la branche 6 .

On peut dire que l'emplacement optimale de compensateur série TCSC est dans la branche 6

**Tableau (IV.13) :** Variation des pertes totales en fonction du degré de compensation:

Compensation de la branche 5 (jb6-5)

Compensation (%)	Pertes totales active (pu)
10%	0.12613
20%	0.12592
30%	0.12568
40%	0.12541
50%	0.12509
60%	0.12472
70%	0.12429

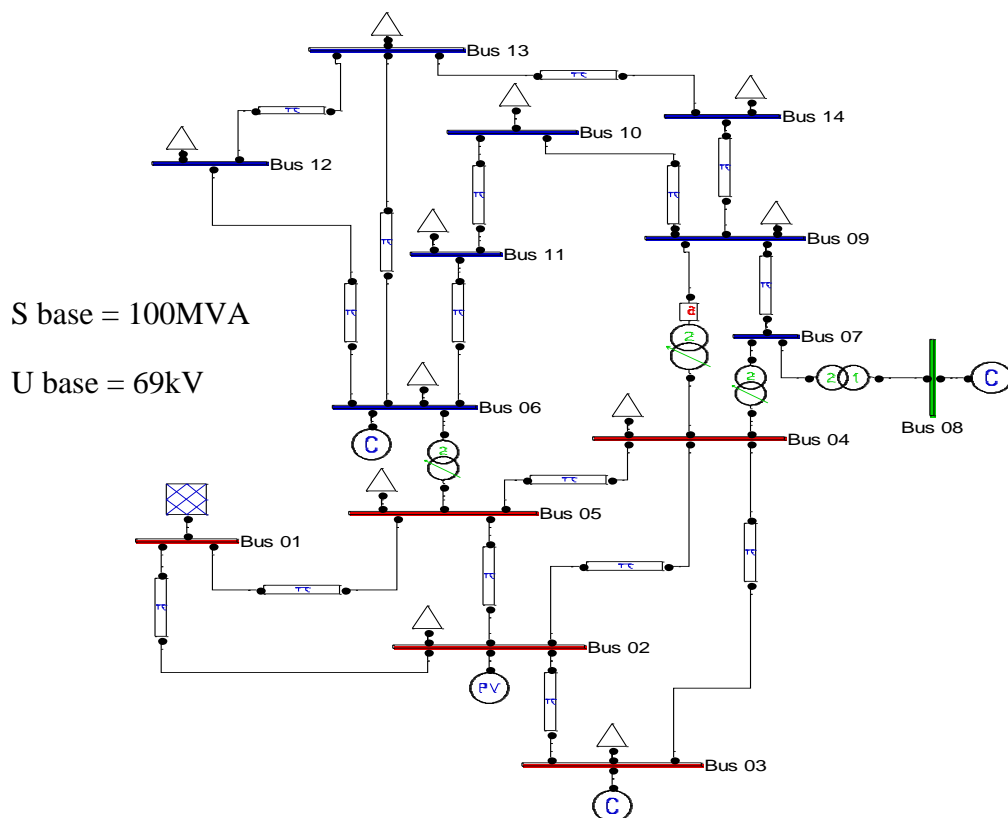


**Figure(IV.15) :** Comparaison des pertes totales en fonction du degré de compensation: compensation des branches 5 et 6.

## IV.5. réseau test IEEE 14 bus

### IV.5.1. Cas normal sans compensation

Le schéma unifilaire du système de test de 14 bus est montré dans la figure (IV.16), les données du réseau sont données dans les tableaux (IV.14, 15, 16, 17, 18).



Figure(IV.16) : Réseau test IEEE 14 bus

Tableau (IV.14) : Les données du jeu de barre de référence

Bus	V (pu)	Phase (rad)	P (pu)
1	1.06	0.00	2.324

Tableau (IV.15) : les données du jeu de barre PV



## Simulation et résultats

Bus	V (pu)	Phase (rad)	P (pu)
6	1.07	0.00	0.00
2	1.045	0.00	0.40
3	1.010	0.00	0.00
8	1.090	0.00	0.24
14	1.000	0.00	0.00

**Tableau (IV.16) :** les données du jeu de barre PQ

Bus	P (pu)	Q (pu)
13	0.135	0.058
12	0.061	0.016
11	0.035	0.018
10	0.090	0.058
6	0.112	0.075
5	0.076	0.016
9	0.295	0.166
14	0.149	0.050
2	0.217	0.127
3	0.942	0.190
4	0.478	0.039

**Tableau (IV.17) :** Les données des branches

ligne	R (pu)	X (pu)	B (pu)
1-2	0.01938	0.05917	0.0528
1-5	0.05403	0.22304	0.0492
2-5	0.05695	0.17388	0.0346
2-3	0.04699	0.19797	0.0438
2-4	0.05811	0.17632	0.0340
3-4	0.06701	0.17030	0.0128
4-5	0.01335	0.04211	0.000
6-12	0.12291	0.25581	0
6-13	0.06615	0.13027	0
6-11	0.09498	0.19890	0
6-14	0.12711	0.27038	0
9-10	0.03181	0.08450	0
10-11	0.08205	0.19207	0
13-12	0.22092	0.19988	0

## Simulation et résultats

13-14	0.17093	0.34802	0
-------	---------	---------	---

**Tableau (IV.18) :** Les données des transformateurs

ligne	KV/KV	R (pu)	X (pu)
6-5	69/13.8	0	0.25202
4-7	69/13.8	0.0	0.20912
9-4	69/13.8	0.005	0.55618
7-8	13.8/18	0	0.17615
7-4	69/13.8	0	0.20912

Les résultats de l'écoulement de puissance de ce réseau IEEE 14 bus sont illustrés dans les Tableaux (IV.19-IV.20 et IV.21). Les pertes actives totales sont 0.29452p.u.

**Tableau (IV.19) :** Résultats de l'écoulement de puissance : Régime normal (sans compensation série).

bus	V	Phase <sup>0</sup>	Pg	Qg	P load	Q load
1	1.06	0	3.5205	-0.27899	0	0
2	1.045	-0.13555	0.4	0.95134	0.3038	0.1778
3	1.01	-0.3316	0	0.59796	1.3188	0.266
4	0.99772	-0.26346	0	0	0.6692	0.056
5	1.0024	-0.22748	0	0	0.1064	0.0224
6	1.07	-0.37954	0	0.44264	0.1568	0.105
7	1.0347	-0.3539	0	0	0	0
8	1.09	-0.3539	0	0.34242	0	0
9	1.0111	-0.40186	0	0	0.413	0.2324
10	1.0105	-0.40493	0	0	0.126	0.0812
11	1.0346	-0.39504	0	0	0.049	0.0252
12	1.0461	-0.40144	0	0	0.0854	0.0224
13	1.0362	-0.40319	0	0	0.189	0.0812
14	0.99568	-0.42852	0	0	0.2086	0.07

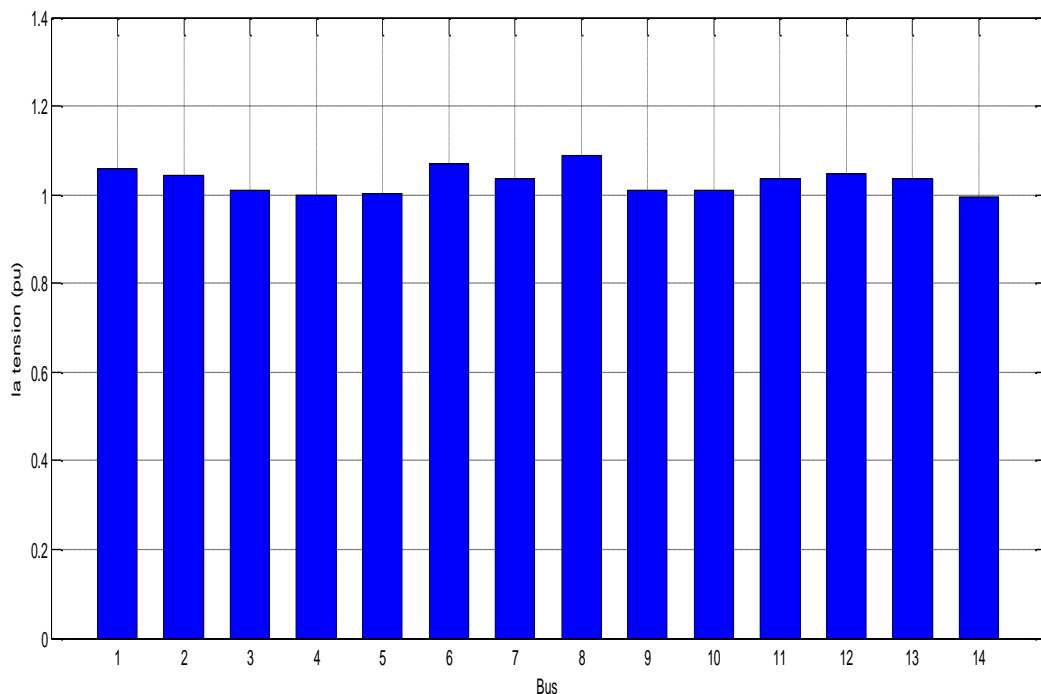
**Tableau (IV.20) :** Puissances transités dans les lignes.

from	to	line	P flow	Q flow	P loss	Q loss
2	5	1	0.58278	0.07227	0.01814	0.01975
6	12	2	0.11726	0.04464	0.00169	0.00352
12	13	3	0.03017	0.01873	0.00025	0.00023
6	13	4	0.27313	0.14163	0.00547	0.01077
6	11	5	0.14449	0.12199	0.00297	0.00621

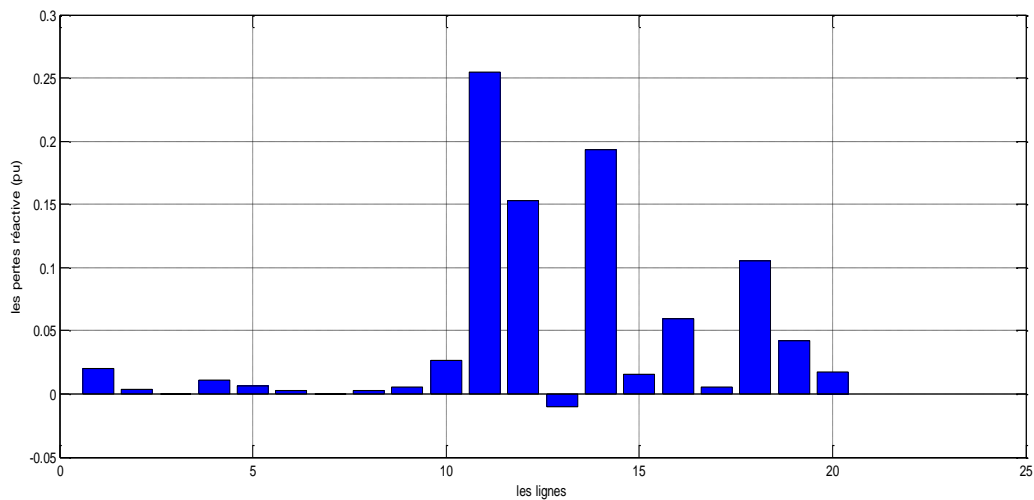
11	10	6	0.09253	0.09057	0.00129	0.00301
9	10	7	0.0348	-0.00626	4e-005	0.0001
9	14	8	0.104	0.01006	0.00136	0.00289
14	13	9	-0.10596	-0.06283	0.00262	0.00533
7	9	10	0.45586	0.23268	0	0.02692
1	2	11	2.415	-0.38021	0.10271	0.2551
3	2	12	-1.0003	0.13866	0.04729	0.15297
3	4	13	-0.31849	0.1933	0.00959	-0.0104
1	5	14	1.1056	0.10122	0.05957	0.19356
5	4	15	0.81253	-0.13835	0.009	0.0156
2	4	16	0.77808	0.05165	0.03249	0.05955
4	9	17	0.09598	0.03594	5e-005	0.00551
5	6	18	0.69168	0.07613	0	0.1055
4	7	19	0.45586	-0.05009	0	0.04226
8	7	20	0	0.34242	0	0.01738

**Tableau (IV.21) : Les pertes totales**

<b>Pertes active [pu]</b>	<b>0.29452</b>
<b>Pertes réactive [pu]</b>	<b>0.91576</b>



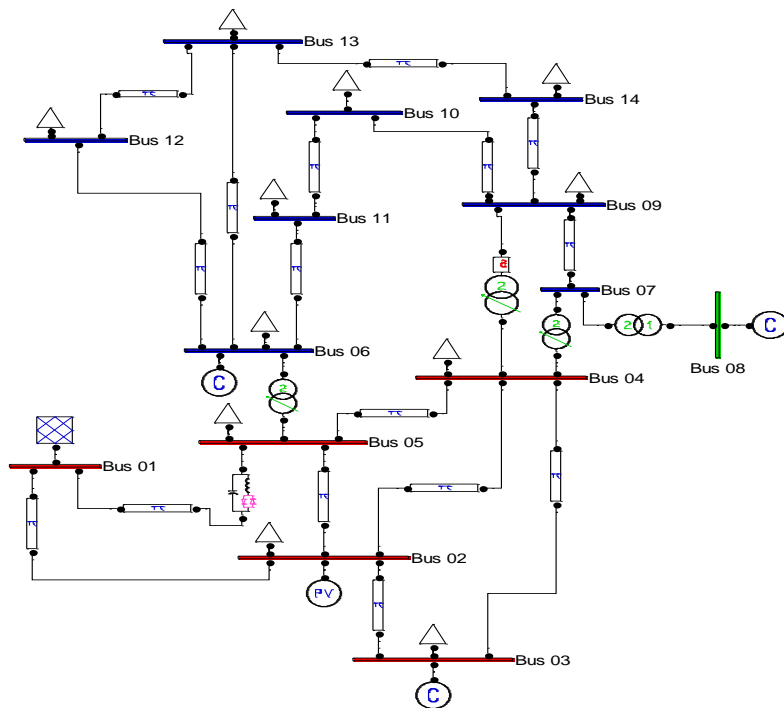
**Figure(IV.17) : Profile de tension: Réseau test : IEEE 14-Bus**



**Figure(IV.19)** Les pertes réactives dans les branches.

### IV.5.2. Cas normal avec compensation au jeu de barre 1-5

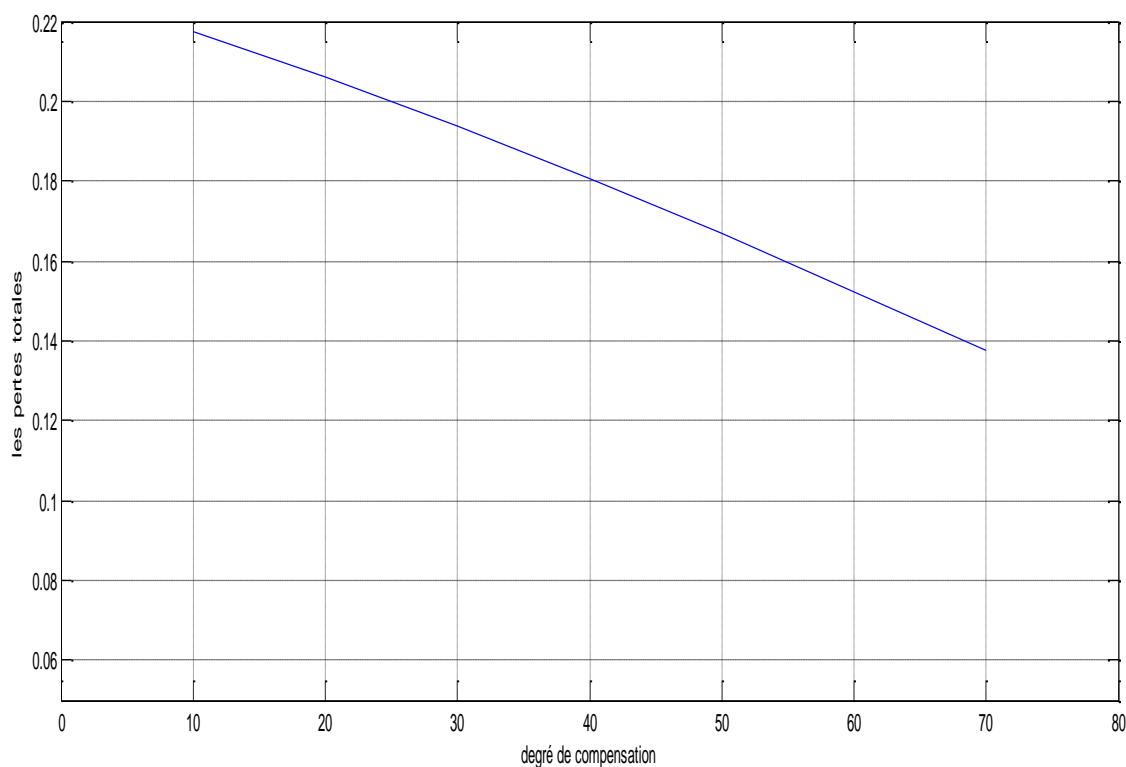
Afin de démontrer l'efficacité de la compensation série ainsi que le bon choix de l'emplacement de cette dernière, un TCSC est installée dans la branche 14 (Jb1-5). La Figure (IV.20) montre l'installation du compensateur série (TCSC) dans le réseau test IEEE 14Bus. Le tableau (IV.15) montre la variation des pertes totales en fonction du degré de compensation, qui est considéré variable entre : 10% et 70%.



Figure(IV.20) : Schéma Unifilaire Réseau test IEEE 14-bus avec TCSC

Tableau (IV.22) : Variation des pertes totales en fonction du degré de compensation.

Compensation%	P flow(pu)	Q flow (pu)	Pertes totales (pu)
10	1.228	0.39091	0.21729
20	1.2226	0.3827	0.2059
30	1.3123	0.40277	0.19368
40	1.4162	0.42468	0.18062
50	1.5381	0.4485	0.16677
60	1.6831	0.47415	0.15232
70	1.8585	0.50119	0.1377



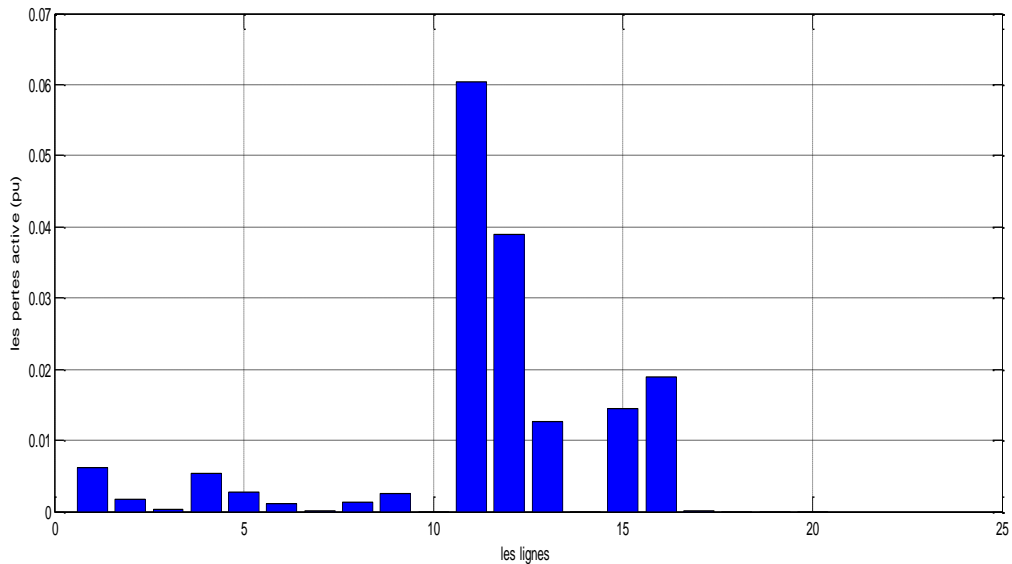
**Figure(IV.21) :** Variation des pertes actives en fonction du degré de compensation.

D'après le graphe de la figure (IV.21) et le tableau (IV.22), on remarque une réduction des pertes active totales par rapport au régime normal sans compensation.

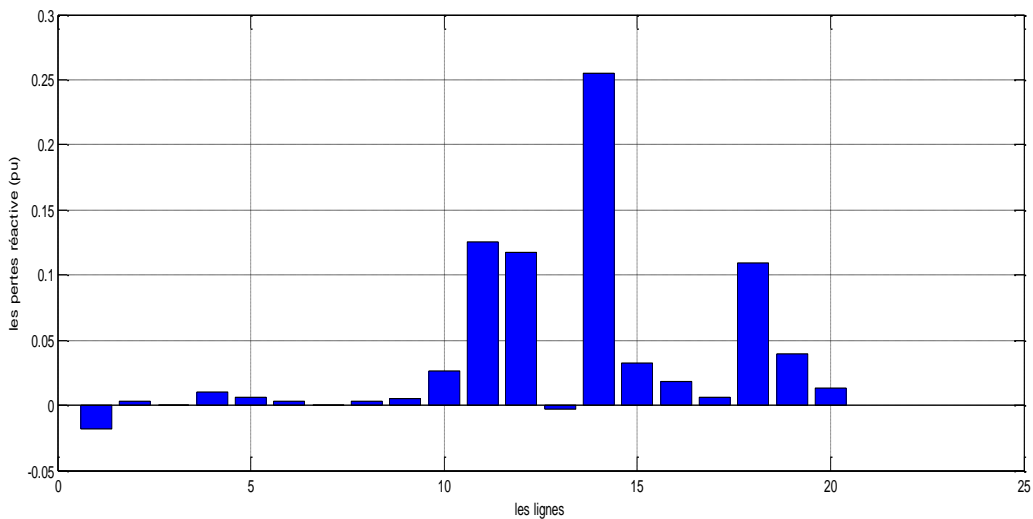
**Tableau (IV. 23) :** Les pertes avant et après la compensation : degré de 50%

from	to	line	P loss	Q loss	P loss	Q loss
2	5	1	0.01814	0.01975	0.00615	-0.01767
6	12	2	0.00169	0.00352	0.00168	0.00349
12	13	3	0.00025	0.00023	0.00024	0.00022
6	13	4	0.00547	0.01077	0.00542	0.01067
6	11	5	0.00297	0.00621	0.00281	0.00588
11	10	6	0.00129	0.00301	0.00117	0.00274
9	10	7	4e-005	0.0001	3e-005	7e-005
9	14	8	0.00136	0.00289	0.0013	0.00277
14	13	9	0.00262	0.00533	0.00251	0.00511
7	9	10	0	0.02692	0	0.02654
1	2	11	0.10271	0.2551	0.06031	0.12565
3	2	12	0.04729	0.15297	0.03893	0.11776
3	4	13	0.00959	-0.0104	0.01266	-0.00306
1	5	14	0.05957	0.19356	0	0.25478
5	4	15	0.009	0.0156	0.0145	0.03244

2	4	16	0.03249	0.05955	0.01901	0.01808
4	9	17	5e-005	0.00551	5e-005	0.00571
5	6	18	0	0.1055	0	0.10911
4	7	19	0	0.04226	0	0.03987
8	7	20	0	0.01738	0	0.01352



**Figure(IV.22) :** Les pertes actives avec degré de compensation de 50%.



**Figure(IV.23) :** Les pertes réactive avec degré de compensation de 50%.

### IV.5.3. Cas anormal avec augmentation de la charge de 20% sans compensation

Les réseaux électriques sont dynamique, afin d'assurer la fourniture de l'énergie aux consommateurs selon les normes techniques de base, l'expert chargé de la gestion des réseaux électriques doit tenir en considération l'évolution de la charge. Ce problème est simulé par une augmentation de la charge uniforme formulés comme suit :

$$Pd_{\text{new}} = Pd_{\text{Normal}} \times \tau_{\text{cr}}$$

$$Qd_{\text{new}} = Qd_{\text{Normal}} \times \tau_{\text{cr}}$$

**Pd<sub>Normal</sub>** : La puissance active demandée dans le régime normal.

**Pd<sub>new</sub>** : La puissance active demandée dans le régime anormal.

**Qd<sub>Normal</sub>** : La puissance réactive demandée dans le régime normal.

**Qd<sub>new</sub>** : La puissance réactive demandée dans le régime anormal.

**$\tau_{\text{cr}}$**  : Taux d'accroissement de la charge.

Pour ce cas, nous avons estimés une augmentation de la charge de 20%, les résultats de l'écoulement de puissance sont présentés dans les tableaux (IV.17, IV.18, IV.19).

**Tableau (IV.24)** : Résultats de l'EP avec augmentation de la charge de 20%.

bus	V	Phase <sup>rad</sup>	Pg	Qg	P load	Q load
1	1.06	0	4.4586	-0.32648	0	0
2	1.045	-0.17362	0.4	1.3746	0.36456	0.21336
3	1.01	-0.41548	0	1.3746	1.5826	0.3192
4	0.98521	-0.33107	0	0	0.80304	0.0672
5	0.99012	-0.28635	0	0	0.12768	0.02688
6	1.07	-0.47811	0	0.65613	0.18816	0.126
7	1.0235	-0.44045	0	0	0	0
8	1.09	-0.3539	0	0.41157	0	0
9	0.99528	-0.4986	0	0	0.4956	0.27888
10	0.99518	-0.50359	0	0	0.1512	0.09744
11	1.0258	-0.49415	0	0	0.0588	0.03024
12	1.0391	-0.50596	0	0	0.10248	0.02688
13	1.0245	-0.50874	0	0	0.27216	0.11693
14	0.9757	-0.53547	0	0	0.25032	0.084



**Tableau (IV.25) :** Résultats de l'EP des lignes avec augmentation de la charge de 20%

from	to	line	P flow	Q flow	P loss	Q loss
2	5	1	0.71327	0.11541	0.02747	0.04863
6	12	2	0.14949	0.05928	0.00278	0.00578
12	13	3	0.04424	0.02662	0.00055	0.00049
6	13	4	0.35721	0.19597	0.00959	0.01889
6	11	5	0.16478	0.15977	0.00437	0.00915
11	10	6	0.10161	0.12038	0.00194	0.00453
9	10	7	0.05162	-0.01816	0.0001	0.00026
9	14	8	0.13712	0.01005	0.00243	0.00516
14	13	9	-0.11563	-0.07911	0.00352	0.00718
7	9	10	0.53818	0.27811	0	0.03854
1	2	11	3.0834	-0.4894	0.16763	0.4533
3	2	12	-1.2141	0.24245	0.07113	0.25341
3	4	13	-0.36848	0.29386	0.01529	0.00459
1	5	14	1.3753	0.16292	0.09269	0.33089
5	4	15	0.98104	-0.17856	0.01351	0.03013
2	4	16	0.95271	0.09221	0.04897	0.11003
4	9	17	0.14627	0.04375	0.00011	0.01254
5	6	18	0.85965	0.05048	0	0.16559
4	7	19	0.53818	-0.04819	0	0.06017
8	7	20	0	0.41157	0	0.02511

**Tableau (IV.26) :** Les pertes totales

<b>Pertes active [pu]</b>	<b>0.46207</b>
<b>Pertes réactive [pu]</b>	<b>1.5844</b>

#### IV.5.4. Cas anormal avec augmentation de la charge de 20% avec compensation

Les résultats de l'écoulement de puissance sont récapitulés dans les tableaux(IV.20, 21, 22) .Les pertes totales sont 0.2577p.u.

**Tableau (IV.27) :** Les résultats de l'EP avec augmentation de la charge (20%) : degré de compensation 50%.

bus	V	Phase <sup>rad</sup>	Pg	Qg	P load	Q load
1	1.06	0	4.2543	0.20356	0	0
2	1.045	-0.13203	0.4	0.87175	0.36456	0.21336
3	1.01	-0.34937	0	0.73976	1.5826	0.3192

## Simulation et résultats

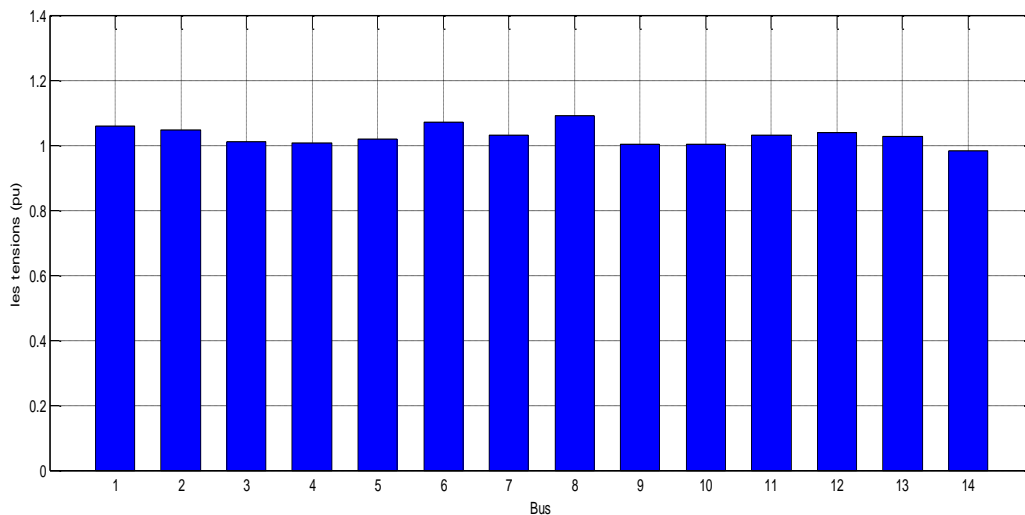
4	1.0041	-0.25118	0	0	0.80304	0.0672
5	1.0196	-0.19742	0	0	0.12768	0.02688
6	1.07	-0.38576	0	0.48823	0.18816	0.126
7	1.0319	-0.3566	0	0	0	0
8	1.09	-0.3566	0	0.3594	0	0
9	1.003	-0.41329	0	0	0.4956	0.27888
10	1.0016	-0.41698	0	0	0.1512	0.09744
11	1.029	-0.40473	0	0	0.0588	0.03024
12	1.0397	-0.41394	0	0	0.10248	0.02688
13	1.0256	-0.41732	0	0	0.27216	0.11693
14	0.98071	-0.44716	0	0	0.25032	0.084

**Tableau (IV.28) :** Les résultats de l'EP avec augmentation de la charge (20%) : degré de compensation 50%.

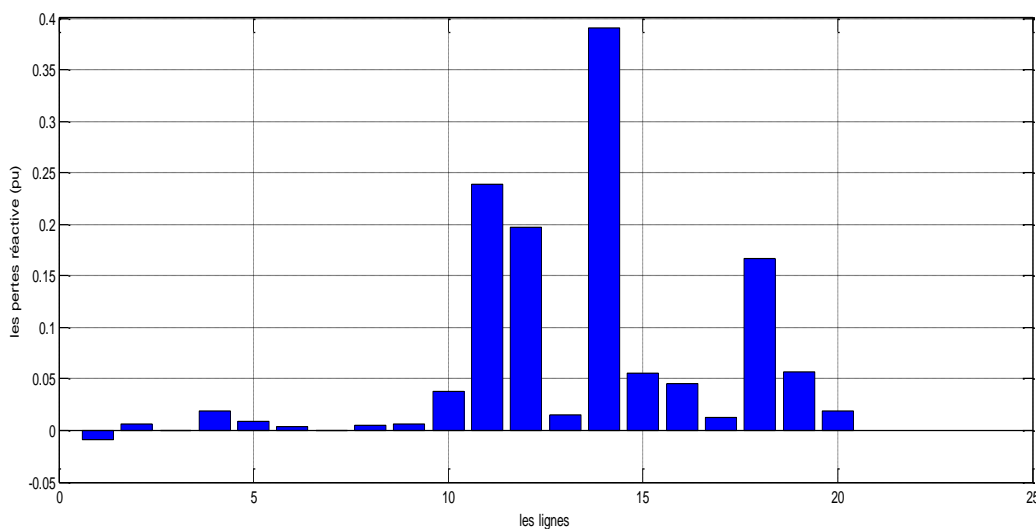
from	to	line	P flow	Q flow	P loss	Q loss
2	5	1	0.41066	0.01278	0.00885	-0.00923
6	12	2	0.14971	0.05656	0.00275	0.00572
12	13	3	0.04448	0.02396	0.00052	0.00047
6	13	4	0.36007	0.18571	0.00948	0.01868
6	11	5	0.17168	0.13961	0.00406	0.00851
11	10	6	0.10882	0.10086	0.00171	0.00399
9	10	7	0.04415	0.00074	6e-005	0.00016
9	14	8	0.13356	0.02208	0.00232	0.00493
14	13	9	-0.11908	-0.06685	0.00331	0.00675
7	9	10	0.5331	0.28618	0	0.03782
1	2	11	2.3534	-0.36884	0.09752	0.23924
3	2	12	-1.1002	0.18567	0.05775	0.19707
3	4	13	-0.48233	0.23489	0.01947	0.01461
1	5	14	1.9008	0.5724	0	0.39113
5	4	15	1.3053	-0.00981	0.02188	0.05592
2	4	16	0.72271	0.02615	0.02791	0.04541
4	9	17	0.14033	0.06578	0.00011	0.01244
5	6	18	0.86962	0.1862	0	0.16655
4	7	19	0.5331	0.00231	0	0.05638
8	7	20	0	0.3594	0	0.01915

**Tableau (IV.29) :** Les pertes totales : après compensation : (50%)

<b>Pertes active [pu]</b>	<b>0.2577</b>
<b>Pertes réactive [pu]</b>	<b>1.2757</b>



**Figure (IV, 24) :** Profile de tension après la compensation.



**Figure(IV.26) :** Les pertes réactives dans les branches après la compensation

### Conclusion

L'introduction du compensateur série TCSC dans les réseaux électriques a montré une amélioration de l'état du réseau, en terme de réduction des pertes actives, pour le réseau test IEEE 6-Bus, les résultats partiels montrent que la branche 6 est considéré comme emplacement efficace. Pour le réseau test IEEE 14-Bus, lorsque le TCSC est installée dans la branche 1-5, les pertes totales sont minimales.

### *Conclusion général*

Nous avons traité le problème liée aux réseaux électriques en incorporant les dispositifs FACTS type série (TCSC). Une étude sur les dispositifs FACTS à été réalisé et en plus une étude détaillée sur les dispositifs TCSC (*définition, modélisation, incorporation dans le problème de l'écoulement de puissance*). Le logiciel PSAT est utilisé pour démontrer l'importance d'intégrer ce type de dispositif dans les réseaux pratiques.

Dans notre modeste travail, nous avons essayé d'illustrer l'utilité, l'efficacité et la rapidité de contrôle des tensions par l'insertion du contrôleur TCSC.

Les résultats obtenus montrent que le dispositif de contrôle TCSC peut jouer un rôle très important dans le domaine de contrôle flexible des puissances transitées dans les lignes.

Enfin si les systèmes TCSC sont surtout destinés au réseau de transport, des applications en réseau à moindre tension sont envisageables pour résoudre des problèmes liés notamment aux nouvelles contraintes liées à la production décentralisée.

En perspective, nous suggérons une continuité dans les domaines suivants :

- Etude de l'impact des autres dispositifs FACTS sur les réseaux d'énergie électriques.
- L'optimisation des puissances réactives et le contrôle des tensions avec l'incorporation des dispositifs FACTS.

## Bibliographie

Réf	Description
[1]	<b>Laiadi Belkacem, Krekir Mohamed Saber,</b> " Compensation dynamique de l'énergie réactive dans les réseaux électrique", Mémoire de Fin d'Etudes pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique, Université Biskra, Promotion 2005.
[2]	<b>Georges Thomasset,</b> "la conception des réseaux industriels en haute tension"
[3]	<b>Philip Moore, Peter Ashmole,</b> "Fkexible AC transmission systems part 2 Methods of transmission line compensation", Power engineering journal Decembre 1996.
[4]	Site : <a href="http://www.siemens.com">www.siemens.com</a>
[5]	<b>A. Kazemi, H. Andamim</b> "Facts devices in deregulated electric power systems", IEEE April 2004.
[6]	<b>P. Yan, A. Sekarm</b> "Steady-state analysis of power system having multiple FACTS devices using line-flow-based equations", January 2005.
[7]	<b>Philip Moore, Peter Ashmole,</b> "Fkexible AC transmission systems part 3 convensational FACTS controllers", Power engineering journal AUGUST 1997.
[8]	<b>K. Keerthivasan , V. Sharmila Deve, Jovitha Jerome, R. Ramanujam "</b> Modeling Of Svc And Tesc For Power System Dynamic Simulation"
[9]	<b>Issarachai Ngamroo, Ph.D,</b> "FACTS & HVDC Controllers", Sirindhorn International Institute of Technology Thammasat University December 16, 2004.
[10]	<b>Kabossa Saddik, Dab Mohamed Lakhder,</b> " L'impact des dispositifs de compensation dynamique FACT sur l'échange économique de l'énergie électrique", Mémoire de Fin d'Etudes pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique, Université Biskra, Promotion 2006
[11]	<b>C. Ca-nizares, S. Corsi, M. Pozzi,</b> " Modeling and Implementation of TCR and VSI Based FACTS Controllers", December 1999
[12]	<b>HAIMOUR Rachida,</b> Contrôle des Puissances Réactives et des Tensions par les Dispositifs FACTS dans un Réseau Electrique, mémoire pour l'obtention du diplôme de magister en électrotechnique,2008-2009
[13]	: <b>Rusejla Sadikovic,</b> Series Compensation, 4.07.2002
[14]	<b>MOHAMMAD HAZMIN BIN NOOR MAHADI,</b> A hybrid facts device effect of power flow analysis using matlab , 2008/2009