

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
- جامعة محمد بن أحمد - وهران 2 -  
Université Mohamed Ben Ahmed - Oran 2 -  
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle  
Département Electromécanique



## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de **MASTER**

En : **Electromécanique**

Spécialité : **Maintenance Industriel**

Thème :

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

Réalisé par :

- BELAKEHAL Youcef.
- HAMRI Radhwane.

Nom & Prénom	Grade	Établissement	En Qualité de
Dr. MOULESSEHOUL Atika	Maître de conférences B	IMSI. Oran 2	Président
Dr. HAIMOUR Rachida	Maître de conférences B	IMSI. Oran 2	Encadreur
Dr. LABAIR Hakima	Maître de conférences B	IMSI. Oran 2	Examinateur

Année universitaire 2021-2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# *Remerciements*

*Nous remercions ALLAH qui nous a aidé et nous a donné la patience et le courage pour réaliser ce mémoire.*

*Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements et notre profonde gratitude à Mme. HAIMOUR Rachida de nous avoir encadré dans notre mémoire de fin d'étude.*

*Nous tenons également à remercier tous les professeurs et les administrateurs de l'Institut de Maintenance et De Sécurité Industrielle-Oran 2, en particulier le Département Electromécanique, la Branche de Electromécanique, nos amis, et tous les étudiants du 2<sup>ème</sup> Master en Electromécanique.*

*Nous tenons aussi à remercier également le président de Jury et les membres du jury de nous avoir honorés en acceptant de juger et d'évaluer notre travail.*

*Nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

*H.Radhwane, B.Youcef*



# *Dédicace*

*Je tiens à remercier en premier lieu dieu le tout  
puissant qui M'a donné le courage et la patience  
et qui a éclairé mon chemin Pour achever ce travail.*

*C'est tout plein de joie que je dédie ce travail à ceux  
qui m'ont été une source d'inspiration et de volonté ;*

*A ma mère et mon père pour leurs encouragements  
et conseils durant la période de mes études ;*

*Je le dédie à mes très chers frères et sœurs ;  
A toute ma grande famille ;*

*Une dédicace à tous mes amis,  
ET pour tous ceux qui me connaissent ;*

*A la fin je dédie très chaleureusement ce mémoire,  
à mon binôme.*

***BELAKEHAL YUCEF***





# *Dédicace*

*Merci Allah de m'avoir donné la capacité  
d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire,  
la patience d'aller jusqu'au bout de la réussite.*

*Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donnée  
la vie et la tendresse qui s'est sacrifiée pour  
mon bonheur et ma réussite,  
à ma mère, à mon père, à mes frères, à ma grande mère  
et à toutes mes tantes.*

*A mes amis qui ont été mon ombre durant  
toutes les années de mes études,  
Je leurs dédie ce travail. A mon binôme.*



*HAMRI RADHWANE*

**Résumé :**

Avec l'avènement des dispositifs FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission System*), les compagnies d'électricité sont aujourd'hui capables de bien mieux maîtriser la répartition des puissances, ce qui revêt une importance particulière dans le contexte actuel d'accroissement de la demande et d'émergence des marchés de négoce d'électricité. Autre problème : de nombreux obstacles d'environnement restreignent la construction de nouvelles lignes de transport, alors que les besoins sont urgents. Maintenir une alimentation fiable en électricité dans des axes de transport définis sans affecter les autres trajets de transport ou consommateurs raccordés sera, par conséquent, capital dans l'avenir. L'objectif de ce travail est de présenter l'un des différents types de dispositifs FACTS le TCSC (*thyristor controlled séries compensator*), son application dans les réseaux de transports d'énergie électrique et son avantages techniques. En plus la partie simulation traite l'étude détaillée des différents algorithmes proposés de contrôle des puissances transités par le dispositif TCSC dans un réseau test 6 nœuds.

**Mots clés :** ligne de transmission ; Ecoulement des puissances; dispositifs FACTS ; TCSC ; PSAT.

**Abstract :**

With the advent of FACTS devices (*Flexible Alternating Current Transmission System*), utilities are now able to better manage the distribution of powers, which is particularly important in the current context of increased demand and emerging markets for electricity trading. Another problem: Many environmental barriers restrict the construction of new transmission lines, while the needs are urgent. Maintained a reliable supply of electricity in transport corridors defined without affecting other transport routes or connected consumers will, therefore, capital in the future. The objective of this work is to present one of the different types of FACTS devices the TCSC (*thyristor controlled series compensator*), its application in the transport networks of electricity and its technical advantages. In addition to the simulation part deals with the detailed study of different control algorithms proposed powers transited by the TCSC device in a 6 nodes Snetwork test.

**Keywords :** transmission line ; Power flow; FACTS ; TCSC devices ; PSAT.

---

# Sommaire

**Remerciement**

**Dédicaces**

**Résumé**

**Liste des figures**

**Liste des tableaux**

**Listes des abréviations**

**Introduction Générale** ..... 1

## **CHAPITRE I : Architecture générale des réseaux électrique**

I.1.	Introduction :	4
I.2.	Définition	4
I.3.	Production de l'énergie électrique :	4
I.4.	Les différentes centrales électriques sont :	5
I.4.1.	Les centrales thermiques classiques (à vapeur) :	6
I.4.2.	Les centrales thermiques à combustion (turbine à gaz) :	6
I.4.3.	Les centrales nucléaires :	7
I.4.4.	Les centrales hydrauliques :	7
I.4.5.	Les centrales à énergie renouvelable :	8
I.5.	Les différents types de réseaux :	9
I.5.1.	Réseaux d'interconnexion et de transport :	9
I.5.2.	Réseaux de répartition :	9
I.5.3.	Réseaux de distribution :	10
I.6.	Niveaux de tension :	10
I.7.	Topologies des réseaux électriques :	11
I.8.	Équipements et architectures des postes :	12
I.8.1.	Qualités recherchées d'un poste de livraison :	12
I.9.	Tension :	13
I.9.1.	La qualité de la tension :	13
I.9.2.	Dégradation de la qualité de tension :	13
I.9.3.	Les perturbations de tension :	13
I.10.	La Puissance Réactive :	16

I.10.1.	Facteur de puissance :	16
I.10.2.	Tangente :	17
I.10.3.	Composantes active et réactive du courant :	17
I.11.	Conclusion :	18

## **CHAPITRE II : Généralité sur les FACTS**

II.1.	Introduction :	20
II.2.	Compensation de la puissance réactive :	20
II.2.1.	Principe général de la compensation :	20
II.2.2.	Les Moyens classiques de compensation de l'énergie réactive :	21
II.3.	Définition des FACTS :	22
II.3.1.	Les différents types des systèmes FACTS :	22
II.3.2.	Classification des dispositifs FACTS :	23
II.4.	Structures de base des systèmes FACTS :	23
II.4.1.	Inductance commandée par thyristor TCR :	23
II.4.2.	Condensateur commuté par thyristor TSC :	24
II.4.3.	Inductance commutée par thyristors TSR :	24
II.4.4.	Condensateur commuté mécaniquement MSC :	24
II.5.	Dispositifs FACTS shunt :	25
II.5.1.	Compensateurs parallèles à base de thyristors :	25
II.5.2.	Compensateurs parallèles à base de GTO thyristors :	26
II.6.	Dispositifs FACTS séries :	26
II.6.1.	Compensateurs séries à thyristors :	26
II.6.1.1.	Inductance série commandée par thyristors TCSR :	26
II.6.1.2.	Condensateur série commuté par thyristors TSSC :	27
II.6.1.3.	Condensateur série commandée par thyristors TCSC :	28
II.6.2.	Compensateurs séries à base de GTO thyristors :	29
II.6.2.1.	Compensateurs statique séries synchrone SSSC :	29
II.7.	Dispositifs FACTS combinés série-parallèle :	30
II.7.1.	Contrôleur de transit de puissance unifié UPFC :	30
II.7.2.	Contrôleur de transit de puissance entre ligne IPFC :	30
II.8.	Conclusion :	31

## **CHAPITRE III : Etude et modélisation du TCSC**

III.1.	Introduction :	33
--------	----------------	----



---

III.2. Technologie des CSC :.....	34
III.3. Etude du contrôleur série TCSC : .....	35
III.3.1. Mode de fonctionnement du TCSC : .....	35
III.4. Applications des CSC : .....	36
III.4.1. Un degré élevé de compensation série :.....	36
III.4.2. Amortissement des oscillations de puissance : .....	38
III.4.3. Interconnexions:.....	38
III.4.4. Contrôle de l'écoulement de puissance :.....	38
III.4.5. Contrôle de capacité de chargement des lignes de transmission : .....	38
III.5. Analyse du circuit d'un TCSC et ses principales fonctions :.....	38
III.5.1. Les limites de fonctionnement : .....	39
III.5.2. Implémentation pratique : .....	40
III.5.3. Implémentation des TCSCs dans le contrôle de l'écoulement de puissance : .....	41
III.5.4. Puissances de transits pour le modèle TCSC Power Flow : .....	42
III.6. Choix de l'insertion du TCSC dans l'écoulement des puissances : .....	44
III.7. Conclusion :.....	47

#### **CHAPITRE IV : Modélisation d'un réseau électrique**

IV.1. Introduction : .....	49
IV.2. Modélisation des consommations et des productions : .....	49
IV.2.1. Modélisation des lignes : .....	49
IV.2.2. Modélisation des générateurs : .....	49
IV.2.3. Modélisation du transformateur :.....	50
IV.2.4. Modélisation d'une charge :.....	51
IV.2.5. Modélisation d'un système électrique : .....	51
IV.3. Control des transits de puissances par dispositif FACTS (TCSC) :.....	52
IV.4. Caractéristiques du TCSC : .....	53
IV.5. Modélisation du TCSC :.....	53
IV.6. Conclusion :.....	54

#### **CHAPITRE V : Simulation et résultats**

V.1. Introduction : .....	56
V.2. Analyse des réseaux électriques par le logiciel (PSAT) : .....	56
V.3. Simulation : .....	57
V.4. Réseau test 1 : IEEE 6-Bus .....	58

---

V.4.1. Régime normal (sans compensation) : .....	58
V.4.2. Régime normal (avec compensation de la ligne 7) : .....	62
V.4.3. Cas normal (avec compensation de la ligne 9) : .....	63
V.4.4. Cas anormal (avec augmentation de la charge de +10% sans compensation) :.....	64
V.5. Régime normal (avec deux compensations de la ligne 7 & 1) : .....	68
V.6. Conclusion : .....	70
<b>Conclusion générale</b> .....	71
<b>Référence bibliographique</b> .....	72

## Liste des figures

Figure (I.1) : Schéma simplifié d'un réseau électrique .....	4
Figure (I.2) : Turbine Pelton et Turbine à vapeur.....	5
Figure (I.3) : Alternateur.....	5
Figure (I.4) : Centrale thermique classique (à vapeur) .....	6
Figure (I.5) : Centrale thermique à combustion (turbine à gaz).....	6
Figure (I.6) : Centrale nucléaire.....	7
Figure (I.7) : Centrale hydraulique.....	7
Figure (I.8) : Centrale photovoltaïque.....	8
Figure (I.9) : Centrale Eolienne.....	8
Figure (I.10) : Structure de réseau d'énergie électrique.....	9
Figure (I.11) : Structure de réseau de distribution.....	10
Figure (I.12) : Vue globale du réseau électrique.....	11
Figure (I.13) : Différentes topologies des réseaux électriques .....	12
Figure (I.14) : Creux de tension.....	14
Figure (I.15) : Exemple de variation rapide de la tension.....	15
Figure (I.16) : Déséquilibre des tensions triphasées.....	15
Figure (I.17) : Déséquilibre des tensions triphasées.....	16
Figure (I.18) : Composition vectorielle des courants actif, réactif et apparent.....	17
Figure (II.1) : Diagramme traduisant l'échange d'énergie .....	21
Figure (II.2) : différentes catégories des dispositifs de contrôle des réseaux .....	22
Figure (II.3) : Schéma principe des dispositifs FACTS.....	23
Figure (II.4) : structure de base d'un TCR.....	24
Figure (II.5) : structure de base d'un TSC.....	24
Figure (II.6) : Structure de base d'un MSC.....	25
Figure (II.7) : Structure du TCSR.....	26
Figure (II.8) : Condensateur série commuté par thyristors TSSC.....	27
Figure (II.9) : Système composé de deux machines avec TSSC.....	27
Figure (II.10) : Structure du TCSC.....	28
Figure (II.11) : schéma de base du SSSC.....	29
Figure (II.12) : Schéma de principe d'un variateur de charge universel.....	30
Figure (II.13) : Schéma de principe d'un IPFC.....	30
Figure (III.1) : Augmente la même puissance transmissible mais réduit les coûts d'investissement de 90 % grâce à la compensation en série.....	33
Figure (III.2) : Dispositifs CSC.....	34
Figure (III.3) : TCSC en mode de blocage.....	35
Figure (III.4) : TCSC en mode by-pass.....	35
Figure (III.5) : TCSC est en mode de conduction partielle.....	36

Figure (III.6) : Compensation série.....	37
Figure (III.7) : Effet de la compensation sur la puissance transmise.....	37
Figure (III.8) : Les caractéristiques $X_{TCSC} / X_C$ dépendent de l'angle de départ.....	39
Figure (III.9) : Caractéristique $X_{TCSC} / X_C$ en fonction du courant de la ligne $I_{ligne}$ .....	40
Figure (III.10) : Implémentation pratique du TCSC.....	40
Figure (III.11) : Caractéristique $X_{TCSC}$ -vs- $I$ en fonction du nombre de TCSCs.....	41
Figure (III.12) : Modèle du TCSC dans un écoulement de puissance.....	41
Figure (IV.1) : Modélisation des lignes et des câbles.....	49
Figure (IV.2) : Modélisation de générateur.....	50
Figure (IV.3) : Modélisation de transformateur.....	50
Figure (IV.4) : Modélisation d'une charge.....	51
Figure (IV.5) : Schéma d'un TCSC.....	53
Figure (V.1) : Interface graphique du PSAT.....	56
Figure (V.2) : Schéma synoptique du PSAT.....	57
Figure (V.3) : Etapes de simulation.....	58
Figure (V.4) : Réseau test IEEE 6 bus.....	58
Figure (V.5) : Profile de tension aux niveaux des jeux de barres.....	60
Figure (V.6) : Répartitions des pertes actives dans les branches .....	61
Figure (V.7) : Répartitions des pertes réactives dans les branches .....	61
Figure (V.8) : Installation d'un TCSC au niveau de la branche 7 (Jb2-4) .....	62
Figure (V.9) : Variation des pertes totales en fonction du degré de compensation.....	63
Figure (V.8) : Installation d'un TCSC au niveau de la branche 9 (Jb6-5) .....	63
Figure (V.10) : La tension de chaque jeu barre avec augmentation de la charge.....	65
Figure (V.11) : Les pertes actives avec augmentation de charge sans compensation.....	66
Figure (V.12) : Les pertes réactives avec augmentation de charge sans compensation.....	66
Figure (V.15) : Comparaison des pertes totales en fonction du degré de compensation.....	67
Figure (V.16) : Installation d'un TCSC au niveau de deux branches 7 (Jb2-4) & 1 (Jb2-6).....	68
Figure (V.17) : Les pertes actives avec deux TCSC.....	69
Figure (V.18) : Les pertes actives totales en (p.u) sans et avec TCSC.....	69

## Liste des tableaux

Tableau (I.1) : Tableau des domaines de tension (norme CEI 38).....	10
Tableau (V.1) : Donnée de jeux de barre .....	59
Tableau (V.2) : Caractéristiques techniques des branches.....	59
Tableau (V.3) : Résultats de l'écoulement de puissance : tension et angle.....	59
Tableau (V.4) : puissances transitées et les pertes dans les branches.....	60
Tableau (V.5) : Résultats de l'écoulement de puissance : les pertes totales .....	60
Tableau (V.6) : Variation des pertes en fonction du degré de compensation .....	62
Tableau (V.7) : Pertes totales : Emplacement du TCSC a la branche 9 (Jb6-5) .....	64
Tableau (V.8) : Résultats de l'écoulement de puissance avec augmentation de la charge (+10%)...	64
Tableau (V.9) : puissances transitées dans les lignes avec augmentation de la charge +10% .....	65
Tableau (V.10) : Les pertes totales de cette augmentation.....	65
Tableau (V.11) : Les pertes totales à la branche 7 et 9 en augmentation de la charge.....	67
Tableau (V.12) : Les pertes totales actives avec deux TCSC.....	68

## Liste des abréviations

<b>BT :</b>	Base tension.
<b>MT :</b>	Moyenne tension.
<b>HT :</b>	Haute tension.
<b>THT :</b>	Très haute tension.
<b>CEI :</b>	Commission électrotechnique internationale.
<b>NF :</b>	La norme française.
<b>FACTS :</b>	Flexible Alternating Current Transmission Systems.
<b>IEEE :</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers.
<b>TCSC :</b>	Thyristor Controlled Series Capacitor.
<b>SVC :</b>	Static Var Compensator Thyristor.
<b>STATCOM :</b>	Static Synchronous Compensator.
<b>TCPAR :</b>	Thyristor Controlled Phase Angle Regulator.
<b>TSC :</b>	Thyristor Switched Capacitor.
<b>TSR :</b>	Trip Circuit Supervision Relay.
<b>MSC :</b>	Mechanically Switched Capacitor.
<b>GTO :</b>	Gate Turn-off Thyristor
<b>TCBR :</b>	Thyristor Controlled Breaking Resistor.
<b>TCSR :</b>	Thyristor Controlled Series Reactor.
<b>TSSC :</b>	Thyristor Switched Series Capacitor.
<b>SSSC :</b>	Series Static Synchronous Compensator
<b>UPFC :</b>	Unified Power Flow Controlled.
<b>MSSC :</b>	Mechanical Switched Series Capacitor.
<b>IPFC :</b>	Interleaved Power Factor Controller.
<b>CSC :</b>	Capacitor Series Controlled.
<b>K<sub>TCSC</sub> :</b>	Le degré de Compensation
<b>X<sub>C</sub> :</b>	Condensateur de réactance.
<b>X<sub>L</sub> :</b>	Réactance inductive.
<b>R :</b>	Resistance de la ligne
<b>X :</b>	Reactance de la ligne
<b><math>\alpha</math> :</b>	Rapport de transformation
<b>E<sub>0</sub> :</b>	La fem à vide
<b>E<sub>a</sub> :</b>	La fem en charge
<b>V :</b>	Tension de sortie

## 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.

L'exploitation du réseau comprend la production, le transport et la distribution de l'énergie nécessaire à l'installation des charges. Cette énergie doit être disponible à une tension et une fréquence dans des limites acceptables pour le bon fonctionnement des charges et des équipements du réseau. Pour la tension, une variation de 5 % par rapport à la valeur nominale (parfois 10 %) est généralement tolérée. De plus, la fréquence ne doit pas dépasser 0,5 % de la fréquence nominale. Outre le contrôle permanent de la tension et de la fréquence, le fonctionnement du réseau nécessite différents niveaux de protection, d'une part pour éviter les dommages matériels et personnels, et d'autre part pour minimiser les coupures de courant.

Pour l'opérateur en charge de l'exploitation du réseau, il est crucial de comprendre son architecture (architecture du poste et différentes topologies de distribution). En fait, la sécurité d'approvisionnement en dépend largement. De plus, les actions requises pour modifier la topologie dépendent essentiellement de l'architecture du poste. Enfin, de nombreuses opérations de contrôle réglementaire, notamment le réglage de la tension, sont effectuées depuis le poste.

Il a été déterminé que la tension dépend fortement du flux de puissance réactive (processus de flux de puissance). Il faut donc éviter au maximum la transmission de cette puissance en favorisant sa production localement. Les opérateurs disposent généralement de dispositifs de compensation de puissance réactive (bancs de condensateurs). Cependant, d'autres dispositifs de régulation de tension sont également prévus, tels que des autotransformateurs et des contrôleurs d'excitation de générateur automatique. La régulation de tension nécessite donc la coordination de ces différents dispositifs. Aussi, il est important de noter que la puissance active n'est pas sans effet sur la tension, c'est pourquoi, en plus de minimiser la puissance réactive, il faut s'assurer que la puissance appelée est inférieure à une valeur critique représentant un danger de tension ou de fréquence (effondrement) (ce qui signifie envoyer des charges).

De nombreuses recherches ont été effectuées pour déterminer l'emplacement optimal de l'équipement FACTS dans le réseau. Les principales différences entre eux sont :

Le système d'exploitation de l'équipement installé ;

- Le modèle utilisé par l'appareil FACTS ;
- Méthodes et critères d'optimisation ;
- La taille et la topologie du réseau utilisé pour la simulation.

Le travail de cet article s'intéresse particulièrement au contrôle de la puissance réactive et de la tension dans un réseau de transport de puissance via un compensateur série avancé (*condensateur série contrôlé par thyristor*) TCSC et présente les avantages offerts par un TCSC

Pour atteindre ces objectifs de recherche, cette thèse est divisée en cinq chapitres :

Au chapitre 1, nous avons décrit l'architecture générale des réseaux électrique.

Le deuxième chapitre est une vue d'ensemble de la compensation de puissance réactive. Nous avons tout travaillé, en commençant par la technologie classique de compensation de puissance réactive. Une classification des différents types de FACTS est présentée et les principaux équipements de chaque série sont décrits plus en détail.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude profonde concerne la modélisation et l'application du contrôleur TCSC dans l'écoulement de puissance et on présente les éléments qui constituent ce dispositif.

Le quatrième chapitre sera consacré à la modélisation des différents éléments du système de puissance.

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



---

# *Chapitre I*

## Architecture générale des réseaux électrique

---

## I.1. Introduction :

Le système électrique se compose de trois éléments de base : la production, le réseau et les consommateurs (charges). Pour la partie réseau, il est divisé en deux parties : le réseau de transport et le réseau de distribution. Ces systèmes diffèrent par la topologie, les niveaux de tension, la taille, le fonctionnement, le but, etc.

L'architecture d'un réseau de distribution électrique industriel est plus ou moins complexe, selon les niveaux de tension, la puissance requise et la sécurité d'alimentation requise. L'étude d'une architecture complète présente 5 grandes fonctions de base : transformer, transporter, distribuer, transformer et exploiter.

## I.2. Définition :

L'énergie électrique est délivrée à haute voire très haute tension pour limiter les pertes joules (les pertes sont proportionnelles au carré de l'intensité) puis progressivement ramenée au niveau de tension de l'utilisateur final.

Une distribution d'alimentation importante et complète comprend les éléments suivants :

- ✚ une centrale électrique ;
- ✚ Réseaux de lignes de transmission à (très) haute tension ;
- ✚ Transformateurs, postes d'interconnexion et de distribution, Réseau de lignes de distribution moyenne tension ;
- ✚ Sous-stations (cabine) associées aux lignes clients basse tension ;

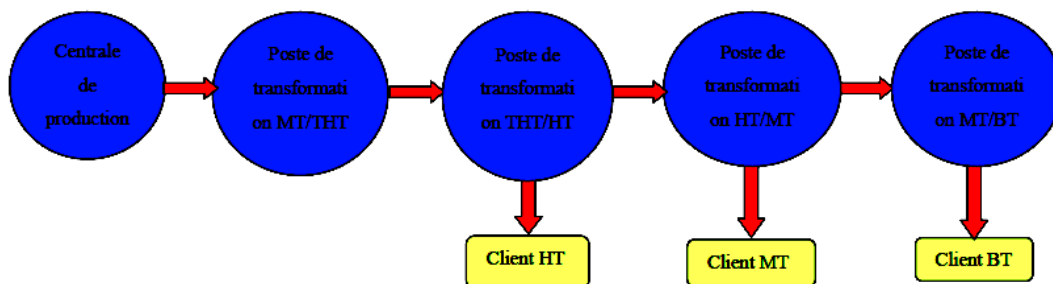


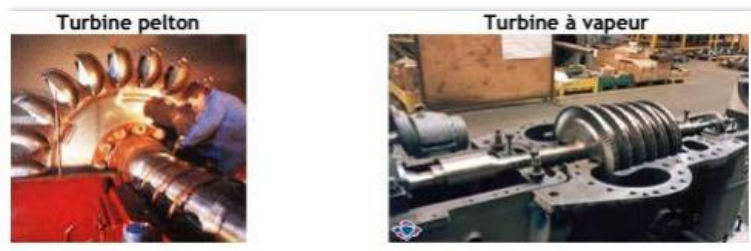
Figure (I.1) : Schéma simplifié d'un réseau électrique

## I.3. Production de l'énergie électrique [1] :

La production implique l'utilisation de diverses énergies pour entraîner des alternateurs qui produisent souvent de la tension et du courant.

Les deux éléments de base qui composent la plupart des centrales électriques sont :

- **Turbine** : C'est un appareil qui convertit l'énergie d'un courant d'eau, de vapeur ou de gaz en énergie mécanique. Dans le domaine de la production, on peut prendre un exemple :



**Figure (I.2) :** Turbine Pelton et Turbine à vapeur

- **Alternateur** : C'est le composant qui convertit l'énergie de rotation en électricité. L'alternateur fournit une ligne trifilaire (signal triphasé) dont la tension est une sinusoïde déphasée de  $120^\circ$  avec une valeur efficace de 20kV. La fréquence de tension est de 50 Hz. Cette fréquence (f) est déterminée par la vitesse de la turbine (n) et le nombre de pôles (P) de l'alternateur par la relation :  $f = p.n$  où : f en Hz (Hertz) ; n en trs/s (tours / seconde)



**Figure (I.3) :** Alternateur

#### **I.4. Les différentes centrales électriques sont :**

- Les centrales thermiques classiques (à vapeur) ;
- Les centrales thermiques à combustion (turbine à gaz) ;
- Les centrales à fission nucléaire ;
- Les centrales hydrauliques ;
- Les centrales à énergie renouvelables ;

### I.4.1. Les centrales thermiques classiques (à vapeur) :

Les centrales thermiques produisent de l'électricité en brûlant du combustible (charbon, gaz naturel, etc.) dans une chaudière qui produit de la vapeur. Cette vapeur entraîne une turbine qui entraîne un alternateur.

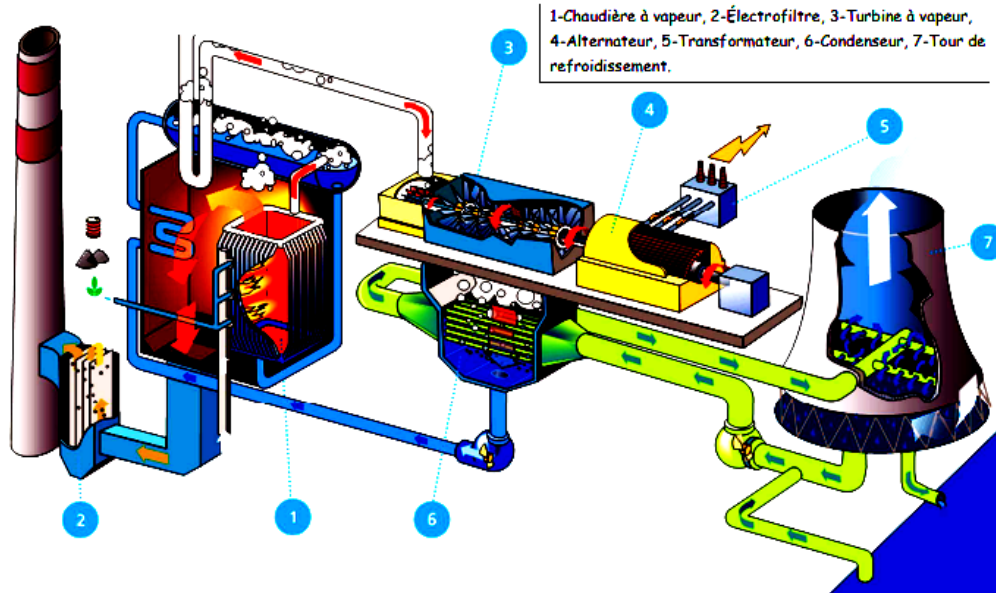


Figure (I.4) : Centrale thermique classique (à vapeur)

### I.4.2. Les centrales thermiques à combustion (turbine à gaz) :

Les turbines à gaz et les turboréacteurs peuvent démarrer rapidement, mais leur rendement est limité. Ils sont utilisés comme unités de pointe et de secours pour les pics inattendus de consommation d'énergie et pour démarrer en cas de panne soudaine d'autres groupes électrogènes. Les turbines à gaz et les turboréacteurs fonctionnent de la même manière que les moteurs à réaction. Ils sont constitués d'un compresseur, d'une chambre de combustion et d'une turbine. Le compresseur aspire l'air, le comprime et l'injecte dans la chambre de combustion. Du gaz naturel (turbine à gaz) ou du kérosène (turboréacteur) y est injecté et brûlé. Les gaz de combustion chauds font tourner la turbine, qui entraîne un alternateur pour produire de l'électricité.

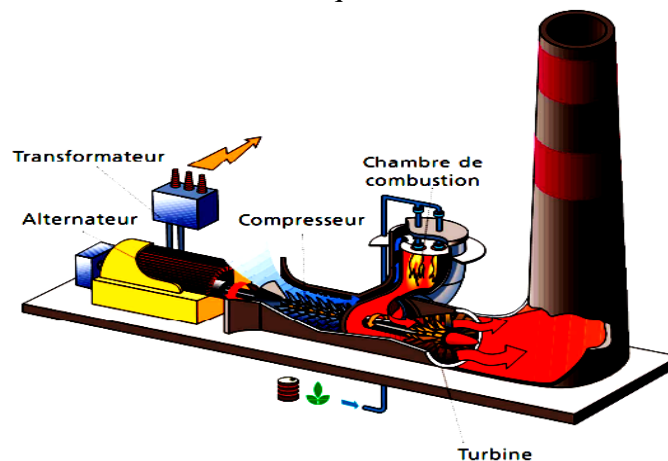


Figure (I.5) : Centrale thermique à combustion (turbine à gaz)

### I.4.3. Les centrales nucléaires :

Dans une centrale à fission nucléaire, l'énergie thermique dégagée par les réactions nucléaires dans le réacteur est utilisée pour créer une pression en faisant bouillir de l'eau. Cette pression entraîne la turbine, de sorte que l'alternateur tourne, produisant de l'électricité.

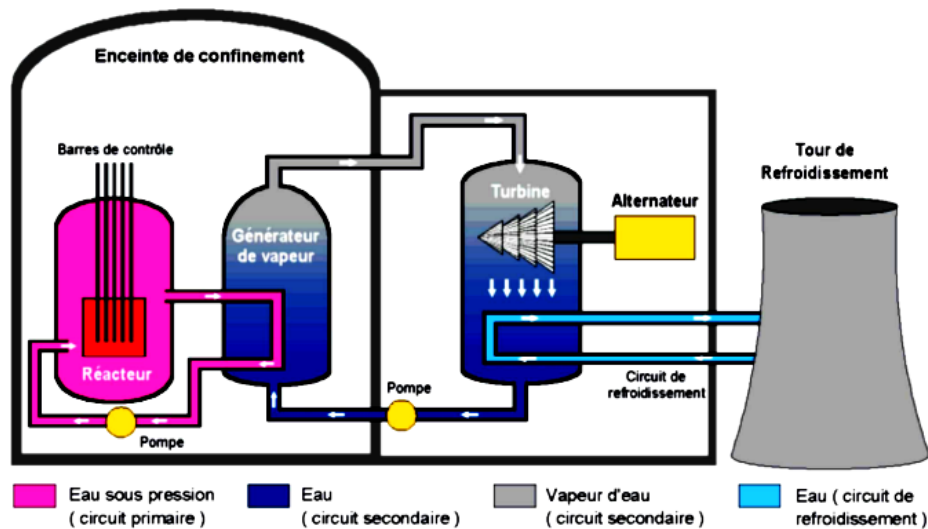


Figure (I.6) : Centrale nucléaire

### I.4.4. Les centrales hydrauliques :

Dans ce type de centrale, l'énergie (énergie potentielle) de l'eau est utilisée pour entraîner une turbine couplée à un alternateur. Nous distinguons:

- ✓ Les centrales de haute chute : la hauteur de chute est supérieure à 200m.
- ✓ Les centrales de moyenne chute : la hauteur de chute est comprise entre 30m et 200m.
- ✓ Les centrales de basse chute : la hauteur de chute est inférieure à 30m.

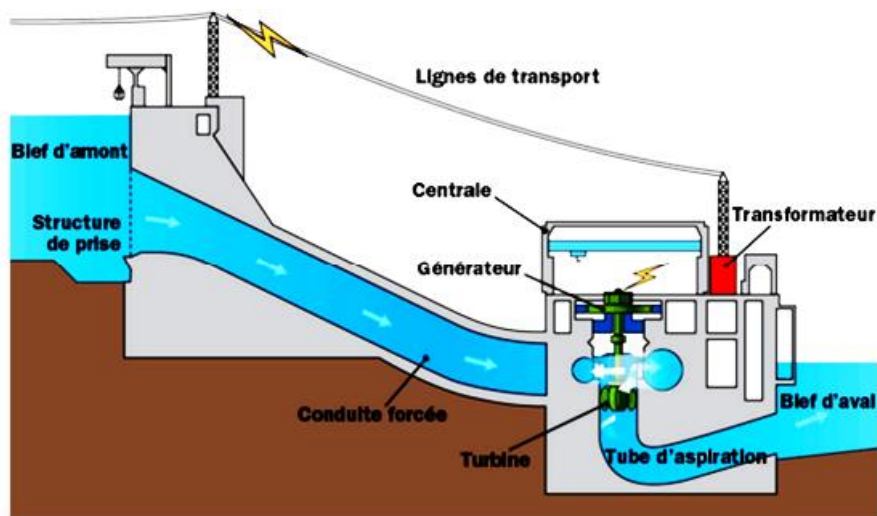


Figure (I.7) : Centrale hydraulique

### I.4.5. Les centrales à énergie renouvelable :

Dans une centrale d'énergie renouvelable, la production d'électricité repose sur :

- ✚ Convertissez l'énergie du vent, du soleil et des vagues de l'océan en électricité.
- ✚ Les éoliennes assurent la conversion énergétique de l'énergie éolienne ;
- ✚ Les panneaux solaires photovoltaïques assurent la conversion énergétique de l'énergie solaire ;
- ✚ Plusieurs inventions du mouvement basées sur le mouvement des vagues ont assuré la conversion de l'énergie des vagues et des marées en énergie électrique.

#### I.4.5.1. Les Centrales photovoltaïques :

Dans ces centrales, les cellules photovoltaïques utilisées à cet effet sont des composants électroniques semi-conducteurs capables de véhiculer du courant électrique dans un circuit extérieur lorsqu'ils sont irradiés par le rayonnement solaire.

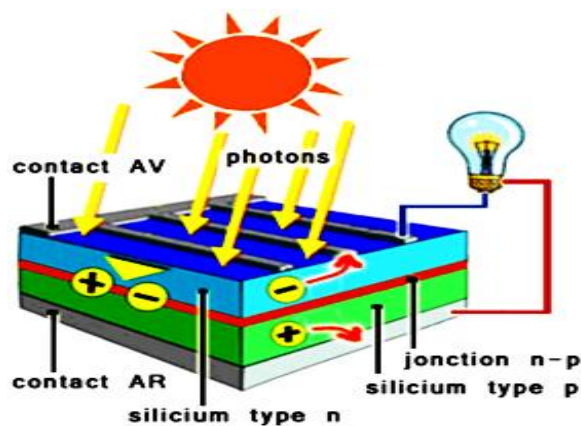


Figure (I.8) : Centrale photovoltaïque

#### I.4.5.2. Les centrales Eoliennes :

Dans une éolienne, le vent fait tourner les pales (l'énergie cinétique est convertie en énergie mécanique de rotation). Le mouvement des pales entraîne alors l'alternateur, convertissant l'énergie mécanique en énergie électrique.

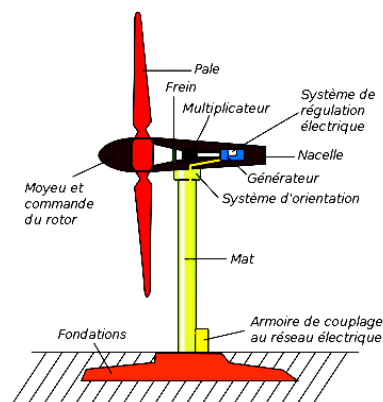


Figure (I.9) : Centrale Eolienne

## I.5. Les différents types de réseaux [2] :

Sur le chemin de l'énergie, de la production à l'utilisation, il existe à son tour différents types de réseaux dont les tâches sont complètement définies par :

### I.5.1. Réseaux d'interconnexion et de transport :

Ces réseaux assurent le transport et l'interconnexion très haute tension et haute tension avec les points de consommation et de distribution. Ces réseaux comprennent des usines de production ainsi que des lignes et des postes, et leur rôle est de :

- Collecter l'énergie produite par la centrale et la restituer à la zone de consommation (fonction transport).
- Permet l'exploitation économique et sûre des moyens de production et assure la compensation des différents manquements (fonctions d'interconnexion)

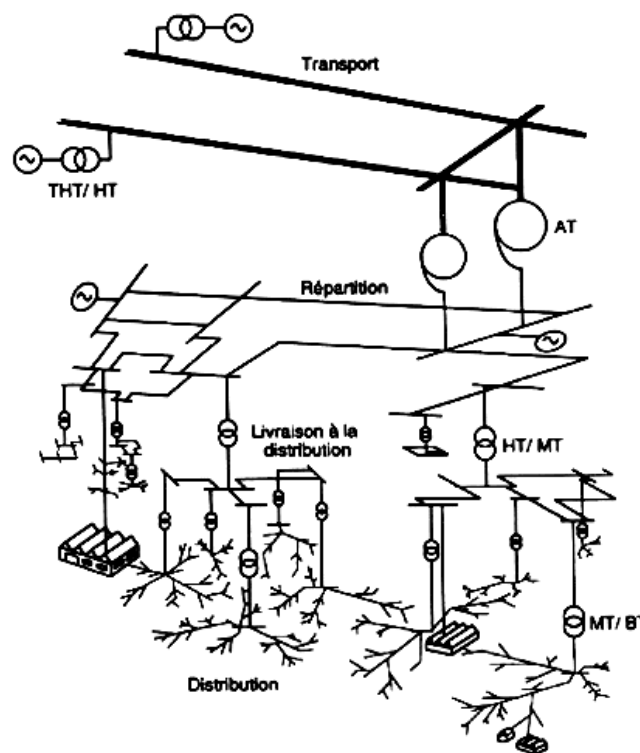


Figure (I.10) : Structure de réseau d'énergie électrique

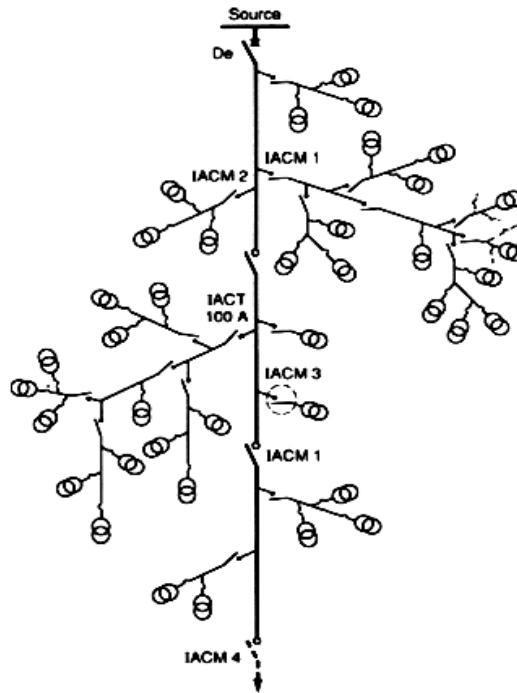
### I.5.2. Réseaux de répartition :

Ces réseaux comprennent des lignes de transport et des sous-stations intermédiaires entre les réseaux de transport et de distribution. Ce sont des réseaux à haute tension dont le rôle est de distribuer l'énergie électrique au niveau régional. Ils peuvent être aériens ou souterrains.

**I.5.3. Réseaux de distribution :**

Leur rôle est de fournir l'électricité nécessaire au réseau de l'utilisateur. Ils utilisent deux tensions :

- Les lignes moyenne tension (MT ou MT) sont alimentées par des postes HT/MT et alimentent directement les gros utilisateurs ou divers postes MT/BT.
- Fournir aux utilisateurs des lignes basse tension monophasées ou triphasées. Le réseau moyen tension fait presque entièrement partie du réseau de distribution.



**Figure (I.11) :** Structure de réseau de distribution

**I.6. Niveaux de tension [2] :**

Les niveaux de tension utilisés varient selon le type de réseau et selon le pays ou la région. Les niveaux de tension sont définis comme suit :

- La norme CEI 38 (Commission Électrotechnique Internationale)

Norme CEI 38	THT & HT	MT	BT
		1kV-1000kV	1000 V et 35 kV
Valeurs standards	45 - 66 - 110 - 132 - 150 - 220 kV	3,3 - 6,6 - 11 - 22 kV - 33 kV	400 V - 690 V - 1000 V (à 50 Hz)

**Tableau (I.1) :** Tableau des domaines de tension (norme CEI 38)



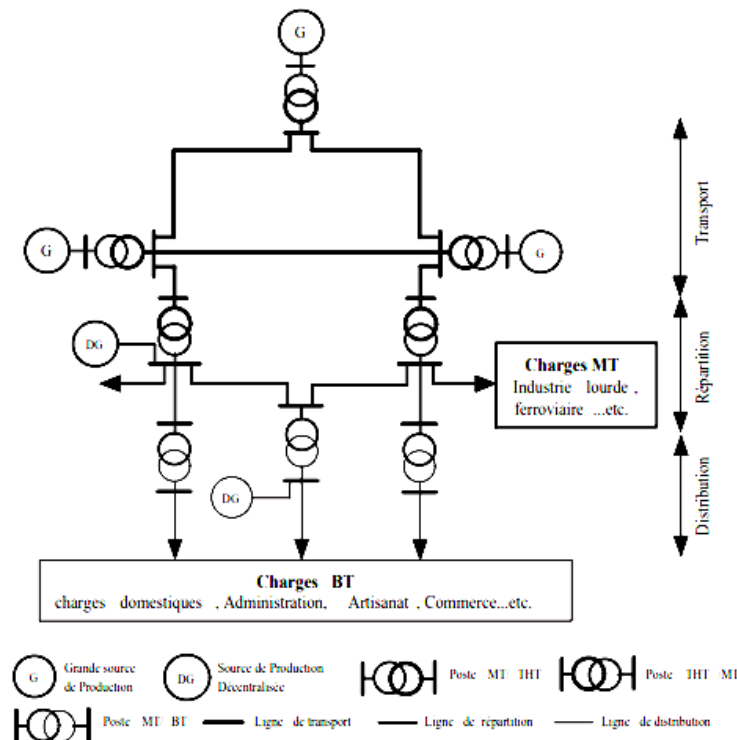
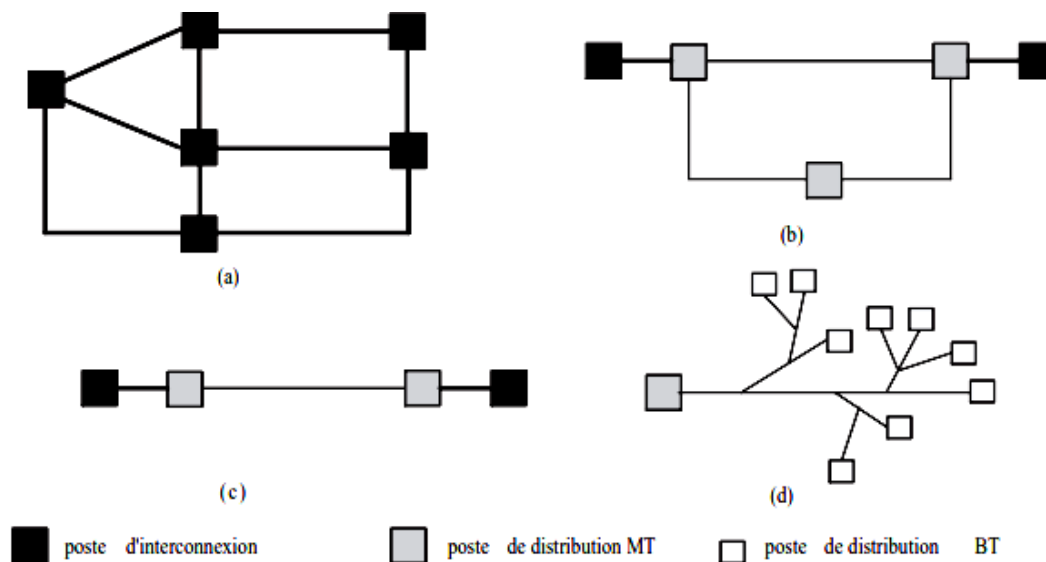


Figure (I.12) : Vue globale du réseau électrique

## I.7. Topologies des réseaux électriques :

Les topologies varient selon le type de réseau. Cette topologie dépend : du niveau de fiabilité, de flexibilité et de maintenance requis, ainsi que des coûts d'investissement et d'exploitation

- ✚ **Réseau maillé** : Cette topologie est presque standard pour les réseaux de transport. Tous les centres de production sont reliés entre eux par des lignes THT au niveau du poste d'interconnexion pour former un réseau. Cette structure permet une meilleure fiabilité, mais nécessite un suivi à l'échelle nationale voire continentale.
- ✚ **Réseau bouclé** : Cette topologie est principalement utilisée dans les réseaux de distribution et de distribution moyenne tension. Les postes HT ou MT alimentés par un réseau THT sont interconnectés pour former une boucle dans le but d'augmenter la disponibilité. Cependant, il convient de noter que les réseaux MT ne sont pas nécessairement fermés.
- ✚ **Réseau radial** : Il s'agit d'une topologie simple que l'on trouve couramment dans la distribution d'énergie MT et BT. Il est constitué de lignes alimentées initialement par des postes de distribution MT ou BT alimentés par des postes sources HT ou MT.
- ✚ **Réseau arborescent** : Cette configuration est largement utilisée en milieu rural et parfois en milieu urbain où les charges sont peu sensibles aux interruptions. Il se compose d'une sous-station qui alimente plusieurs sous-stations (BT) via des prises à différents niveaux de la ligne qui alimente la station MT/BT.



**Figure (I.13) :** Différentes topologies des réseaux électriques : (a) Réseau maillé, (b). Réseau bouclé, (c). Réseau radial, (d). Réseau arborescent

## I.8. Équipements et architectures des postes :

Dans une analyse holistique d'un réseau électrique, une poste est considérée comme une barre ou tout simplement un nœud par lequel circule l'électricité. Pour la conception et la planification du réseau, cette poste constitue la partie principale du système de distribution ou de distribution d'énergie, tant que la configuration de la topologie du réseau est organisée à ce niveau, elle est également un point de contrôle et de surveillance de la protection.

Un poste électrique est un ensemble d'appareillage arrangé de sorte à :

- Faire transiter la puissance d'un niveau de tension à un autre, en général s'il s'agit d'un poste de répartition ou de distribution, le poste sert à baisser la tension ;
- Réglage de la tension, comptage de puissance, surveillance, etc.

Cet ensemble d'appareillage comporte :

- Des jeux de barres ;
- Des transformateurs ;
- Des disjoncteurs et sectionneurs (appareillage de coupure) ;
- Des compensateurs ;
- Appareillage de mesure et de comptage de puissance ;

### I.8.1. Qualités recherchées d'un poste de livraison :

#### ✓ La sécurité :

Il est capable de maintenir la santé maximale des prises (sorties) en service sans que le disjoncteur chargé d'isoler la partie défectueuse ne soit ouvert.

#### ✓ La souplesse :

Il s'agit de la capacité du poste à effectuer plusieurs découplages et à y connecter n'importe quel départ.

✓ **La maintenabilité :**

La possibilité de permettre à une branche de continuer à fonctionner malgré l'indisponibilité du disjoncteur.

✓ **La simplicité :**

Possibilité de modifier la configuration en faisant fonctionner un nombre minimal d'appareils.

## **I.9. Tension [3] :**

### **I.9.1. La qualité de la tension :**

La qualité d'énergie ou la tension est un concept d'efficacité permettant de classer les équipements sensibles d'une manière adaptée à leur fonctionnement. Pour rappel, la tension a quatre caractéristiques principales :

- ✓ fréquence.
- ✓ amplitude.
- ✓ Forme d'onde.
- ✓ Symétrique.

### **I.9.2. Dégradation de la qualité de tension [3] :**

Les perturbations dégradants la qualité de tension peuvent résulter de :

**a. Défauts dans le réseau électrique ou dans les installations des clients :**

- ✓ Court-circuit dans les postes, les lignes aériennes, les câbles souterrains, etc.
- ✓ Causes atmosphériques (foudre, gel, orages...).
- ✓ Matériaux (vieillessement de l'isolant...).
- ✓ Humain (fausses opérations, travail de tiers, etc.).

**b. Installations perturbatrices :**

- ✓ Four à arc électrique.
- ✓ Soudeurs.
- ✓ Variateurs de vitesse.
- ✓ Toutes applications en électronique de puissance, TV, éclairage Fluorescence.
- ✓ Démarrer ou changer d'équipement, etc.

Principaux phénomènes affectant la qualité de la tension Il sera brièvement introduit comme suit [4].

### **I.9.3. Les perturbations de tension :**

#### **I.9.3.1. Chutes de tension :**

Lorsque la transmission dans la ligne électrique est suffisamment importante, le courant dans la ligne fait chuter la tension. Ensuite, la tension en bout de ligne est inférieure à la tension en son point de départ, et plus la ligne est chargée en transport de puissance, plus la chute de tension est importante [5].

Les réseaux où la consommation est éloignée de la production présenteront La distribution de tension diffère d'un réseau où la production et la consommation sont équitablement réparties. Chaque installation applique une tension à sa sortie, et la tension dans le réseau varie en fonction de la consommation fournie [5].

C'est pourquoi, dans un réseau maillé THT, la tension varie selon l'emplacement. Où sommes-nous. Pendant les périodes de pointe de consommation, la tension des nœuds du réseau est élevée Lorsque la centrale fournit et est relativement faible aux points de consommation éloignés de la centrale électrique.

### I.9.3.2. Creux de tension :

Un creux de tension est une chute brutale de la tension d'alimentation  $U_f$ . Cette chute est comprise entre 90% et 10% de la tension nominale  $U_n$ , suivie d'un court rétablissement de la tension. Les creux de tension peuvent durer de 10 ms à 3 minutes [6]. La plupart des équipements électriques autorisent un temps d'indisponibilité total inférieur à 10 ms [5].

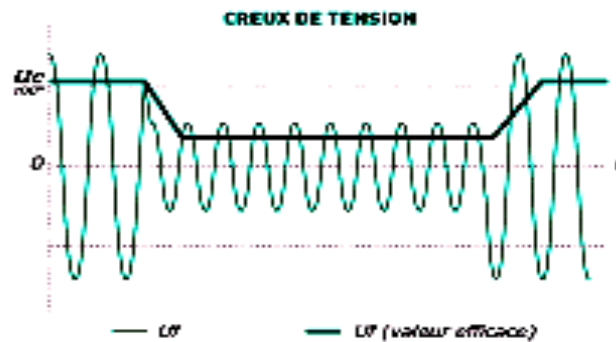


Figure (I.14) : Creux de tension [4]

### I.9.3.3. Variation Lente de Tension :

La valeur efficace de la tension change constamment en raison des variations de la charge fournie par le réseau. Les appareils traditionnels peuvent facilement supporter des changements de tension lents dans au moins  $\pm 10\%$  de la tension nominale [7].

### I.9.3.4. Variations et fluctuations de tension :

Les variations rapides de tension, répétitives ou aléatoires (Figure I.15), sont causées par des variations rapides de la puissance absorbée ou produite par les postes à souder, les fours à arc électrique, les éoliennes, etc. [3].

Les fluctuations de tension sont une série de variations de tension ou de variations périodiques ou aléatoires de l'enveloppe de tension, caractérisées par la fréquence et l'amplitude des variations.



Figure (I.15) : Exemple de variation rapide de la tension

### I.9.3.5. Déséquilibre de tension :

Les récepteurs électriques triphasés déséquilibrés alimentés par un réseau triphasé équilibré provoquent un déséquilibre de tension dû à une circulation de courant déséquilibrée dans l'impédance du schéma du réseau (Figure I.16). Ceci est courant pour les réceptrices monophasées basses tensions. Mais elle peut aussi être causée par des machines à souder, des fours à arc électrique ou la traction ferroviaire à des tensions plus élevées.

Un système triphasé est déséquilibré lorsque les trois tensions ne sont pas égales en amplitude et/ou ne sont pas déphasées de  $120^\circ$  l'une par rapport à l'autre [3].

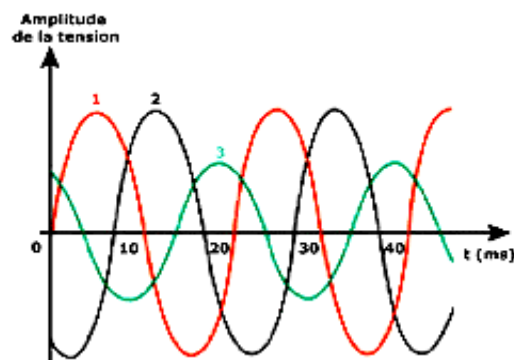


Figure (I.16) : Déséquilibre des tensions triphasées

### I.9.3.6. Variation ou fluctuation de la fréquence :

Les fluctuations de fréquence sont le plus souvent observées sur les réseaux non interconnectés ou alimentés par des groupes électrogènes. Dans des conditions normales de fonctionnement, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit se situer dans l'intervalle de  $50 \text{ Hz} \pm 1 \%$  illustré à la Figure (I.17).

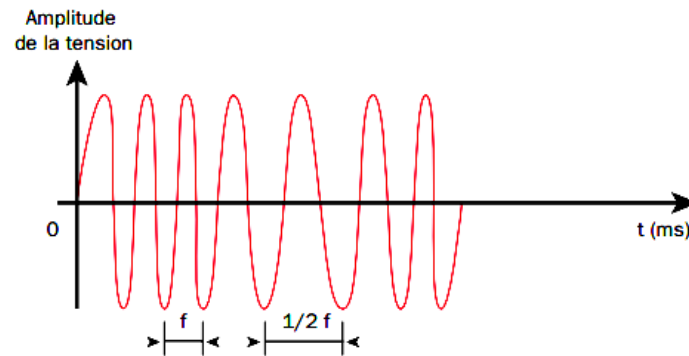


Figure (I.17) : Déséquilibre des tensions triphasées

## I.10. La Puissance Réactive :

La transmission de la puissance réactive sur de longues distances présente une série d'inconvénients, tels qu'une chute de tension considérable, des pertes en ligne dues à l'effet Joule et une moindre capacité à transmettre la puissance active [5].

En plus de ces aspects purement statiques, la puissance réactive peut également jouer un rôle important dans d'autres aspects dynamiques, tels que les fluctuations de tension et les phénomènes de scintillement provoqués par des changements de charge soudains.

Actuellement, avec la complexité du réseau, la participation des producteurs à la production d'énergie réactive est devenue insuffisante. Elle est principalement générée par les méthodes de compensation existantes [5].

Afin d'assurer une bonne qualité d'énergie, il est nécessaire de respecter l'équilibre entre l'offre et la demande de puissance réactive, de fournir des tensions aussi régulières que possible et de respecter un certain nombre de contraintes techniques.

### I.10.1. Facteur de puissance [8] :

C'est le quotient de la puissance active consommée et de la puissance apparente fournie.

$$\mathbf{F} = \frac{P(W)}{S(VA)} = \mathbf{COS \varphi} \quad (\text{I.1})$$

$\text{Cos } \varphi$  est le facteur de puissance fondamental et ne tient pas compte de la puissance portée par les harmoniques.

- Le facteur de puissance  $\text{cos } \theta \approx 1$  signifie une faible consommation de puissance réactive, ce qui peut optimiser le fonctionnement de l'appareil. Il peut facilement identifier les appareils qui consomment plus ou moins de puissance réactive.
- Un facteur de puissance  $\text{cos } \theta = 1$  entraînera une consommation de puissance réactive (purement résistive).
- Un facteur de puissance  $\text{cos } \theta < 1$  va rendre la consommation de puissance réactive d'autant plus importante qu'elle est proche de (0) (inductance pure).

Dans les installations électriques, le facteur de puissance peut varier d'un magasin à l'autre, en fonction du matériel installé et de son utilisation (fonctionnement à vide, à pleine charge).

### I.10.2. Tangente [8] :

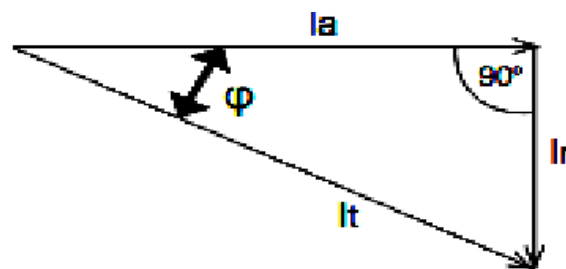
Certains facteurs de puissance (abonnés au tarif vert) représentent la valeur de  $\tan \varphi$ , qui correspond à l'énergie réactive que le distributeur doit fournir pour une puissance active donnée.

$$\tan \varphi = \frac{\text{énergie réactive}}{\text{énergie active}} = \frac{Q(\text{VAR})}{P(\text{W})} \quad (\text{I-2})$$

### I.10.3. Composantes active et réactive du courant :

A chacune de ces énergies actives et réactives correspond un courant électrique.

- Courant actif ( $I_a$ ) : en phase avec la tension du réseau.
- Courant réactif ( $I_r$ ) :  $90^\circ$  différent du courant actif, vers l'arrière (récepteur inductif) ou vers l'avant (récepteur capacitif).
- Courant apparent ( $I_t$ ) (total) : c'est le courant résultant du câble allant de la source d'alimentation au récepteur. Ce courant est déphasé d'un angle  $\varphi$  par rapport au courant actif (ou par rapport à la tension). Pour les courants qui ne contiennent pas de composantes harmoniques, ces courants sont constitués de vecteurs efficaces comme indiqué sur la Figure (I.6).



**Figure (I.18) :** Composition vectorielle des courants actif, réactif et apparent

Les courants actif, réactif, et apparent, ainsi que le déphasage sont liés par les relations suivantes :

$$I_t = \sqrt{I_a^2 + I_r^2} \quad (\text{I-3})$$

$$I_a = I_t^* \cdot \cos \varphi \quad (\text{I-4})$$

$$I_r = I_t^* \sin \varphi \quad (\text{I-5})$$

**I.11. Conclusion :**

Ce chapitre on a défini et présenté les différentes structures et architectures des réseaux électriques en modélisant les éléments le constituant, ainsi traité les différents phénomènes perturbateurs qui influents sur la qualité de tension.

Cela nous amène à croire que le contrôle de la tension et l'optimisation de la puissance réactive sont des objectifs importants pour maintenir une configuration appropriée dans le réseau. D'autre part, il doit maintenir des réserves de puissance réactive dans différentes zones du système pour faire face aux événements de tension.

Il existe actuellement une méthode moderne et sophistiquée pour le contrôle de la tension et l'optimisation de la puissance réactive dans les réseaux. Cette méthode utilise un dispositif FACTS (basé sur l'électronique de puissance), qui est décrit en détail dans le chapitre suivant.



---

# *Chapitre II*

## Généralité sur les FACTS

---

## II.1. Introduction :

La dérégulation des marchés de l'électricité, qui touche progressivement tous les pays, modifie profondément l'approche technico-économique de l'exploitation et de l'optimisation des réseaux électriques. C'est dans ce nouveau contexte que les spécialistes du réseau sont confrontés à des défis croissants. Le développement des dispositifs FACTS (*Flexible AC Transmission System*) ouvre de nouvelles perspectives pour un meilleur fonctionnement du réseau par une action continue et rapide sur les différents paramètres du réseau.

Par conséquent, les appareils Facts peuvent souvent améliorer le contrôle des systèmes électriques déjà en place. Ces dispositifs utilisent généralement de l'électronique de puissance. Ces éléments agissent en fait comme des impédances dont la valeur varie en fonction de l'angle de tir. Cet angle de tir constitue donc la grandeur de commande du système.

Pour diverses raisons mentionnées dans l'aperçu, les équipements FACTS jouent un rôle important dans le contrôle du flux d'électricité et le maintien de conditions de fonctionnement sûres du réseau de transport. Ce chapitre vise à mettre en évidence les caractéristiques et le potentiel des différents FACTS développés à ce jour.

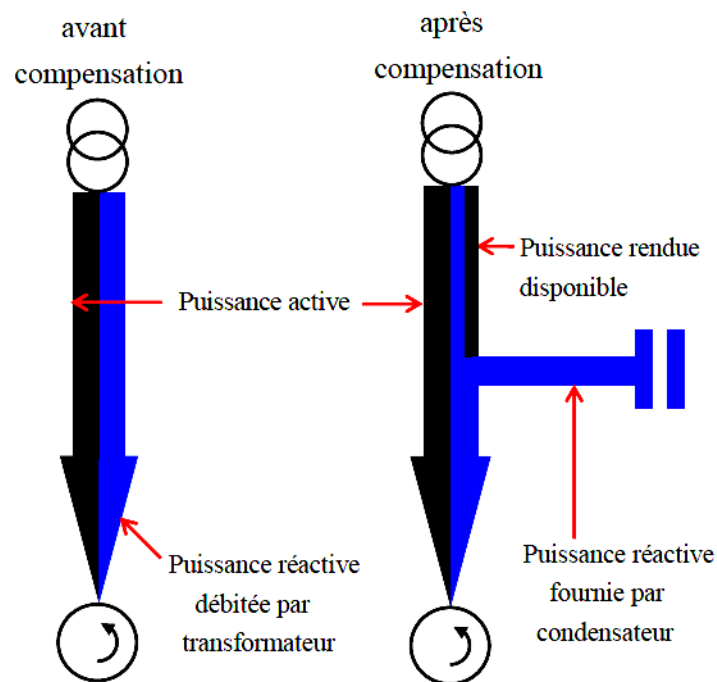
Tout d'abord un bref rappel des différentes techniques de compensation (parallèle et série). Il décrit ensuite le concept FACTS et propose une classification des dispositifs. La fin de ce chapitre est consacrée à l'utilisation de FACTS et à sa place dans la grille.

## II.2. Compensation de la puissance réactive :

Le transport de la puissance réactive sur de longue distance présente une plusieurs inconvénients tels-que les chutes de tension considérables, les pertes par effet joule et moins de capacité pour transporter la puissance active. 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 [9].

### II.2.1. Principe général de la compensation :

Le principe de la compensation des condensateurs peut être représenté par les deux figures suivantes. La figure (II.1) illustre l'échange local d'énergie réactive entre le récepteur et le condensateur. Les pertes dues à l'effet Joule étant proportionnelles au carré du courant, le courant total fourni par le réseau  $I_{t2}$  est réduit, augmentant ainsi le rendement de l'appareil [10].



**Figure (II.1) :** Diagramme traduisant l'échange d'énergie et montrant l'intérêt de la compensation

## II.2.2. Les Moyens classiques de compensation de l'énergie réactive :

De manière générale, les moyens de compensation et d'ajustement à mettre en œuvre doivent faire face aux fluctuations cycliques liées à l'évolution au jour le jour du transport de puissance, ainsi qu'aux brusques variations liées aux événements du réseau [11].

Les dispositifs de compensation de puissance réactive et de régulation de tension sont :

- Les condensateurs et inductances fixes.
- Les compensateurs synchrones.
- Les compensateurs statiques.
- Les transformateurs à prises variables (en charge ou à vide).
- Les groupes générateurs.

### II.2.2.1. Les avantages compensateurs classiques :

- Aucune usure mécanique et entretien réduit.
- Faibles pertes.
- Petite taille et installation facile.
- Peut être divisé selon les besoins.
- Ils sont moins chers que les compensateurs rotatifs quelle que soit la puissance.

### II.2.2.2. Les inconvénients compensateurs classiques [12] :

- La puissance réactive fournie n'est pas facile à régler.
- La puissance réactive fournie varie avec la tension d'alimentation.

- La mise sous tension peut provoquer de graves appels de courant.
- Si la fréquence de résonance avec l'inductance source est proche de la fréquence d'une harmonique existante, cette harmonique sera amplifiée et pourra devenir gênante ou dangereuse.
- L'inconvénient le plus important est le transitoire après commutation car :

L'enclenchement d'une batterie de condensateurs destinée à fonctionner en by-pass sur le réseau s'accompagne de transitoires provoqués par la charge de la batterie

### II.3. Définition des FACTS :

Le système de dispositif FACTS est utilisé pour le contrôle dynamique de la tension, de l'impédance et de l'angle de phase de la tension afin d'améliorer le comportement dynamique du réseau ainsi que la distribution et le flux de puissance dans le réseau. Selon l'IEEE, FACTS est défini comme suit :

Ce sont des systèmes à courant alternatif qui intègrent une électronique de puissance et d'autres contrôleurs statiques pour améliorer la contrôlabilité et la capacité de flux de puissance [13].

#### II.3.1. Les différents types des systèmes FACTS :

Plutôt que d'être limitée par un seul appareil, la technologie FACTS regroupe des appareils basés sur l'électronique de puissance implantés dans le réseau pour mieux contrôler le flux d'électricité et améliorer la capacité de transmission de ses lignes. Contrôle rapide de tous les paramètres du réseau grâce à ces systèmes : tension, impédance, déphasage, etc. Ils peuvent améliorer les marges de stabilité et assurer une meilleure flexibilité dans le transfert d'énergie. La Figure (II.2) montre la classification des dispositifs de compensation FACTS [14].

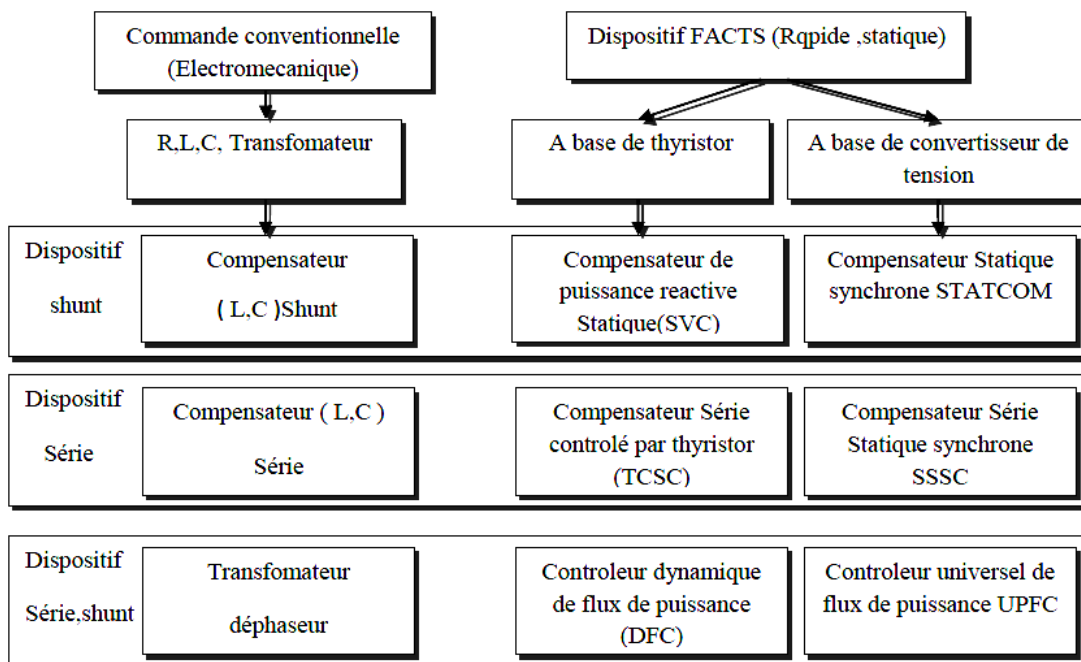


Figure (II.2) : différentes catégories des dispositifs de contrôle des réseaux électriques

### II.3.2. Classification des dispositifs FACTS [15] :

Les systèmes FACTS peuvent être divisés en trois catégories :

- Compensateur parallèle.
- Compensateur série.
- Compensateurs hybrides (série-parallèle).

Selon la technologie utilisée, ces catégories se divisent en deux générations :

La première génération est basée sur des thyristors :

- TCSC (*Condensateur Série Contrôlé par Thyristor*).
- SVC (*compensateur de var statique*).

La seconde génération est basée sur les thyristors GTO :

- STATCOM (*compensateur statique*).
- TCPAR (*Régleur d'angle de phase contrôlé par thyristor*).

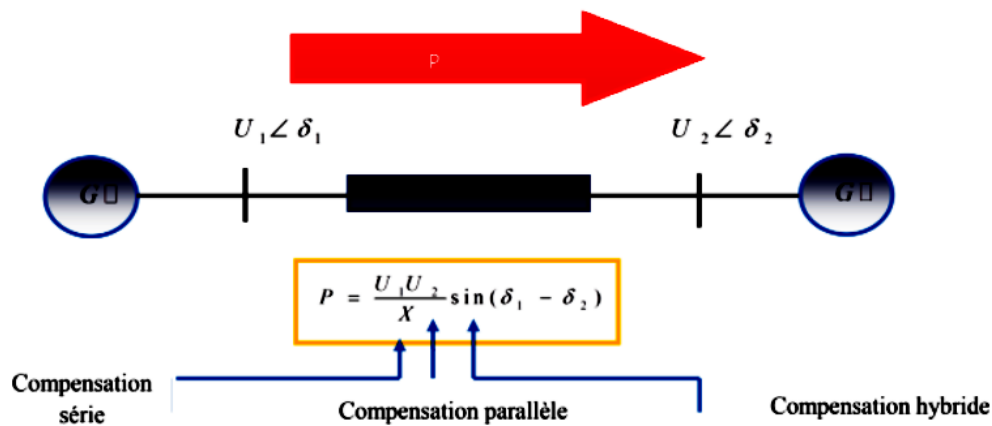


Figure (II.3) : Schéma principe des dispositifs FACTS

### II.4. Structures de base des systèmes FACTS :

La plupart des systèmes FACTS ont des éléments contrôlables analogiques, dont les plus courants sont les suivants [16] :

#### II.4.1. Inductance commandée par thyristor TCR :

Le TCR est constitué d'une bobine d'induction de valeur fixe \$L\$ en série avec une vanne triac. Le courant de fréquence fondamentale est régulé par le contrôle de phase des thyristors.

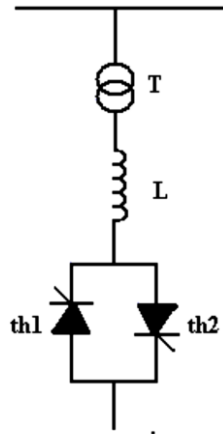


Figure (II.4) : structure de base d'un TCR

#### II.4.2. Condensateur commuté par thyristor TSC :

Le TSC se compose d'un condensateur en série avec un triac et une bobine d'inductance d'amortissement, comme illustré à la Figure (II.5) tension appliquée. Les condensateurs ne sont pas contrôlés en phase, l'inductance du circuit est utilisée pour limiter le courant dans des conditions anormales, ainsi que pour régler le circuit à la fréquence souhaitée.

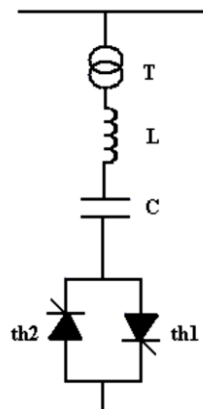


Figure (II.5) : structure de base d'un TSC

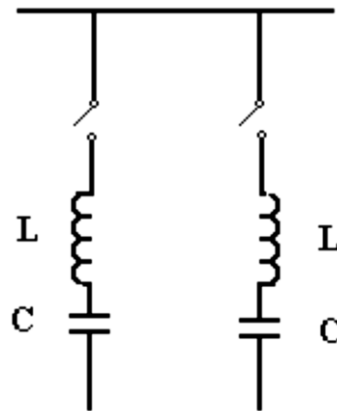
#### II.4.3. Inductance commutée par thyristors TSR :

TSR est TCR, mais sans contrôle de phase de courant, il s'allume et s'éteint comme TSC. L'avantage de TSR par rapport à TCR est qu'aucun courant harmonique n'est formé.

#### II.4.4. Condensateur commuté mécaniquement MSC :

Le MSC illustré à la Figure (II.6) est une branche d'accord constituée d'une batterie de condensateurs et d'une inductance. Il est conçu pour commuter seulement un petit nombre de

fois par jour, car la commutation est effectuée par le disjoncteur. Le but du MSC est de fournir une puissance réactive en régime permanent.



**Figure (II.6) :** Structure de base d'un MSC

## II.5. Dispositifs FACTS shunt :

En fait, tous les compensateurs shunts injectent du courant dans le réseau à travers la jonction. Lorsqu'une impédance variable est connectée en parallèle sur le réseau, elle consomme (ou injecte) du courant variable. Cette injection de courant modifie la puissance active et réactive à travers la ligne.

### II.5.1. Compensateurs parallèles à base de thyristors [17] :

- TCR (*réacteur contrôlé par thyristor*) En TCR (ou RCT : *Reactance Controlled by Thyristor*), la valeur de l'inductance change continuellement au fur et à mesure que le thyristor se déclenche.
- TSC (*condensateur commuté par thyristor*) En TSC (ou CCT : *Thyristor Controlled Capacitor*), le thyristor fonctionne en pleine conduction.
- SVC (*compensateur de var statique*) La combinaison du TCR, du TSC, de la batterie de condensateurs fixes et du filtre harmonique forme un compensateur hybride, mieux connu sous le nom de SVC (*Static Var Compensator*)
- TCBR (*Résistance à la Coupure Contrôlée par Thyristor*) :

Ce type de compensateur shunt est utilisé pour augmenter la stabilité du réseau en présence de perturbations.

## II.5.2. Compensateurs parallèles à base de GTO thyristors :

Voici le STATCOM (*Static Compensator*) connu jusqu'à présent sous différents noms :

Le principe de ce type de compensateur est connu depuis la fin des années 1970, mais il a fallu attendre les années 1990 pour que de tels compensateurs connaissent un essor important du fait du développement des commutateurs GTO de forte puissance.

STATCOM a plusieurs avantages :

- **Bonne réponse à basse tension** : STATCOM est capable de fournir son courant nominal même à tension quasi nulle.
- **Bonne réponse dynamique** : Le système répond immédiatement.

## II.6. Dispositifs FACTS séries :

Les dispositifs FACTS à compensation série sont une évolution des condensateurs série fixes. Ils permettent généralement de compenser les chutes de tension induites en insérant des tensions capacitives sur la ligne de transmission. Ils modifient donc la réactance effective de la ligne. La tension insérée est proportionnelle et perpendiculaire au courant dans la ligne.

### II.6.1. Compensateurs séries à thyristors :

Le premier schéma d'un compensateur série à thyristors a été présenté en 1986. À l'heure actuelle, les principales conceptions des compensateurs de la série de thyristors peuvent être divisées en trois types :

- Condensateurs en série commutés par des thyristors.
- Condensateurs en série commandés par des thyristors.
- Condensateur série commandé par thyristor GTO.

#### II.6.1.1. Inductance série commandée par thyristors TCSR :

Un TCSR est un compensateur inductif constitué d'une inductance en parallèle avec une autre inductance commandée par thyristor pour fournir une réactance inductive série variable (Figure II.7) [18].

Lorsque l'angle d'amorçage du réacteur commandé par thyristor est de  $180^\circ$  degrés, il cesse de conduire et le réacteur incontrôlable  $X_L$  agit comme un limiteur de courant de défaut.

Lorsque l'angle d'amorçage diminue en dessous de  $180^\circ$  degrés, la réactance équivalente diminue jusqu'à un angle de  $90^\circ$  degré, qui est une combinaison parallèle des deux réactances.

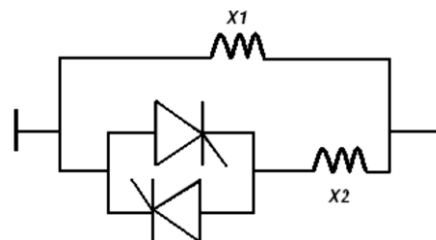


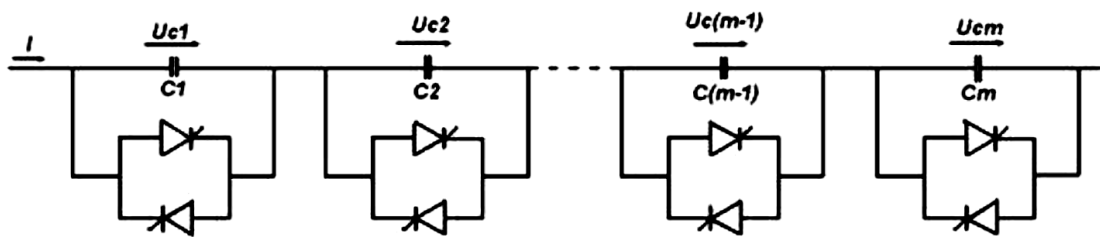
Figure (II.7) : Structure du TCSR



**II.6.1.2. Condensateur série commuté par thyristors TSSC :**

Le schéma de base d'un condensateur série commuté par un thyristor TSSC (*Thyristor Switched Series Capacitor*) est constitué de plusieurs condensateurs en série, chacun shunté par une valve, avec le thyristor connecté en dérivation (Figure II.8).

Le degré de compensation est contrôlé par étapes. Un condensateur série est inséré dans le circuit en bloquant le thyristor correspondant. Il s'éteindra spontanément lorsque le courant passera par zéro. Une fois la vanne bloquée, le condensateur se charge pendant un demi-cycle puis se décharge pendant le demi-cycle de polarité opposée. Pour minimiser les transitoires, le thyristor s'allume lorsque la tension aux bornes du condensateur est nulle [19].

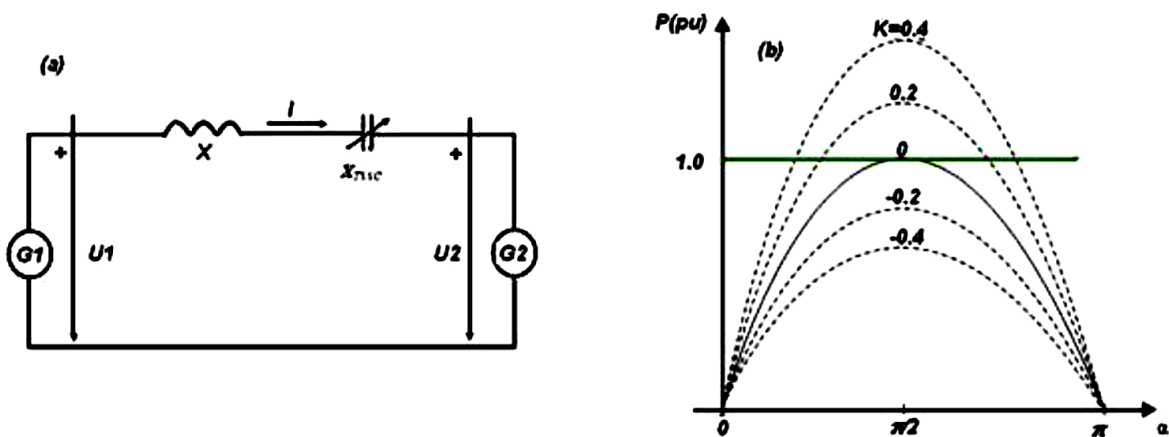


**Figure (II.8) :** Condensateur série commuté par thyristors TSSC

Le TSSC peut être considéré comme une réactance contrôlable en série avec la réactance de ligne (Figure II.9). Le degré de compensation de ligne (K) est donné comme le rapport de la réactance du TSSC ( $X_{TSSC}$ ) à la réactance de ligne (X).

$$K = \frac{-X_{TSSC}}{X} \quad (II.1)$$

$$X_{TSSC} = \frac{-1}{\omega \cdot C} \quad (II.2)$$



**Figure (II.9) :**(a) Système composé de deux machines avec TSSC, (b) puissance de transition correspondante en fonction de l'angle d'amorçage des thyristors

La puissance active transmise est donnée par l'équation suivante :

$$P = \frac{U_1 \cdot U_2}{X + X_{TSSC}} \cdot \sin \alpha = \frac{U_1 \cdot U_2}{X \cdot (1 - K)} \cdot \sin \alpha \quad (\text{II.3})$$

L'équation (II.3) montre que le degré de compensation (K) détermine la puissance maximale transmise, comme le montre la figure II.9(b).

### II.6.1.3. Condensateur série commandée par thyristors TCSC :

Le TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*) est l'un des dispositifs FACTS les plus importants et est utilisé depuis de nombreuses années pour augmenter la puissance transmise sur la ligne afin d'améliorer la stabilité du réseau [17]. Il se compose d'une inductance L en série avec un gradateur TCR (*thyristor series reactor*) et d'un composant en parallèle avec un condensateur C, comme le montre la figure II.10.

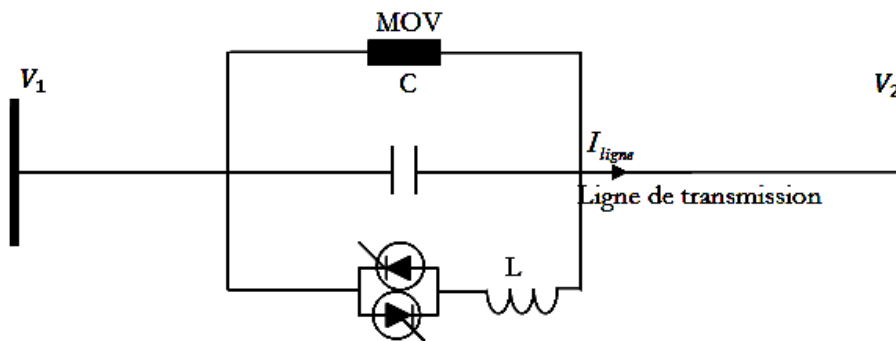


Figure (II.10) : Structure du TCSC

Un TCSC placé en série dans une ligne de transmission peut contrôler le flux de puissance et augmenter la capacité de transmission de la ligne en agissant sur la réactance  $X_{TCSC}$ , qui varie en fonction de l'angle de retard d'amorçage du thyristor  $\alpha$ , donné par la formule :

$$X_{TCSC}(\alpha) = \frac{jL_w}{\frac{2}{\pi}(\pi - \alpha + \frac{\sin(2\alpha)}{2}) - LCw^2} \quad (\text{II.4})$$

L'effet de la commande TCSC est exprimé par le pourcentage de compensation  $K_c$  donné dans [20] :

$$k_c = \frac{X_c}{X_L} \times 100\% \quad (\text{II.5})$$

Où :

$X_L$  ; réactance de ligne;

$X_C$  ; Réactance capacitive effective fournie par TCSC.

Selon la valeur de  $\alpha$ , il existe trois modes de fonctionnement [17, 20] :

- $\alpha = 180^\circ$  La bobine est complètement déconnectée et le TCSC est considéré comme condensateurs en série fixe ;
- $90^\circ < \alpha < 180^\circ$   $X_{TCSC}$  est une combinaison parallèle de  $X_L$  et  $X_C$  ;
- $\alpha = 90^\circ$  Thyristor complètement déclenché, TCSC peut être utilisé pour limiter le courant de défaut.

La puissance transmise dans une ligne équipée de TCSC est donnée par :

$$P_{12} = \frac{|V_1| \cdot |V_2|}{X_{TCSC}} \cdot \sin(\delta_1 - \delta_2) \quad (\text{II.6})$$

Typiquement, chaque composant possède un élément de protection contre les surtensions en parallèle appelé MOV (*Metal Oxide Varistor*) [21].

## II.6.2. Compensateurs séries à base de GTO thyristors :

### II.6.2.1. Compensateurs statique séries synchrone SSSC :

Ce type de compensateur série (*Series Static Synchronous Compensator*) est le dispositif le plus important de cette famille. Il consiste en un onduleur triphasé utilisant un transformateur en série avec la ligne électrique (Figure II.11) [17].

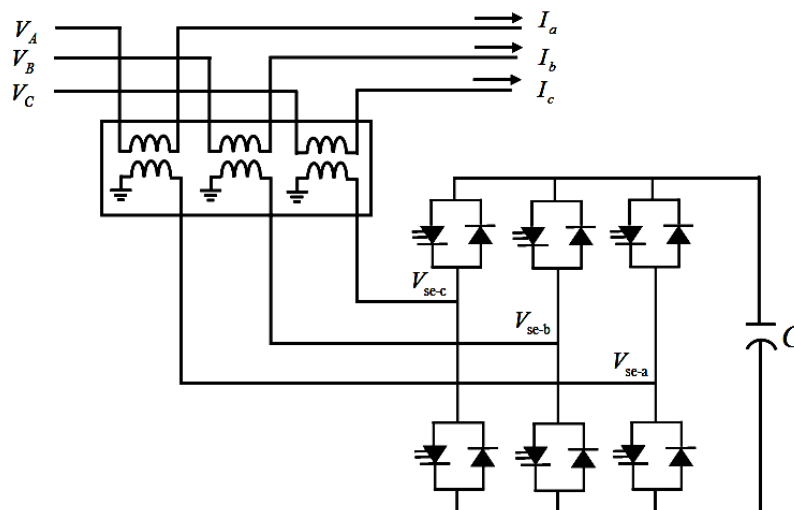


Figure (II.11) : schéma de base du SSSC

## II.7. Dispositifs FACTS combinés série- parallèle :

C'est une combinaison d'un appareil en série et d'un shunt, contrôlé de manière coordonnée Afin de compléter le contrôle prédéfini. Ils permettent un contrôle multi variable pour contrôler le flux de puissance active et réactive, l'angle de tension et le transfert d'énergie.

### II.7.1. Contrôleur de transit de puissance unifié UPFC :

Le contrôleur de flux de puissance unifié (UPFC) se compose de deux convertisseurs de tension connectés par une liaison CC formée par un condensateur. C'est en fait une combinaison de STATCOM et SSSC. Son schéma de principe est représenté sur la Figure (II.12) [3].

Le principe de l'UPFC est de dériver une partie du courant circulant dans la ligne pour la réinjecter avec la bonne phase. Le convertisseur parallèle 1 a pour fonction de prélever de la puissance active et de la restituer au convertisseur série (2). Ce dernier génère une tension  $U_{pd}$  dont l'amplitude et la phase sont contrôlées et insérées dans la ligne.

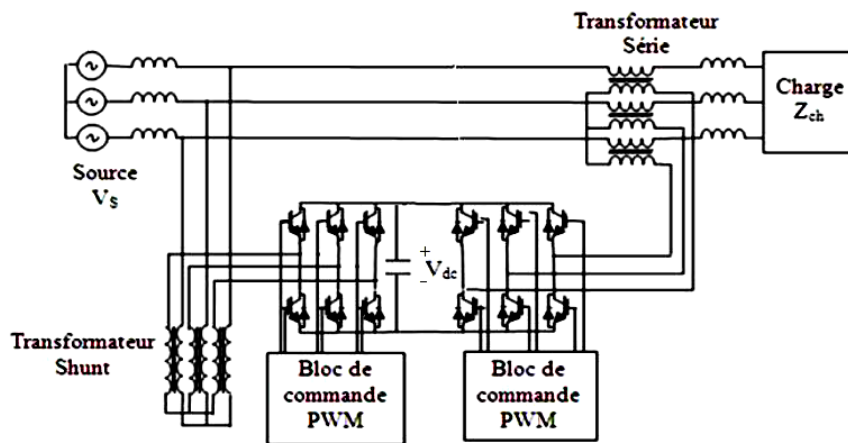


Figure (II.12) : Schéma de principe d'un variateur de charge universel

### II.7.2. Contrôleur de transit de puissance entre ligne IPFC :

IPFC a été proposé pour compenser de nombreuses lignes de transmission dans les sous-stations. Dans sa forme générale, IPFC utilise un convertisseur DC-DC placé en série avec la ligne à compenser. Autrement dit, IPFC a plusieurs SSSC et STATCOM peut être ajouté.

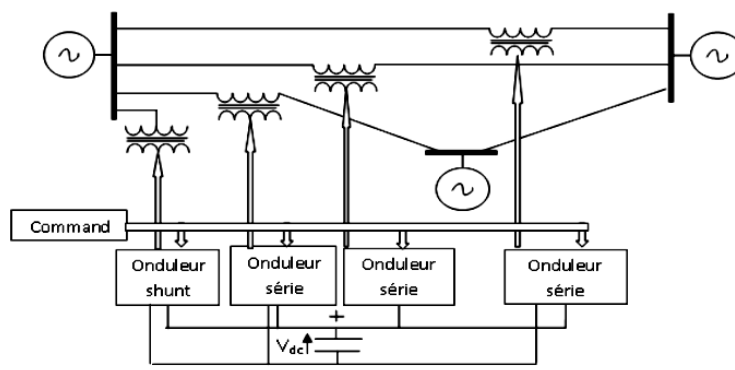


Figure (II.13) : Schéma de principe d'un IPFC

## II.8. Conclusion :

Nous introduisons d'abord les techniques de compensation traditionnelles (série et parallèle) dans ce chapitre, nous donnons donc des définitions et des classifications de différents types de contrôleurs FACTS, tels que SVC, STATCOM, TCSC, SSSC, UPFC, IPFC. Cette classification est adoptée comme classification générale pour le système FACTS.

La plupart d'entre eux sont déjà utilisés dans la pratique.

Cependant, le choix d'un contrôleur spécifique dépend des exigences de l'application et des performances souhaitées. L'analyse commence par l'étude et l'identification des problèmes de système associés aux systèmes existants.

Si aujourd'hui FACTS est encore peu utilisé par rapport à son potentiel, le développement de l'électronique de puissance va rendre les solutions FACTS de plus en plus compétitives face aux évolutions des réseaux.

Nous avons choisi d'étudier le TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*) en tant que dispositif FACTS pour contrôler et améliorer la tension et la puissance réactive dans les réseaux de transport d'énergie. Une étude approfondie sur la modélisation et le contrôle des contrôleurs TCSC est présentée dans le chapitre suivant.

---

# *Chapitre III*

## Etude et modélisation du TCSC

---

### III.1. Introduction :

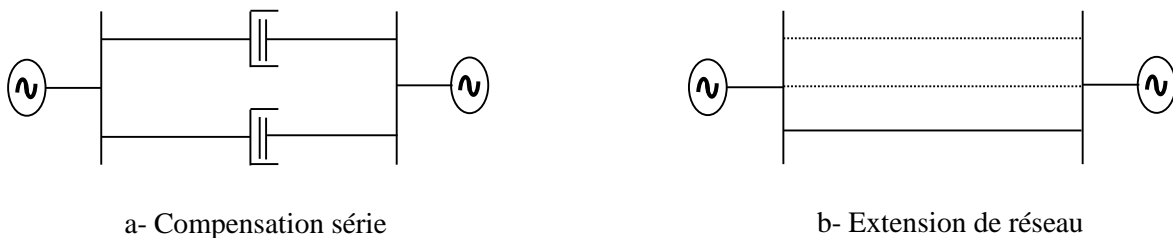
L'utilisation de condensateurs en série pour compenser la réactance de ligne longue distance est le moyen le plus efficace et le plus économique d'améliorer la transmission de puissance. Les deux principales raisons d'incorporer des condensateurs en série dans le réseau de transmission sont :

- Augmentation de la capacité de transport de la ligne en raison de contraintes de stabilité permanentes et transitoires accrues.
- Réduire les pertes dans le réseau en optimisant la distribution de puissance active entre les lignes parallèles

Avec le développement de la technologie de l'électronique de puissance, les condensateurs série contrôlables (*condensateurs série contrôlés* CSC) offrent un moyen puissant d'améliorer les performances du réseau de transmission de puissance. Le CSC permet à l'opérateur de contrôler le niveau de flux de puissance et de supprimer les oscillations de courant.

Les bancs de condensateurs en série doivent être conçus pour fournir au moins le même rendement de transmission que les lignes, afin qu'ils puissent être intégrés dans le réseau de transmission sans compromettre sa stabilité.

L'intégration de la compensation série dans le réseau peut améliorer le contrôle de la tension et équilibrer la puissance réactive, car la puissance réactive générée par les condensateurs série augmente lorsque la puissance transmise augmente. Un condensateur série est un dispositif autorégulateur.



**Figure (III.1) :** Augmente la même puissance transmissible mais réduit les coûts d'investissement de 90 % grâce à la compensation en série

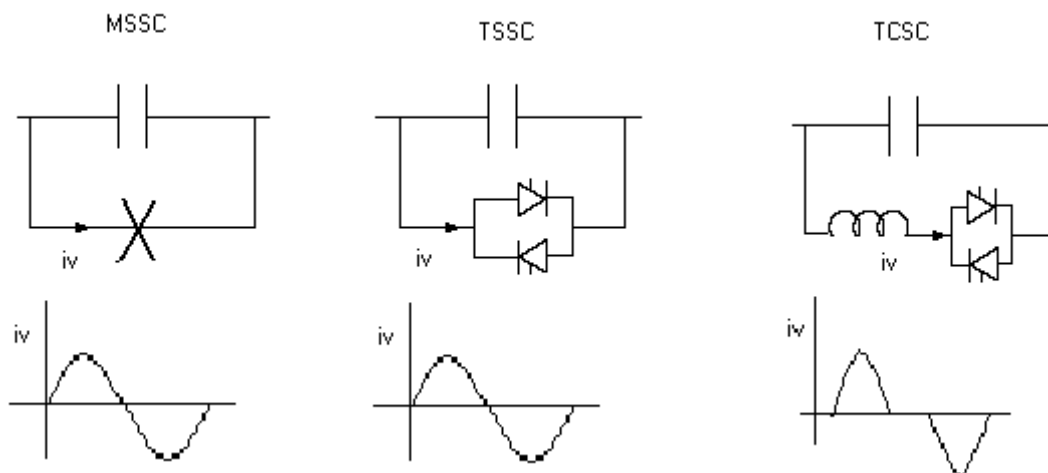
La configuration du réseau de transport et ses exigences en matière d'équipements de protection et de temps de réinsertion déterminent le plan de protection à mettre en œuvre. Pour cette raison, le temps entre la déconnexion de la ligne de défaut et le fonctionnement des condensateurs en série est la considération la plus importante.

### III.2. Technologie des CSC :

La configuration d'un système d'alimentation électrique met en évidence plusieurs défis opérationnels à relever par un choix approprié de la technique de compensation série TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*), TSSC (*Thyristor Switched Series Capacitor*) et MSSC (*Mechanical Switched Series Capacitor*) sont les équipements pour transporter les besoins du système.

En 1997, la première installation commerciale TCSC a été mise en service au poste de St (Suède). Ce TCSC offre un haut niveau de compensation sans augmenter le risque de résonance sous-synchrone, combiné à des fonctions de contrôle telles que l'amortissement des oscillations de courant [22].

Tous les dispositifs de compensation en série en fonctionnement utilisent des batteries de condensateurs passifs comme principale source de puissance réactive. L'ajout de commandes de capacité fixes permet de modifier la réactance capacitive insérée, contrôlant ainsi le niveau de compensation. Ce type de commande utilise des dispositifs de commutation mécaniques ou une technologie à semi-conducteurs tels que des thyristors de puissance.



**Figure (III.2) :** Dispositifs CSC

Les caractéristiques du dispositif CSC se traduisent par :

- Contrôler le flux de puissance dans une ligne spécifique.
- Minimiser les pertes du système.
- Amortissement des oscillations du système.
- Évitez les résonances sous-synchrones.
- Adapter la transmission de puissance aux conditions actuelles.
- Améliorer la stabilité du système.



### III.3. Etude du contrôleur série TCSC :

#### III.3.1. Mode de fonctionnement du TCSC :

Un TCSC peut fonctionner selon plusieurs modes en modifiant la valeur de son impédance  $X$ .

Trois mécanismes de fonctionnement du TCSC peuvent être distingués :

##### a. Mode de blocage :

Le TCSC fonctionne en mode de verrouillage lorsque la vanne à thyristor n'est pas enclenchée et que le thyristor reste non conducteur. Le courant de ligne ne circule que dans la batterie de condensateurs (Figure III.7).

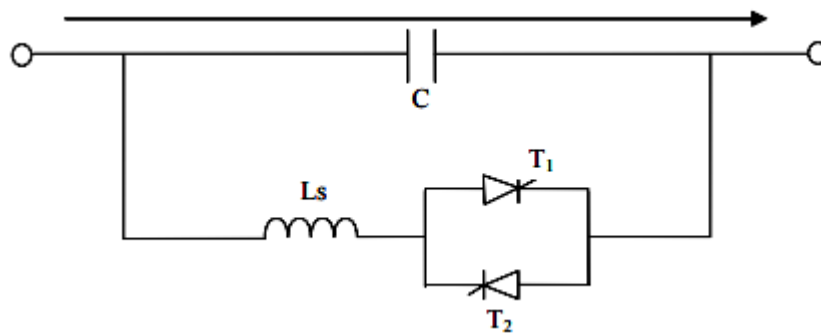


Figure (III.3) : TCSC en mode de blocage

La tension aux bornes de la batterie de condensateurs ( $U_C$ ) est donnée par :

$$U_C = j.X_C.I_C \quad \text{Tel que : } X_C < 0$$

Dans ce mode, le TCSC fonctionne comme un condensateur en série fixe.

##### b. Mode by-pass :

Si la vanne à thyristors est commandée en permanence, elle reste ouverte et le TCSC se comporte comme une mise en parallèle d'un condensateur série et d'une inductance de la branche vanne à thyristors (Figure III.4).

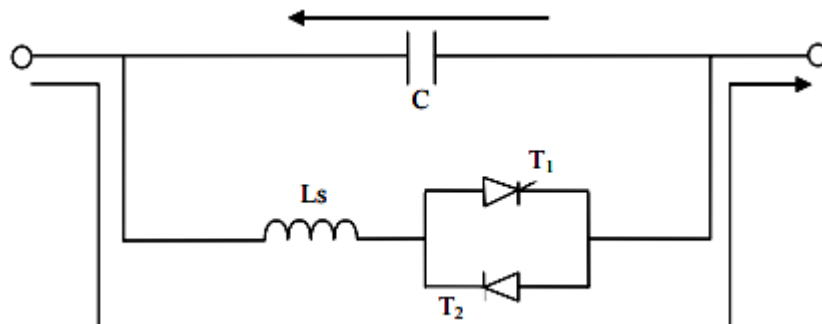


Figure (III.4) : TCSC en mode by-pass

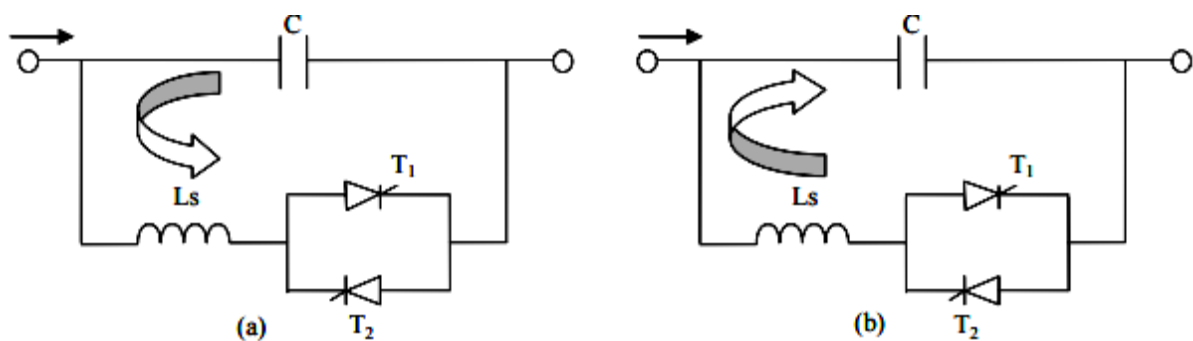
La réactance totale du TCSC est donnée par l'équation suivante :

$$X_{TCSC} = \frac{X_L \cdot X_C}{X_L + X_C} \quad (\text{III.1})$$

Dans ce mode, la tension du condensateur pour un courant de ligne donné est beaucoup plus faible qu'en mode blocage. Par conséquent, le mode by-pass est utilisé pour réduire la contrainte du condensateur lors des défauts du système.

### c. Mode de conduction partielle :

Le thyristor est commandé pour être partiellement passant. Le courant de boucle traverse le TCSC, dont la réactance apparente est supérieure à la réactance du condensateur (ou de l'inductance) seul (Figure IV.8) [18].



**Figure (III.5) :** TCSC est en mode de conduction partielle, (a) T1 est activé, (b) T2 est activé

Si le thyristor  $T_1$  est passant, alors le thyristor  $T_2$  est bloqué et inversement. Quand  $T_1$  roule l'impédance équivalente est inductive (Figure III.5 (a)) et si  $T_2$  est activé, l'impédance l'équivalent est capacitif (Figure III.5 (b)).

## III.4. Applications des CSC :

La compensation série est actuellement connue comme étant la meilleure technique pour augmenter la capacité de transfert de puissance des lignes de transmission. Différents modes de contrôle des condensateurs en série peuvent être des solutions appropriées pour :

### III.4.1. Un degré élevé de compensation série :

Les condensateurs en série augmentent la capacité de transmission de la ligne de transmission. Le degré maximal de compensation dans le réseau de transport est limité par le risque potentiel d'interaction entre les condensateurs en série et le turbo-alternateur le plus proche. Ce phénomène est appelé résonance sous-synchrone (SSR).

Si un condensateur réactif  $X_C$  est placé en série avec la ligne de transmission (Figure III.6), l'impédance de cette dernière devient  $(X_L - X_C)$ . Alors la puissance transmise par cette ligne est donnée par :

$$P_t = \frac{E_S E_R}{X_L - X_C} \sin \delta \quad \text{(III.2)}$$

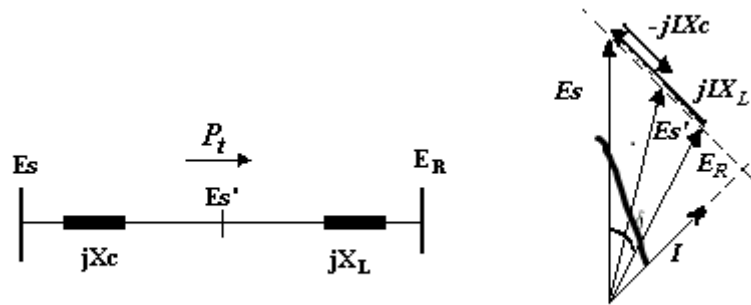


Figure (III.6) : Compensation série

Par rapport à la puissance d'émission maximale de la ligne non compensée, la puissance d'émission maximale est augmentée  $(X_L/X_C - X_L)$ , si le condensateur a un contrôle, le rapport  $(X_L/X_C - X_L)$  devient variable, donc la puissance transmise sera est contrôlable.

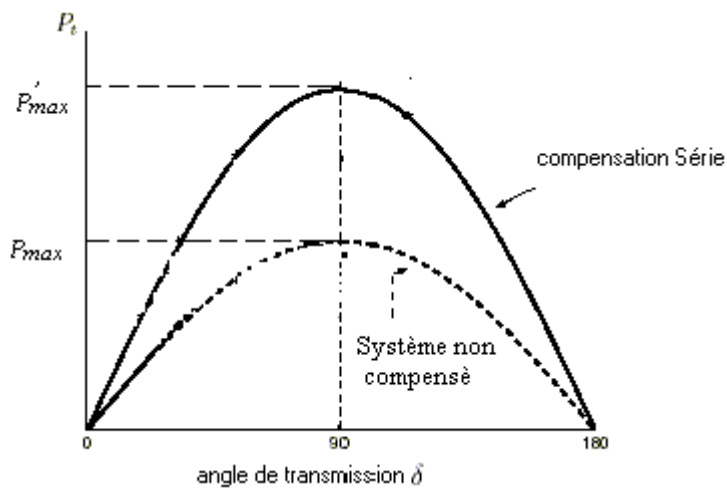


Figure (III.7) : Effet de la compensation sur la puissance transmise

### III.4.2. Amortissement des oscillations de puissance :

Pour des niveaux de puissance élevés dans de longues lignes de transmission, plusieurs oscillations de courant non amorties se produisent dans la plage de fréquences de 0,2 à 2,0 Hz. Le CSC peut supprimer ces oscillations, permettant un transfert de puissance de haut niveau sur de longues distances. En outre, le CSC peut fournir un support critique au réseau en cas de panne majeure en rétablissant le réseau en fonctionnement synchrone.

### III.4.3. Interconnexions:

Deux ou plusieurs réseaux sont souvent interconnectés pour permettre un transfert économique d'électricité entre eux, pour partager leurs réserves en cas de besoin et pour augmenter leur rentabilité et leur fiabilité. Les CSC sont un moyen efficace de s'interconnecter lorsque l'alimentation est faible au point d'interconnexion, en profitant d'échanges d'énergie économiques réguliers.

### III.4.4. Contrôle de l'écoulement de puissance :

CSC permet aux opérateurs de mieux gérer le flux d'électricité à travers les lignes de transmission. Ceci est particulièrement utile lorsqu'une répartition inégale de la puissance entre les différents circuits de transmission provoque une surcharge et oblige les opérateurs à réduire la capacité disponible sur certaines lignes.

### III.4.5. Contrôle de capacité de chargement des lignes de transmission :

Les CSC sont un moyen efficace d'améliorer la capacité de transmission des lignes de transmission. Le degré de compensation peut être contrôlé pour minimiser les pertes du système pendant le fonctionnement normal.

## III.5. Analyse du circuit d'un TCSC et ses principales fonctions :

Étant donné que les composants fondamentaux de la tension et du courant sont contrôlés, le TCSC devient similaire à une impédance contrôlable, qui est le résultat de la réactance équivalente du composant TCR parallèle et du condensateur.

Notons par :

$$- \text{ L'impédance équivalente du TCSC } Z_{TCSC} = jX_{TCSC} \quad (\text{III.3})$$

$$- \text{ L'impédance équivalente du TCR. } Z_{TCR} = jX_{TCR} = j \frac{X_L \pi}{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha} \quad (\text{III.4})$$

$$- \text{ L'impédance de la capacité } Z_C = -jX_C \quad (\text{III.5})$$

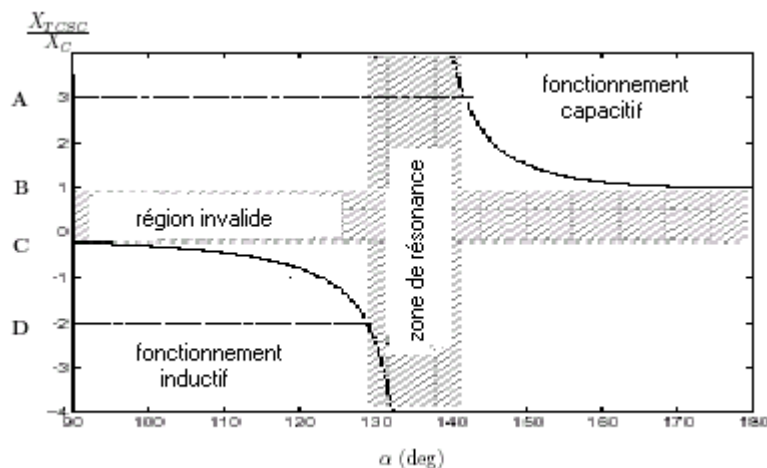
On peut écrire :

$$Z_{TCSC} = Z_C // Z_{TCR} = \frac{-jX_C \cdot jX_{TCR}}{-jX_C + jX_{TCR}} = j \frac{X_C X_{TCR}}{X_C - X_{TCR}} = j \frac{X_C X_L}{\frac{X_C}{\pi} (2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha) - X_L}$$

$$D'où \quad X_{TCSC}(\alpha) = \frac{X_C X_L}{\frac{X_C}{\pi} (2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha) - X_L} \quad (III.6)$$

Dans l'équation (III.6), le signe de l'impédance peut être négatif ou positif. Certaines valeurs d'angle d'amorçage  $\alpha$  causent un état de résonance. Se traduisent par un état de résonance. Ces valeurs dépendent du rapport  $X_C / X_L$ .

### III.5.1. Les limites de fonctionnement :

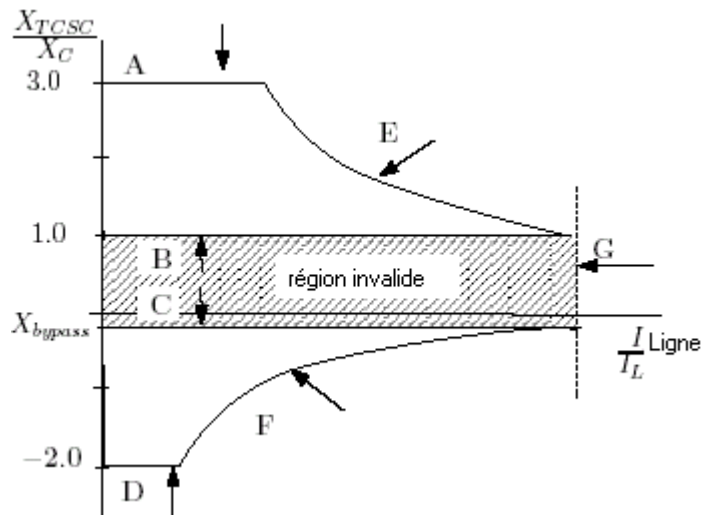


**Figure (III.8) :** Les caractéristiques  $X_{TCSC} / X_C$  dépendent de l'angle de départ

Avec un rapport cyclique  $\alpha$  La figure (III.8) montre l'état permanent de la réactance équivalente TCSC en fonction de l'angle d'amorçage  $\rho = 2.06$ . Pour une conduction continue du thyristor ( $\alpha = 90^\circ$ ), le TCSC fonctionne en mode bidirectionnel (mode court-circuit), où l'impédance est presque égale à la réactance inductive ( $|X_L| \ll |X_C|$ ). Pour  $\alpha = 180^\circ$ , le thyristor est bloqué (mode blocage) et la réactance effective est celle du condensateur. L'appareil peut être contrôlé en continu dans la zone de détection ( $90^\circ \leq \alpha \leq 129^\circ$ ) et dans la zone capacitive ( $142^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ ), tout en évitant la zone de résonance.

En fonctionnement capacitif,  $X_{TCSC}$  a pour valeur  $1.0 X_C \leq X_{TCSC} \leq 3.0 X_C$  et en fonctionnement inductif, la valeur est  $-2.0 X_C \leq X_{TCSC} \leq 0$ .

Pour un système avec un seul dispositif TCSC, la réactance  $X_{TCSC}$  ne peut pas prendre une valeur comprise entre 0 et  $X_C$



**Figure (III.9) :** Caractéristique  $X_{TCSC} / X_C$  en fonction du courant de la ligne  $I_{\text{ligne}}$

La figure (III.9) représente l'état stable de la réactance équivalente d'un TCSC en fonction du courant de la ligne, où toutes les contraintes et limitations de fonctionnement sont définies comme suit :

**A, D** : limitation de la zone de résonance.

**B** : limitation d'angle d'amorçage ( $\alpha = 180^\circ$ , thyristors en mode bloqué).

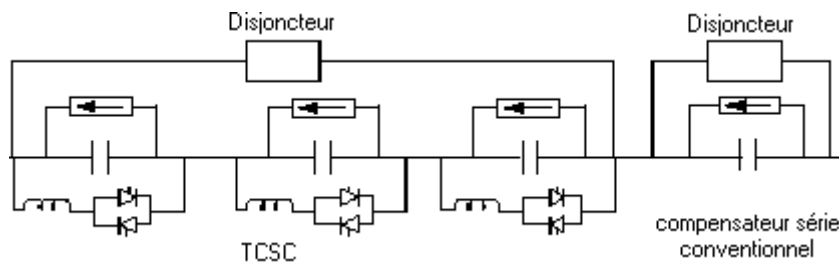
**C** : limitation d'angle d'amorçage ( $\alpha = 90^\circ$ , thyristors en mode de court-circuit).

**E, F** : limites supérieures de la tension pour le fonctionnement inductif et capacitif.

**G** : courant maximum permettant la conduction continue.

### III.5.2. Implémentation pratique :

Dans une mise en œuvre pratique, il y a plusieurs compensateurs en série. Pour des raisons économiques, deux montages hybrides sont utilisés : l'un constitué de plusieurs TCSC connectés en série et l'autre constitué d'un compensateur classique [23].



**Figure (III.10) :** Implémentation pratique du TCSC

L'avantage de connecter plusieurs TCSC en série est que la réactance effective totale se traduit par une plage de valeurs plus large, puisque l'intervalle de contrôle restreint devient plus large dans le cas d'un système avec un seul contrôleur TCSC (Figure III.11).

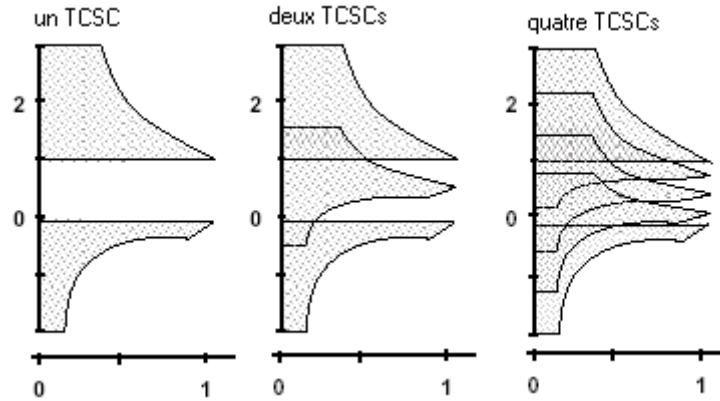


Figure (III.11) : Caractéristique  $X_{TCSC}$  -vs-I en fonction du nombre de TCSCs en séries

### III.5.3. Implémentation des TCSCs dans le contrôle de l'écoulement de puissance :

Supposons qu'un dispositif TCSC soit placé entre deux nœuds  $k$  et  $m$  (Figure III.12). Si les pertes sont ignorées, la puissance  $P$  injectée dans le TCSC depuis le nœud  $k$  est égale à la puissance  $P$  injectée par le TCSC au nœud  $m$ . Le modèle TCSC représenté par la Figure (III.12) est décrit par le système d'équations (III.7) :

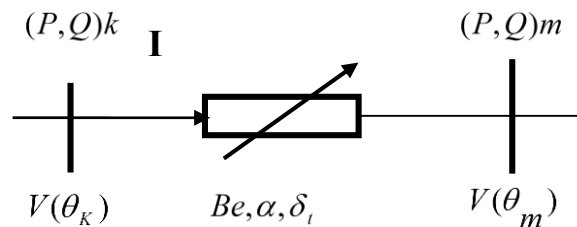


Figure (III.12) : Modèle du TCSC dans un écoulement de puissance

$$P = -V_k V_m B_e \sin(\theta_k - \theta_m)$$

$$Q_k = V_k V_m B_e \cos(\theta_k - \theta_m) - V_k^2 B_e$$

$$Q_m = V_k V_m B_e \cos(\theta_k - \theta_m) - V_m^2 B_e$$

$$B_e = \frac{1}{X_C} - \frac{(2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha)}{\pi X_L}$$

(III.7)

Ou

$$B_e = \frac{1}{X_e}$$

$$\sqrt{P^2 + Q^2} = I V_k$$

$$\theta_k = \theta_m + \delta_t$$

### III.5.4. Puissances de transits pour le modèle TCSC Power Flow :

Le flux de puissance de TCSC du nœud k au nœud m  $S_{km}$  est :

$$S_{km} = V_k I_{km}^* = V_k Y_{km}^* (V_k^* - V_m^*) \quad (III.8)$$

Avec :

$$Y_{km}^* = \frac{1}{R_{km} + j(X_{km} - X_{TCSC})} = \frac{R_{km} + j(X_{km} + X_{TCSC})}{R_{km}^2 + (X_{km} + X_{TCSC})^2} = g_{km} - jb_{km} \quad (III.9)$$

Et :

$$V_k (V_k^* - V_m^*) = V_k^2 - V_k V_m e^{j\delta_{km}}, \delta_{km} = \delta_k - \delta_m \quad (III.10)$$

$$S_{km} = V_k^2 (g_{km} - jb_{km}) - V_k V_m (g_{km} - jb_{km})(\cos \delta_{km} + j \sin \delta_{km}) \quad (III.11)$$

$$P_{km} = V_k^2 g_{km} - V_k V_m (g_{km} \cos \delta_{km} + b_{km} \sin \delta_{km}) \quad (III.12)$$

$$Q_{km} = -V_k^2 b_{km} - V_k V_m (g_{km} \sin \delta_{km} - b_{km} \cos \delta_{km}) \quad (III.13)$$

L'équation de puissance TCSC pour le nœud k est:

$$S_k = V_k I_k^* = V_k \sum_{i=1}^N Y_{ki}^* V_i^* = V_k \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k \\ i \neq m}}^N Y_{ki}^* V_i^* + V_k^2 Y_{kk}^* + V_k Y_{km}^* V_m^* \quad (III.14)$$

$$= V_k \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k \\ i \neq m}}^N Y_{ki}^* V_i^* - V_k^2 \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq m}}^N Y_{kj}^* - V_k^2 Y_{km}^* + V_k Y_{km}^* V_m^* \quad (III.15)$$

$$= V_k \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k \\ i \neq m}}^N Y_{ki}^* V_i^* - V_k^2 \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq m}}^N Y_{kj}^* - S_{km} \quad (III.16)$$



D'où :

$$P_k = V_k \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k \\ i \neq m}}^N (g_{ki} \cos \delta_{ki} + b_{ki} \sin \delta_{ki}) V_i - V_k^2 \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq m}}^N g_{kj} - P_{km} \quad (\text{III.17})$$

$$Q_k = V_k \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k \\ i \neq m}}^N (g_{ki} \sin \delta_{ki} - b_{ki} \cos \delta_{ki}) V_i + V_k^2 \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq m}}^N b_{kj} - Q_{km} \quad (\text{III.18})$$

L'équation de linéarisation de puissance pour le TCSC obtenue par l'angle d'impulsion  $\alpha$  est la suivante :

$$\frac{\partial P_k}{\partial \alpha} = -\frac{\partial P_{km}}{\partial \alpha} = -V_k^2 \frac{\partial}{\partial \alpha} g_{km} + V_k V_m (\cos \delta_{km} \frac{\partial}{\partial \alpha} g_{km} + \sin \delta_{km} \frac{\partial}{\partial \alpha} b_{km}) \quad (\text{III.19})$$

Et

$$\frac{\partial Q_k}{\partial \alpha} = -\frac{\partial Q_{km}}{\partial \alpha} = -V_k^2 \frac{\partial}{\partial \alpha} b_{km} + V_k V_m (\sin \delta_{km} \frac{\partial}{\partial \alpha} g_{km} - \cos \delta_{km} \frac{\partial}{\partial \alpha} b_{km}) \quad (\text{III.20})$$

Avec

$$\frac{\partial g_{km}}{\partial \alpha} = \frac{\partial}{\partial \alpha} \left( \frac{R_{km}}{R_{km}^2 + (X_{km} + X_{TCSC})^2} \right) = \frac{-2R_{km}(X_{km} + X_{TCSC}) \frac{\partial X_{TCSC}}{\partial \alpha}}{(R_{km}^2 + (X_{km} + X_{TCSC})^2)^2} \quad (\text{III.21})$$

Et

$$\frac{\partial b_{km}}{\partial \alpha} = \frac{\partial}{\partial \alpha} \left( \frac{-(X_{km} + X_{TCSC})}{R_{km}^2 + (X_{km} + X_{TCSC})^2} \right) \quad (\text{III.22})$$

$$= \frac{-(R_{km}^2 + (X_{km} + X_{TCSC})^2) \frac{\partial X_{TCSC}}{\partial \alpha} + 2(X_{km} + X_{TCSC})(X_{km} + X_{TCSC}) \frac{\partial X_{TCSC}}{\partial \alpha}}{(R_{km}^2 + (X_{km} + X_{TCSC})^2)^2} \quad (\text{III.23})$$

A partir de :

$$\begin{aligned} \frac{\partial X_{TCSC}}{\partial \alpha} = & -2K_1(1 + \cos 2\alpha) + K_2 \sin 2\alpha (\cotan(\alpha(\pi - \alpha)) - \tan \alpha) \\ & + K_2 \left( \omega^2 \frac{\cos^2(\delta - \alpha)}{\cos^2(\omega(\delta - \alpha))} - 1 \right) \end{aligned} \quad (III.24)$$

Le système d'équation de linéarisation du flux de puissance est :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta P_{km} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial V} & \frac{\partial P}{\partial \alpha} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial V} & \frac{\partial Q}{\partial \alpha} \\ \frac{\partial P_{km}}{\partial \delta} & \frac{\partial P_{km}}{\partial V} & \frac{\partial P_{km}}{\partial \alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \\ \Delta \alpha \end{bmatrix} \quad (III.25)$$

### III.6. Choix de l'insertion du TCSC dans l'écoulement des puissances :

Selon la littérature [23, 24], la méthode de base d'introduction des dispositifs TCSC dans le calcul du flux de puissance, différentes stratégies de contrôle ont été mentionnées dans le paragraphe précédent.

La stratégie de contrôle que nous choisissons est orientée vers le modèle de flux de puissance à travers l'angle d'impulsion  $\alpha$ . Ce dernier est pris en compte pour éviter d'utiliser un processus itératif supplémentaire pour trouver la susceptance totale requise pour l'angle d'impulsion du modèle. Le modèle inclut l'angle d'impulsion comme l'une des variables d'état.

Donc la matrice jacobienne est comme ça [23]:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k^p \\ \Delta P_m^p \\ \Delta Q_k^p \\ \Delta Q_m^p \\ \Delta P_{km}^{p,\alpha} \end{bmatrix}^i = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k^p}{\partial \theta_k^p} & \frac{\partial P_k^p}{\partial \theta_m^p} & \frac{\partial P_k^p}{\partial V_k^p} V_k^p & \frac{\partial P_k^p}{\partial V_m^p} V_m^p & \frac{\partial P_k^p}{\partial \alpha^p} \\ \frac{\partial P_m^p}{\partial \theta_k^p} & \frac{\partial P_m^p}{\partial \theta_m^p} & \frac{\partial P_m^p}{\partial V_k^p} V_k^p & \frac{\partial P_m^p}{\partial V_m^p} V_m^p & \frac{\partial P_m^p}{\partial \alpha^p} \\ \frac{\partial Q_k^p}{\partial \theta_k^p} & \frac{\partial Q_k^p}{\partial \theta_m^p} & \frac{\partial Q_k^p}{\partial V_k^p} V_k^p & \frac{\partial Q_k^p}{\partial V_m^p} V_m^p & \frac{\partial Q_k^p}{\partial \alpha^p} \\ \frac{\partial Q_m^p}{\partial \theta_k^p} & \frac{\partial Q_m^p}{\partial \theta_m^p} & \frac{\partial Q_m^p}{\partial V_k^p} V_k^p & \frac{\partial Q_m^p}{\partial V_m^p} V_m^p & \frac{\partial Q_m^p}{\partial \alpha^p} \\ \frac{\partial P_{km}^{p,\alpha}}{\partial \theta_k^p} & \frac{\partial P_{km}^{p,\alpha}}{\partial \theta_m^p} & \frac{\partial P_{km}^{p,\alpha}}{\partial V_k^p} V_k^p & \frac{\partial P_{km}^{p,\alpha}}{\partial V_m^p} V_m^p & \frac{\partial P_{km}^{p,\alpha}}{\partial \alpha^p} \end{bmatrix}^i \begin{bmatrix} \Delta \theta_k^p \\ \Delta \theta_m^p \\ \frac{\Delta V_k^p}{V_k^p} \\ \frac{\Delta V_m^p}{V_m^p} \\ \Delta \alpha^p \end{bmatrix}^i \quad (III.26)$$

Cependant, afin d'éviter les problèmes numériques causés par l'adaptation correcte de la matrice jacobienne, certains travaux [25, 26] proposent de traiter le dispositif TCSC comme une réactance fixe jusqu'à ce qu'une différence de réactance pour un angle de tension spécifié se produise. Depuis lors, la série d'équations régissant le compensateur a été inclus dans le processus itératif.

Le dispositif TCSC et la ligne sur laquelle il est installé peuvent être considérés comme une ligne à impédance variable. Le but de l'installation du TCSC est de rendre le flux de puissance à travers la ligne (entre les nœuds  $k$  et  $m$ ) égal à la valeur spécifiée ( $P_{km\ sp}$ ).

1<sup>ère</sup> étape :

Le flux de puissance est calculé à l'aide de l'impédance brute de la ligne ( $X_{\text{ligne}}$ ).

2<sup>ème</sup> étape :

Si le flux de puissance à travers la ligne ( $P_{km\ calc}$ ) est égal à ( $P_{km\ esp}$ ), alors le problème est résolu et il n'est pas nécessaire d'installer un TCSC.

3<sup>ème</sup> étape :

Si ce n'est pas le cas, l'impédance de ligne doit être modifiée.

Ainsi, si :  $P_{km\ calc} > P_{km\ esp}$ ,  $X_{eq}$  de la ligne doit être augmenté.

$P_{km\ calc} < P_{km\ esp}$ ,  $X_{eq}$  de la ligne doit être diminué.

Ou :

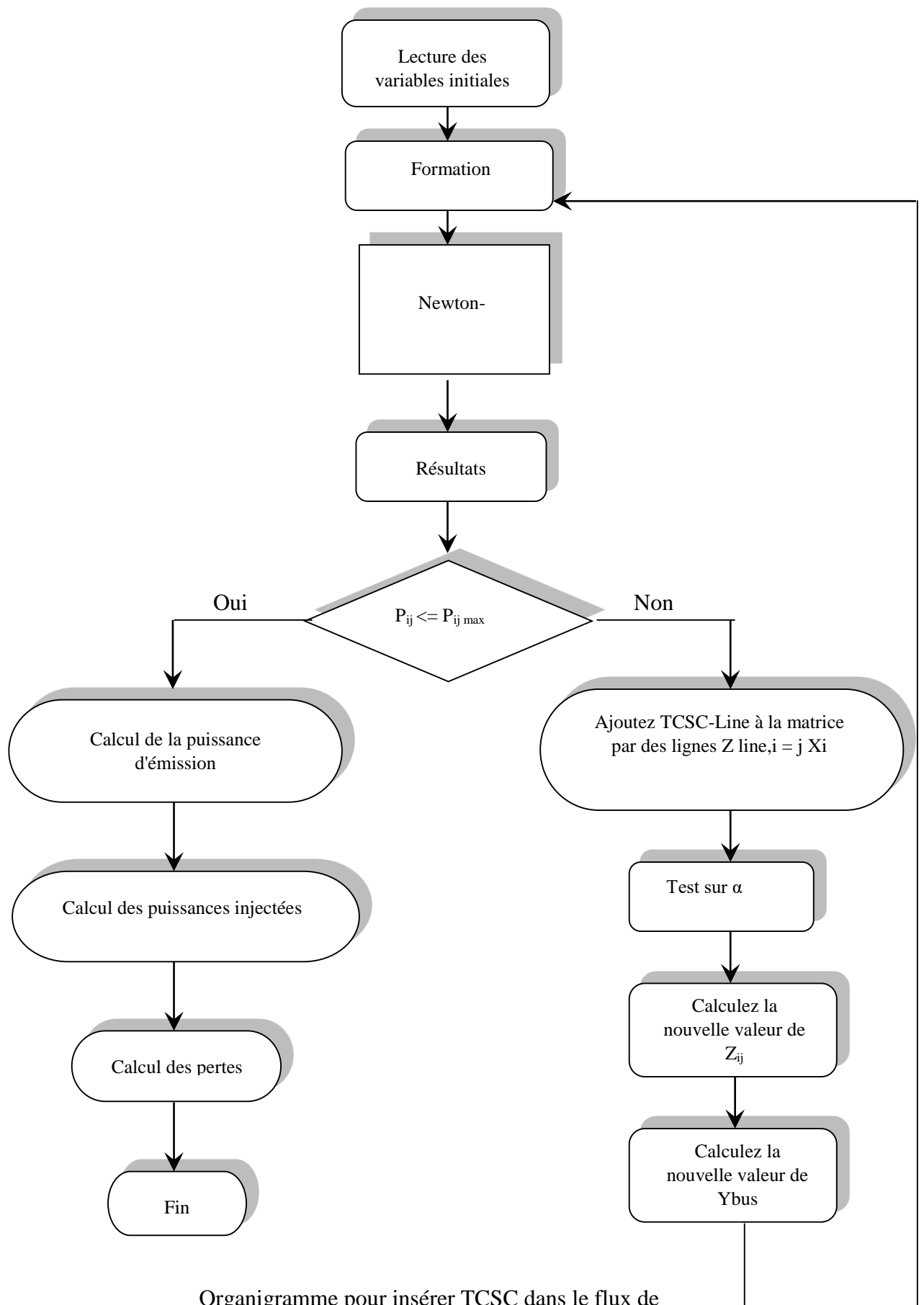
$$X_{eq} = X_{\text{ligne}} + X_{\text{TCSC}} \quad (\text{III.27})$$

4<sup>ème</sup> étape :

Calculez ensuite le nouveau flux de puissance et continuez le processus jusqu'à ce que

$$P_{km\ calc} = P_{km\ esp}.$$

L'organigramme général du flux de puissance de la méthode Newton-Raphson branché sur le contrôleur de transfert de puissance TCSC est le suivant :



Organigramme pour insérer TCSC dans le flux de puissance par la méthode Newton-Raphson.

### **III.7. Conclusion :**

L'arrivée de la commande à thyristor a élargi le champ d'application de la compensation série. En utilisant TCSC, le taux de compensation  $k$  peut être modifié à la fréquence fondamentale (50 Hz) à une vitesse limitée uniquement par le temps de réponse de l'électronique de commande. C'est le début d'applications jusqu'ici inconnues de la compensation série, telles que le contrôle des flux d'énergie après un événement de réseau ou l'amortissement des oscillations de puissance ou la minimisation des pertes de transfert de puissance. Pour cela, nous avons choisi une grille de 57 nœuds et inséré le contrôleur de flux de puissance TCSC, et bien sûr la procédure de flux de puissance utilisant la méthode Newton-Raphson.

---

# *Chapitre IV*

## Modélisation d'un réseau électrique

---

## IV.1. Introduction :

Pour étudier le réseau et effectuer tous les calculs mathématiques qui lui sont associés, c'est-à-dire pour calculer les courants, les tensions, les puissances active et réactive, et les puissances dissipées, il faut trouver un modèle adapté et représentatif. Pour ce réseau, le modèle doit représenter fidèlement les phénomènes réels.

Dans un réseau électrique, il y a des générateurs, des lignes de transmission, des transformateurs et des charges (consommation), chaque élément a son propre modèle pour le représenter.

## IV.2. Modélisation des consommations et des productions :

La production et la consommation sont représentées de la même manière par l'injection d'électricité, l'injection positive représente la production et l'injection négative représente la consommation.

### IV.2.1. Modélisation des lignes :

Une ligne électrique est une liaison entre deux nœuds p et q, qui peut être représentée par son impédance  $Z$  ou son admittance  $Y$  ; sa modélisation est donnée par le diagramme de symétrie de la figure (IV.1), comme suit :

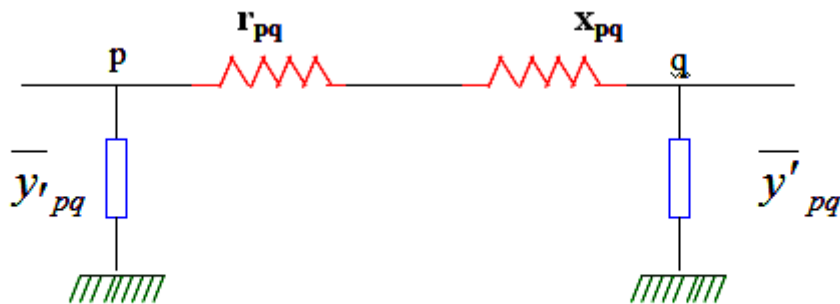


Figure (IV.1) : Modélisation des lignes et des câbles

### IV.2.2. Modélisation des générateurs :

Un moteur synchrone est un moteur à courant alternatif dans lequel la fréquence de la tension induite générée est constante proportionnelle à la vitesse de rotation. Il se compose de : armature fixe, capteur rotatif. On appelle moteurs synchrones toutes les machines qui tournent précisément à une vitesse correspondant à la fréquence et à la tension finale du courant.

Les machines à faible vitesse angulaire ont des pôles saillants. Pour les grosses machines à grande vitesse (3000 tr/min, dans les centrales au fioul ou au charbon), (1500 tr/min dans les centrales nucléaires), utiliser un rotor lisse à entrefer constant.

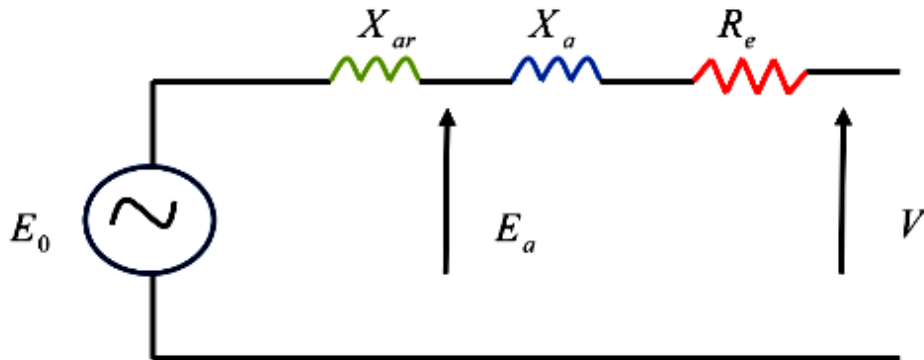


Figure (IV.2) : Modélisation de générateur

$E_0$  : La fem à vide.

$E_a$  : La fem en charge.

$V$  : Tension de sortie.

$X_{ar}$  : Réactance de réaction d'induit.

$X_a$  : Réactance de fuite.

$R_e$  : Résistance d'enroulement.

### IV.2.3. Modélisation du transformateur :

Le transformateur de puissance est représenté par un quadripôle  $\pi$  asymétrique. Les grandeurs associées sont le rapport de transformation  $\alpha$  et l'impédance de fuite.

Le rapport  $a_{ij}$  est contenu dans les éléments de la matrice d'admittance, c'est-à-dire que la susceptance de la matrice d'admittance est prise en fonction du rapport de transformation  $\alpha$ .

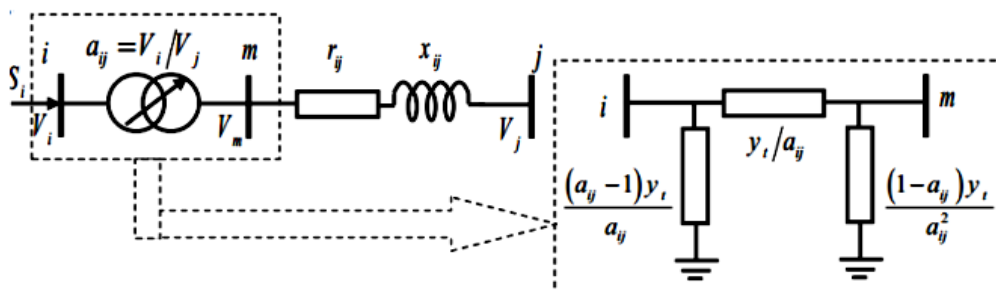


Figure (IV.3) : Modélisation de transformateur



#### IV.2.4. Modélisation d'une charge :

Une charge peut être modélisée par une impédance qui consomme une quantité constante de puissance active et réactive.

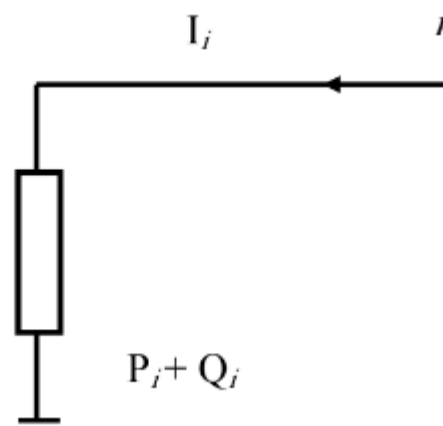


Figure (IV.4) : Modélisation d'une charge

#### IV.2.5. Modélisation d'un système électrique :

Pour un réseau à  $n$  nœuds, l'équation reliant la tension du nœud et le courant injecté est :

$$I = Y \cdot V \quad (\text{IV. 1})$$

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} \cdot V_j \quad (\text{IV. 2})$$

$$i = 1, \dots, n \quad (\text{IV. 3})$$

En pratique, la puissance apparente du système grâce à l'injection est connue. Factorisez  $n$  équations complexes en  $2n$  équations réelles :

$$S_i = P + Q_i = V_i \cdot I_i^* \quad (\text{IV. 4})$$

$$S_i^* = P_i - Q_i = V_i^* \cdot \sum_{j=1}^n Y_{ij} \cdot V_j \quad (\text{IV. 5})$$

$$P_i = \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (\text{IV. 6})$$

$$Q_i = V \sum_{j=1}^n V (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (\text{IV. 7})$$

Ou, exprimant la tension sous forme cartésienne :

$$P_i = e_i \sum_{j=1}^n (G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) + f_i \sum_{j=1}^n (G_{ij}f_j + B_{ij}e_j) \quad (\text{IV. 8})$$

$$Q_i = f_i \sum_{j=1}^n (G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) - e_i \sum_{j=1}^n (G_{ij}f_j + B_{ij}e_j) \quad (\text{IV. 9})$$

Avec :

$V_i, \theta_i$  : 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 représenté par quatre variables :  $P_i, Q_i, V_i, \theta_i$ . Si l'on connaît deux des quatre variables pour chaque nœud, les équations (2.4) et (2.5) permettent de déterminer les deux autres. En pratique, le problème est différent. Pour ce faire, les nœuds du système doivent être classés comme suit :

- **Nœuds P-V.** Pour ce type de nœud, l'usine de production est associée. Spécifie la puissance active et le modulo de tension. Les variables à déterminer sont la phase de la tension et la puissance réactive.
- **Nœuds P-Q.** Pour ce type de nœud, la charge est généralement corrélée. Cette dernière se caractérise par la consommation de puissance active et réactive. Il est également possible d'associer des générateurs à puissance fixe réelle et réactive. Les variables à déterminer sont le module et la phase de la tension.
- **Nœuds V-  $\theta$ .** Pour ce type de nœud, l'usine de production la plus puissante est associative. Dans le nœud k (nœud de référence ou slack bus), nous spécifions la phase () et le module de la tension. Les valeurs à déterminer sont la puissance active et la puissance réactive.

### IV.3. Control des transits de puissances par dispositif FACTS (TCSC) :

Les condensateurs série commandés par thyristor (TCSC), utilisant une électronique de puissance de pointe, peuvent aider à surmonter ces limitations dans toutes les situations où de grandes quantités d'énergie doivent être transférées sur de longues distances ou pour établir des liens entre pays ou régions [27]. C'est une alternative très avantageuse d'un point de vue technique, économique et environnemental.

Les principaux avantages de l'insertion de TCSC dans le réseau sont :

- Compensation du déséquilibre du courant de charge.
- Amélioration de la stabilité dynamique, de l'amortissement des oscillations de puissance et de la stabilité de la tension.
- Réduction du risque de faible résonance synchrone.
- Interconnexion réseau.
- Compensation série contrôlée.

#### IV.4. Caractéristiques du TCSC :

- La conception matérielle s'adapte à la tension maximale qui doit être prise en charge.
- Le débit  $MVar$  de la batterie de condensateurs est proportionnel à la tension maximale produite et au courant maximal correspondant.
- Commandes avancées, en particulier le mode *Su Synchronous Resonance Reduction* (SSR).
- Nombre illimité d'opérations et de séquences
- Réglez souvent le niveau de compensation pour l'amortissement SSR et l'amortissement des oscillations de courant.

#### IV.5. Modélisation du TCSC :

La compensation série est actuellement connue comme étant la meilleure technique pour augmenter la capacité de transfert de puissance des lignes de transmission. Un condensateur série fonctionne en plaçant une source de tension en série avec la ligne de transmission avec la polarité opposée à la chute de tension sur la ligne.

L'effet apparent est une réduction de la réactance apparente de la ligne de transmission.

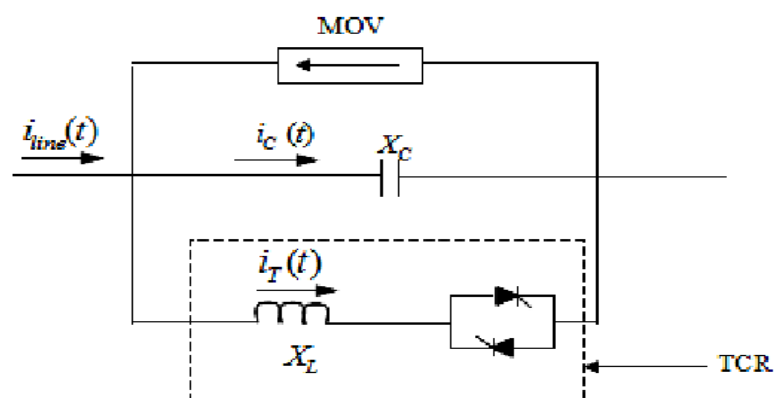


Figure (IV.5) : Schéma d'un TCSC

$(t)$  : est la tension en borne du condensateur.

$(t)$  : est le courant à travers le thyristor.

$il(t)$  : est le courant transite dans la ligne.

$$i_T(\omega t) = \begin{cases} A \left( \cos(\omega t) - \frac{\cos \sigma}{\cos \rho \sigma} \cos(\rho \omega t) \right) & \text{for } -\sigma \leq \omega t \leq \sigma \\ 0 & \text{for } \sigma \leq \omega t \leq \pi - \sigma \\ A \left( \cos(\omega t) + \frac{\cos \sigma}{\cos \rho \sigma} \cos(\rho(\omega t - \pi)) \right) & \text{for } \pi - \sigma \leq \omega t \leq \pi + \sigma \end{cases} \quad (\text{IV.10})$$

$$u_c(\omega t) = \begin{cases} -AX_L \sin \omega t + \frac{A\rho X_L \cos \rho}{\cos \rho \sigma} \sin \rho \omega t & \text{for } -\sigma \leq \omega t \leq \sigma \\ X_C (\sin \omega t - \sin \sigma) - AX_L (\sin \sigma - \rho \cos \sigma \tan \rho \sigma) & \text{for } \sigma \leq \omega t \leq \pi - \sigma \\ -AX_L \sin \omega t - \frac{A\rho X_L \cos \sigma}{\cos \rho \sigma} \sin \rho(\omega t - \pi) & \text{for } \pi - \sigma \leq \omega t \leq \pi + \sigma \end{cases} \quad (\text{IV.11})$$

#### IV.6. Conclusion :

Nous présentons dans ce chapitre la modélisation des systèmes électriques et de leurs composants, ainsi qu'un des dispositifs FACTS (TCSC), un dispositif FACTS installé par nœud ou par ligne.

Parmi les nombreux types de compensateurs, on choisit le compensateur série TCSC, qui permet de réduire la réactance de la ligne et de contrôler la puissance d'émission. Ce sera le sujet du prochain chapitre.

---

# *Chapitre V*

## Simulation et résultats

---

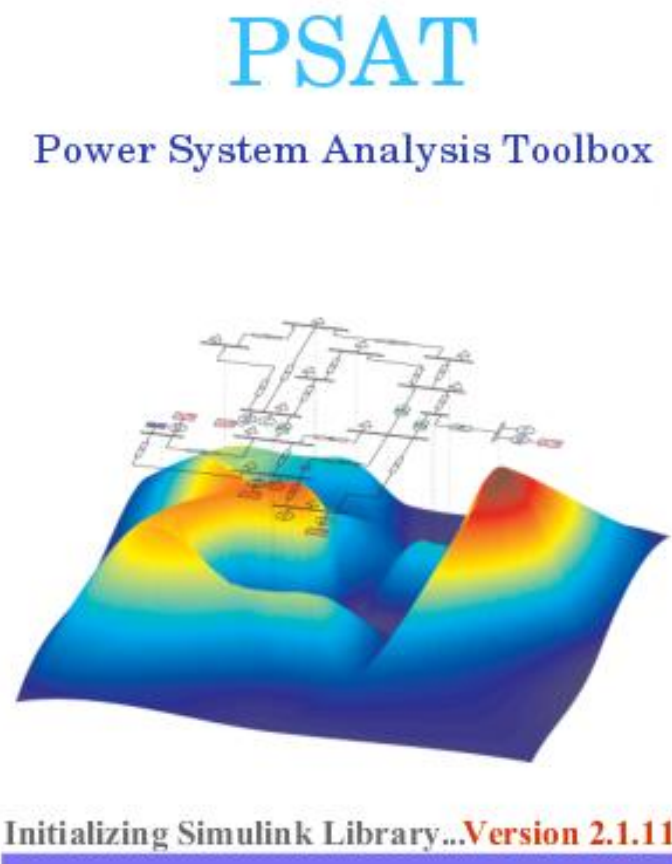
## V.1. Introduction :

MATLAB est un moyen efficace de résoudre plusieurs problèmes liés aux domaines de la modélisation et de l'optimisation. Il dispose d'un compilateur de langage de haut niveau très proche des techniques d'écriture naturelles. Il a des tonnes de fonctionnalités et d'outils bien conçus pour aider avec diverses applications. Les simulations réalisées dans le cadre de ce projet sont réalisées par PSAT basé sur l'environnement MATLAB.

## V.2. Analyse des réseaux électriques par le logiciel (PSAT) :

PSAT est un logiciel librement distribués 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.
- ✓ Augmentation continue de la charge (flux de puissance continu)
- ✓ Flux de puissance optimal
- ✓ Analyse de la stabilité du réseau électrique.
- ✓ Intégration du système FACTS dans le réseau de transport.



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

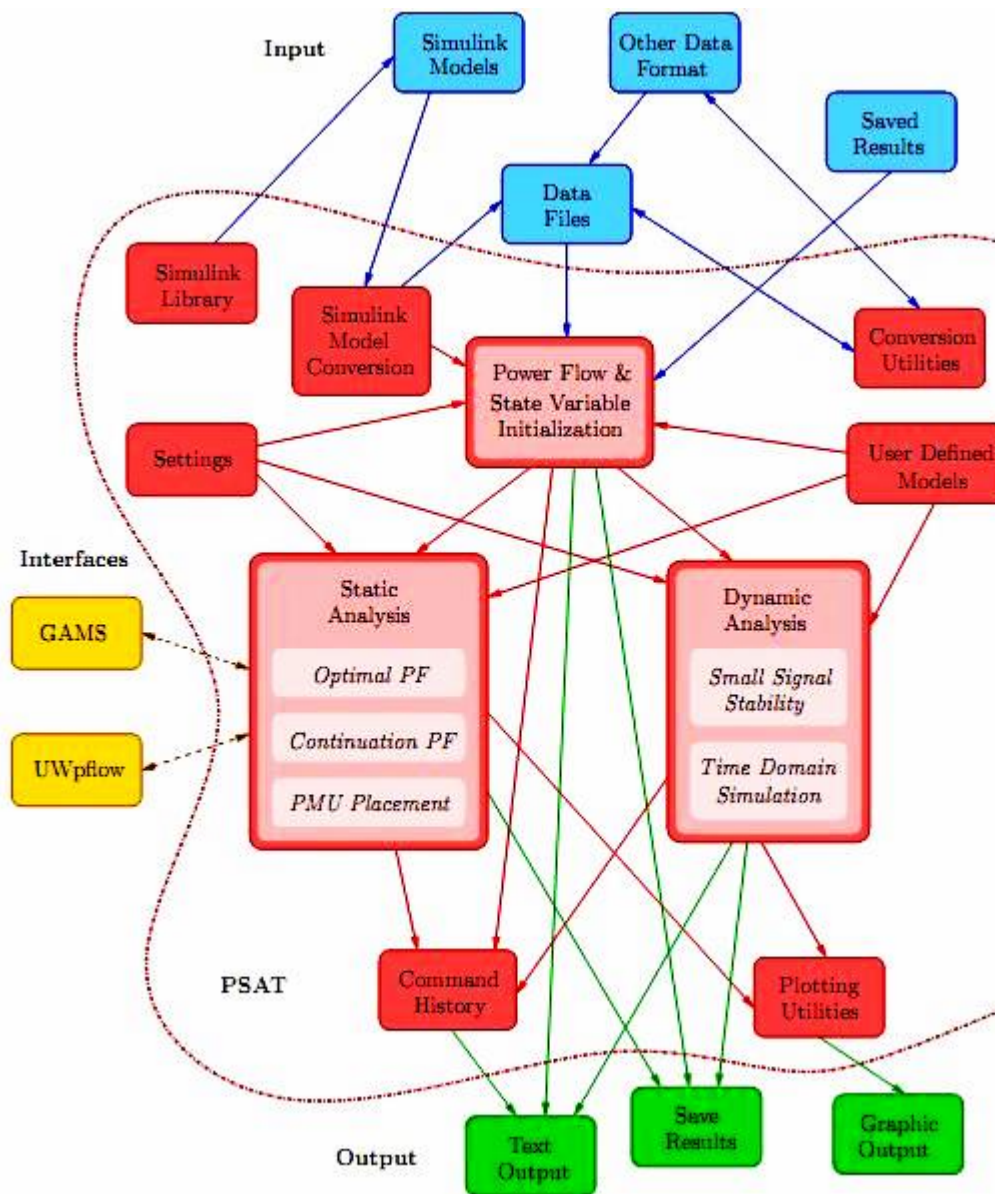


Figure (V.2) : Schéma synoptique du PSAT

### V.3. Simulation :

Cette partie est dédiée à la simulation de l'intégration du compensateur TCSC dans le réseau de test, PSAT utilise le modèle d'injection TCSC proposé au chapitre 3. L'objectif principal est de minimiser la perte totale grâce à l'installation de la compensation série, l'outil de calcul utilisé et le flux de puissance basé sur la méthode Newton-Raphson, il est à noter que les contraintes de sécurité ne sont pas prises en compte, notre objective dans cette étude est de voir l'effet de l'intégration de la compensation série sur les pertes active totales. La figure (IV.3) montre les étapes de simulation de base basées sur PSAT.

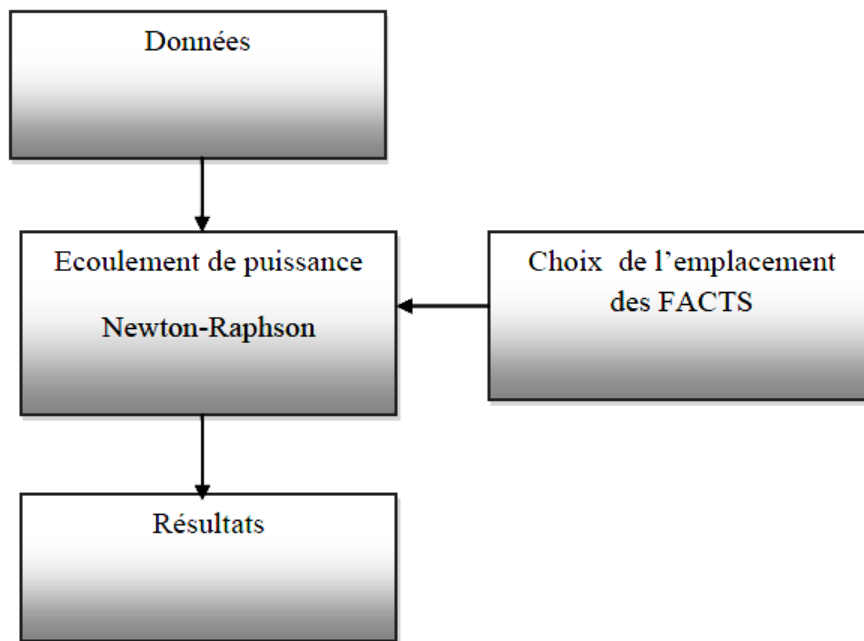


Figure (V.3) : Etapes de simulation

### V.4. Réseau test 1 : IEEE 6-Bus

#### V.4.1. Régime normal (sans compensation) :

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

S base = 100 MVA

U base = 220 kV

Buses :	6
Lines :	11
Generators:	3
Loads :	3

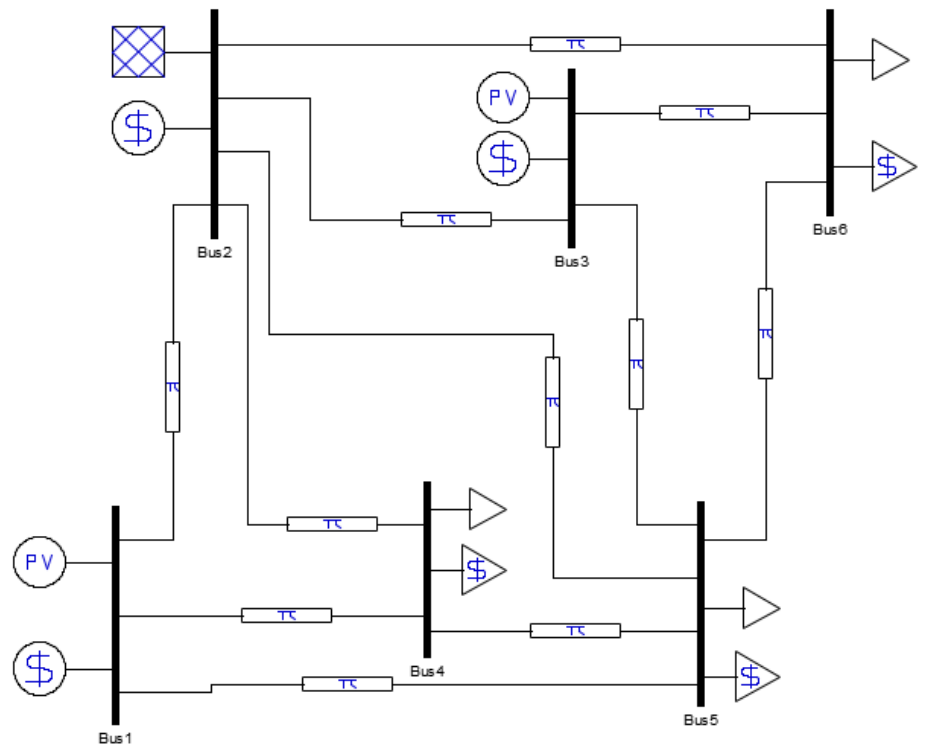


Figure (V.4) : Réseau test IEEE 6 bus



bus (N°)	Type de bus	V (pu)	Phase (rad)	P (pu)	Q (pu)
1	PV	1.06	0	0.8	0
2	Référence	1.06	0	0	0
3	PV	1.06	0	0.6	0
4	PQ	0	0	1	0.7
5	PQ	0	0	0.9	0.6
6	PQ	0	0	1.1	0.8

**Tableau (V.1) :** Donnée de jeux de barre

Line	R (pu)	X (pu)	B (pu)	I <sub>max</sub>
2-6	0.073	0.21	0.05	0.9345
2-3	0.053	0.26	0.06	0.3154
2-5	0.9	0.3	0.038	0.7333
2-4	0.045	0.1	0.03	1.432
2-1	0.1	0.3	0.03	0.2544
1-4	0.06	0.2	0.03	0.9677
1-5	0.07	0.3	0.05	0.8455
3-6	0.023	0.1	0.03	1.2763
3-5	0.13	0.28	0.05	0.6733
5-6	0.11	0.31	0.07	0.2543
5-4	0.23	0.4	0.08	0.1815

**Tableau (V.2) :** Caractéristiques techniques des branches

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

Bus	V [p.u.]	phase [rad]	P gen [p.u.]	Q gen [p.u.]
Bus1	1.06000	0.00451	0.80000	0.51478
Bus2	1.06000	0.00000	1.64302	0.49618
Bus3	1.06000	-0.04950	0.70000	0.94296
Bus4	0.98490	-0.05283	0.00000	0.00000
Bus5	0.95594	-0.09352	0.00000	0.00000
Bus6	0.98063	-0.09362	-0.00000	-0.00000

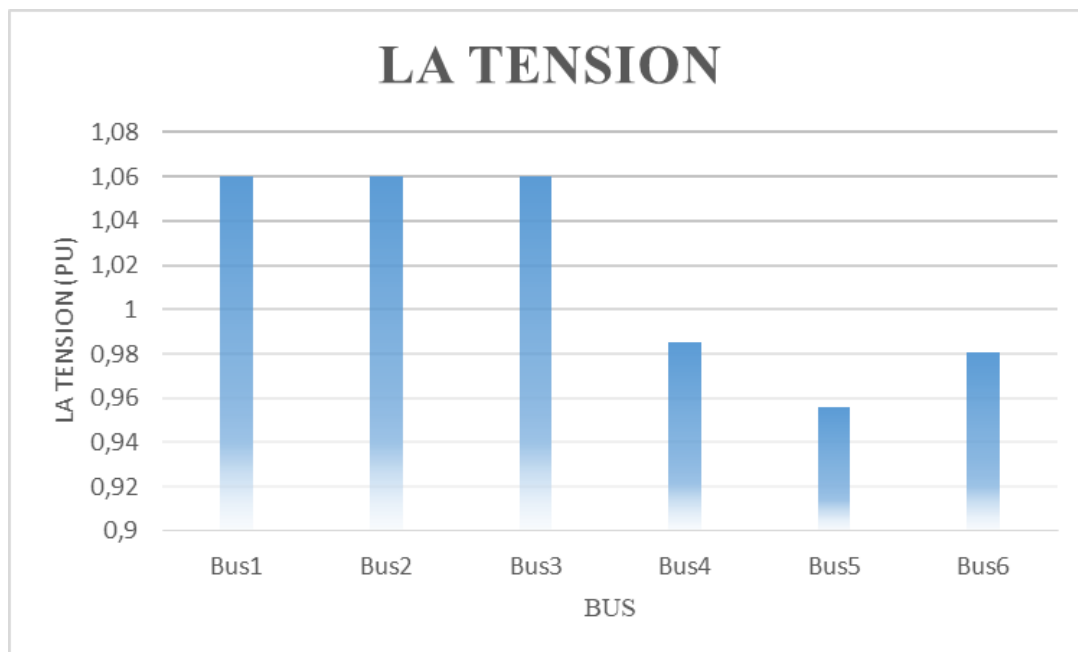
**Tableau (V.3) :** Résultats de l'écoulement de puissance : tension et angle

From Bus	To Bus	Line	P Flow [p.u.]	Q Flow [p.u.]	P Loss [p.u.]	Q Loss [p.u.]
Bus2	Bus6	1.00000	0.54383	0.20519	0.02275	0.01332
Bus3	Bus6	2.00000	0.62144	0.69169	0.01818	0.04777
Bus2	Bus5	3.00000	0.14627	-0.07773	0.01968	-0.03215
Bus4	Bus5	4.00000	0.10362	-0.02513	0.00259	-0.07085
Bus1	Bus5	5.00000	0.39846	0.26283	0.01516	0.01405
Bus1	Bus4	6.00000	0.38633	0.27384	0.01248	0.01020
Bus2	Bus4	7.00000	0.76177	0.45095	0.03201	0.03972
Bus2	Bus3	8.00000	0.20633	-0.07048	0.00207	-0.05725
Bus6	Bus5	9.00000	0.02434	0.03579	0.00062	-0.06389
Bus3	Bus5	10.00000	0.28282	0.23804	0.01745	-0.01335
Bus2	Bus1	11.00000	-0.01518	-0.01175	0.00002	-0.03364

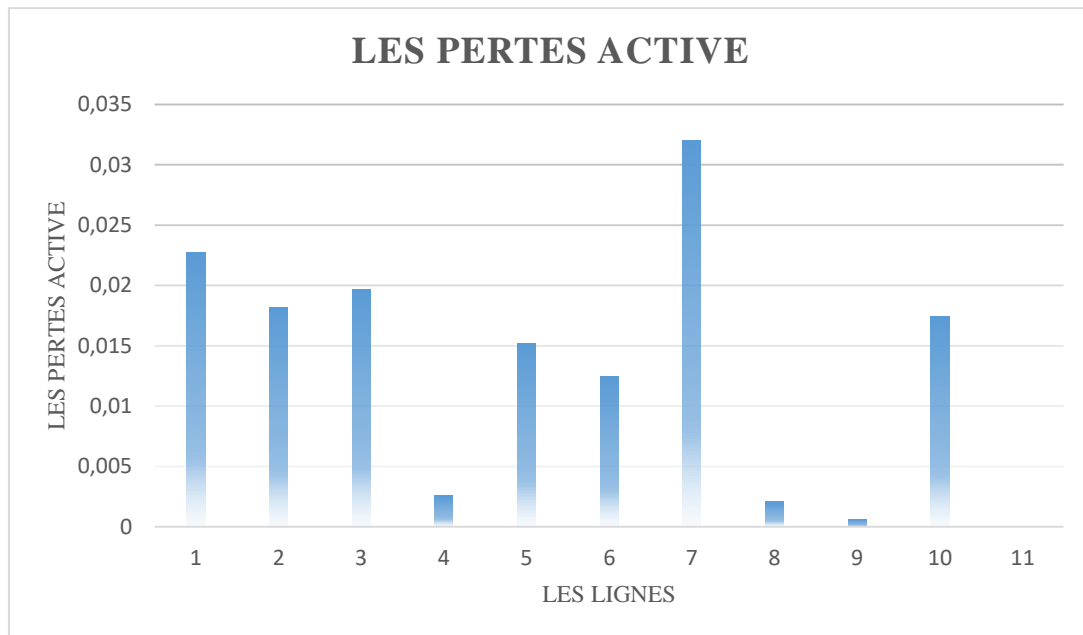
**Tableau (V.4) :** Résultats de l'écoulement de puissance : puissances transitées et les pertes dans les branches

<b>Pertes totales active (pu)</b>	0.14302
<b>Pertes totales réactive (pu)</b>	-0.14607

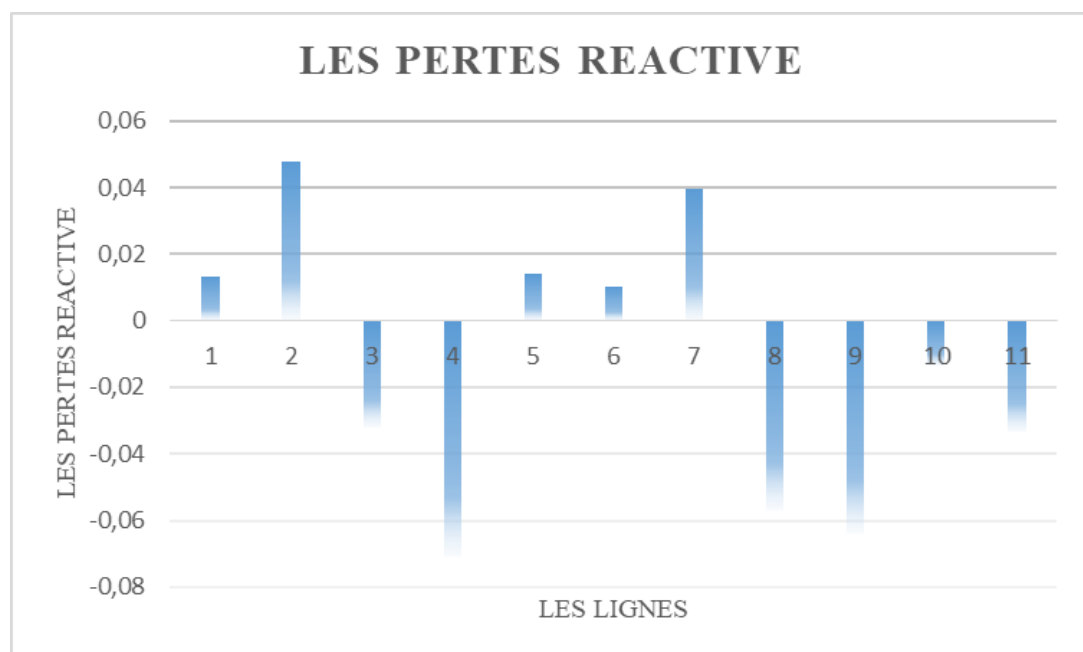
**Tableau (V.5) :** Résultats de l'écoulement de puissance : les pertes totales



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



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



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

D'après les résultats du tableau (V.4) et la figure (V.6) montrent clairement que les pertes actives dans la branche 7 (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.

### V.4.2. Régime normal (avec compensation de la ligne 7) :

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 7 (Jb2-4). La Figure (V.8) montre l'installation du compensateur série (TCSC) dans le réseau test IEEE 6Bus. Le tableau (V.6) montre la variation des pertes totales en fonction du degré de compensation, qui est considéré variable entre : 10% et 80%.

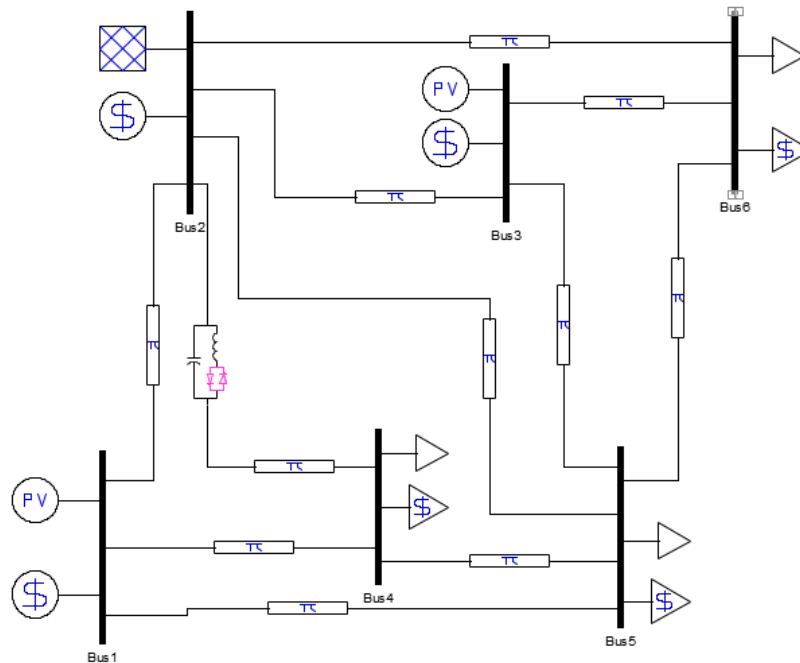
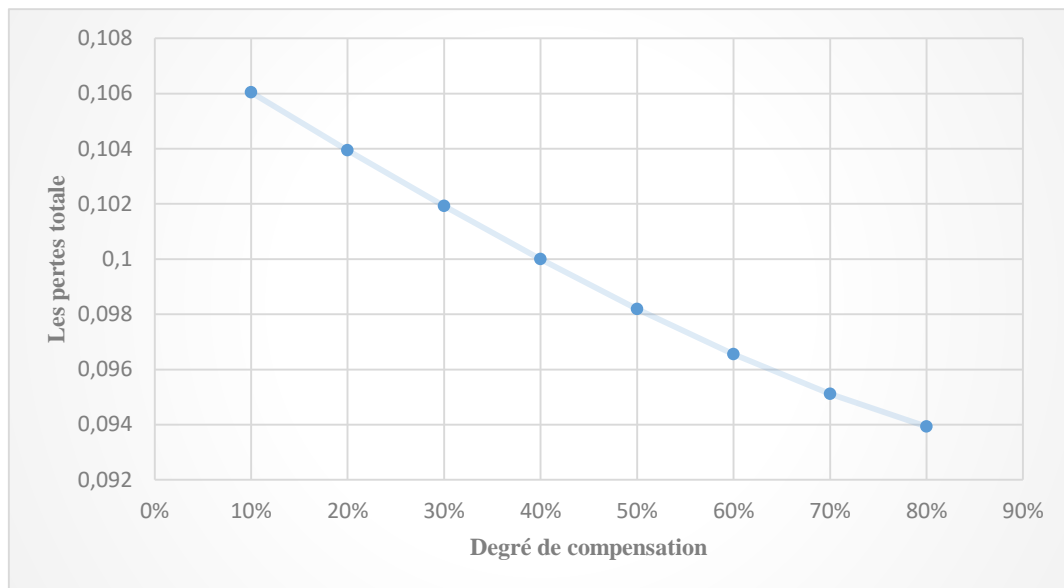


Figure (V.8) : Installation d'un TCSC au niveau de la branche 7 (Jb2-4)

Compensation (%)	P flow (pu)	Q flow (pu)	Pertes totales active (pu)
10%	1,28161862	1,12350662	0,10604082
20%	1,17497763	1,0237693	0,10394565
30%	1,06142296	0,91886711	0,10192236
40%	0,94026051	0,80839427	0,09999491
50%	0,82830629	0,70692977	0,09819248
60%	0,85803538	0,726570173	0,09655063
70%	0,88997625	0,74728816	0,09511291
80%	0,92438491	0,76916386	0,0939327

Tableau (V.6) : Variation des pertes en fonction du degré de compensation

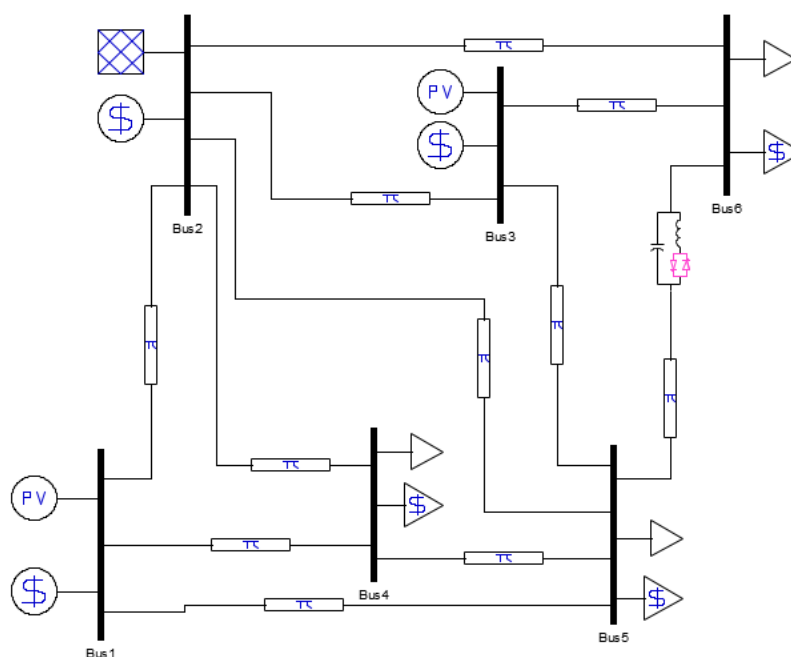


**Figure (V.9) :** Variation des pertes totales en fonction du degré de compensation

Après installation du compensateur série (TCSC), la perte totale est réduite par rapport à l'état normal sans compensation.

#### V.4.3. Cas normal (avec compensation de la ligne 9) :

Cette section est consacrée à la démonstration de l'importance du placement du compensateur en série. TCSC est installé sur la branche 9 (Jb6-5). Le tableau (V.7) résume les résultats du flux de puissance avec une compensation de 60 %.



**Figure (V.8) :** Installation d'un TCSC au niveau de la branche 9 (Jb6-5)

Compensation (%)	P flow (pu)	Q flow (pu)	Pertes totales active (pu)
60%	0,03072214	0,184641	0,14455615

**Tableau (V.7) :** Pertes totales : Emplacement du TCSC a la branche 9 (Jb6-5)

On remarque que la perte totale qui en résulte est supérieure à la position du compensateur TCSC en branche 7, et on peut conclure que la meilleure position pour le TCSC est en ligne 7.

#### V.4.4. Cas anormal (avec augmentation de la charge de +10% sans compensation) :

Pour ce cas, nous avons réalisé une augmentation uniforme de la charge

Bus	V [p.u.]	phase [rad]	P gen [p.u.]	Q gen [p.u.]	P load [p.u.]	Q load [p.u.]
Bus1	1,06	-0,00439415	0,8	0,61681381	0	0
Bus2	1,06	0	1,87549658	0,56048111	0	0
Bus3	1,06	-0,05753879	0,7	1,07197401	0	0
Bus4	0,97538482	-0,06161479	2,2204E-16	-8,8818E-16	1,1	0,77
Bus5	0,94227631	-0,1065286	7,7716E-16	-1,1102E-16	0,99	0,66
Bus6	0,97270854	-0,10018215	-1,1102E-15	5,5511E-16	1,11	0,88

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

From Bus	To Bus	Line	P Flow [p.u.]	Q Flow [p.u.]	P Loss [p.u.]	Q Loss [p.u.]
Bus2	Bus6	1	0,58240456	0,23468732	0,0265237	0,02455701
Bus3	Bus6	2	0,62163789	0,77483209	0,02074013	0,05912806
Bus2	Bus5	3	0,16584953	-0,08406634	0,02518302	-0,02982387
Bus4	Bus5	4	0,11341911	-0,02022002	0,00318681	-0,06802812
Bus1	Bus5	5	0,41781066	0,3077279	0,01790117	0,0264322
Bus1	Bus4	6	0,39699024	0,32097012	0,01451013	0,01724247
Bus2	Bus4	7	0,87241608	0,50709898	0,04147708	0,06104665

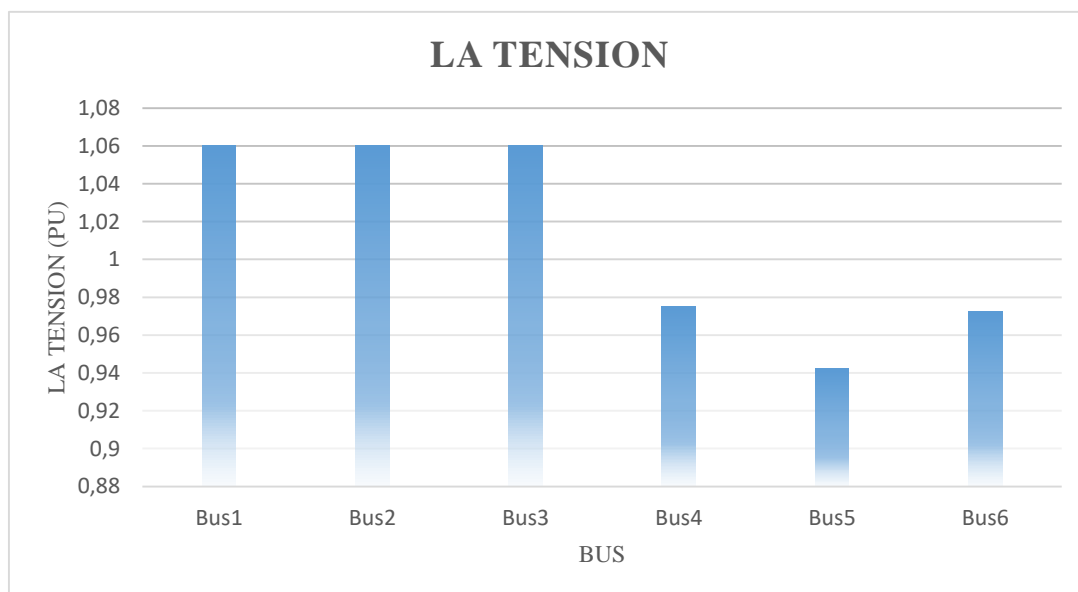
Bus2	Bus3	8	0,24000382	-0,07548014	0,00279937	-0,05368322
Bus6	Bus5	9	0,04677862	0,04583435	0,00097906	-0,06143246
Bus3	Bus5	10	0,31556656	0,27534499	0,0221744	-0,00252687
Bus2	Bus1	11	0,01482259	-0,02175871	2,1695E-05	-0,03364291

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

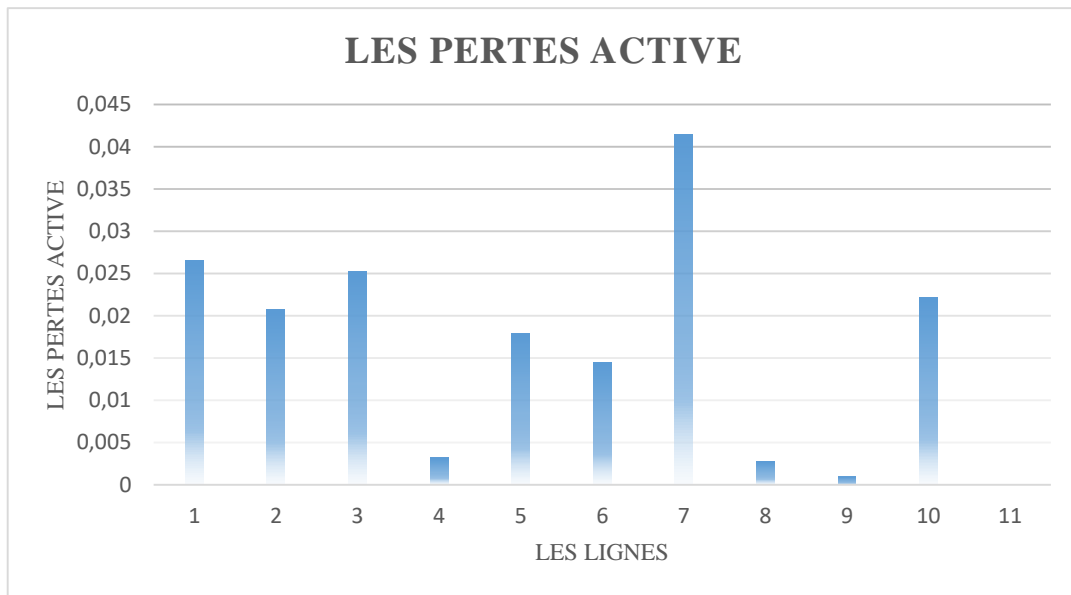
<b>Pertes totales active (pu)</b>	0,17549658
<b>Pertes totales réactive (pu)</b>	-0,060731071

**Tableau (V.10) :** Les pertes totales de cette augmentation

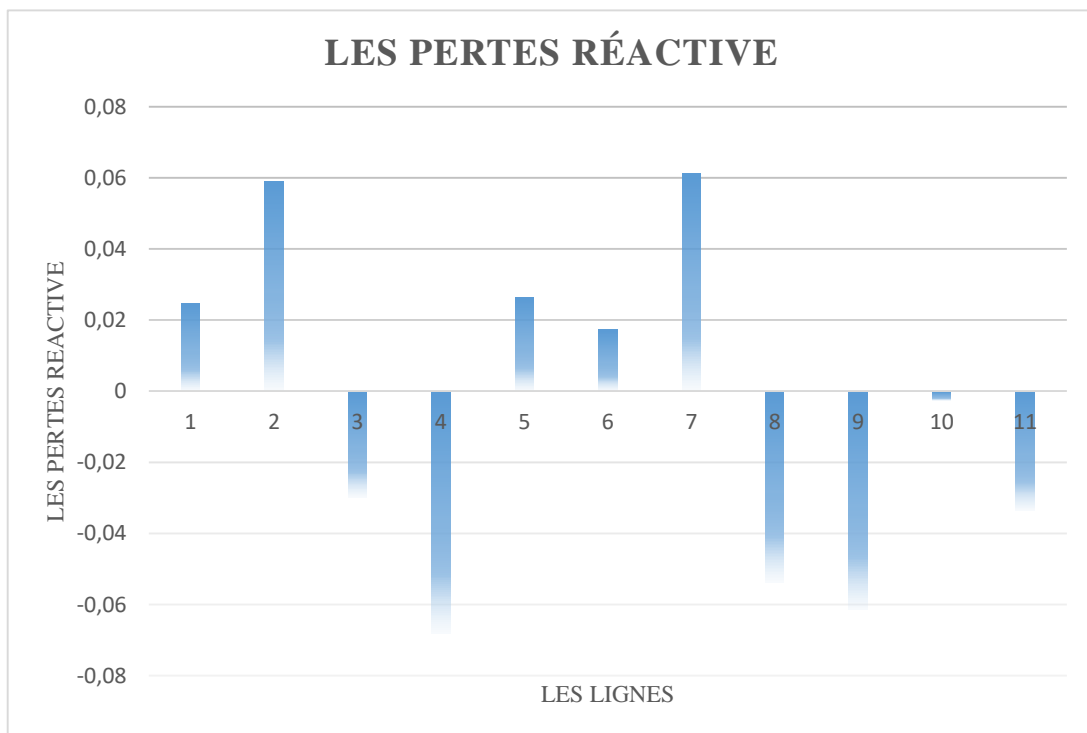
Les résultats pour le flux de puissance sont résumés dans le tableau (V.8 et V.9), notant que la perte totale a augmenté à 0,1754 (p.u), et l'augmentation de la charge a créé une déviation de tension sur certains bus.



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



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



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

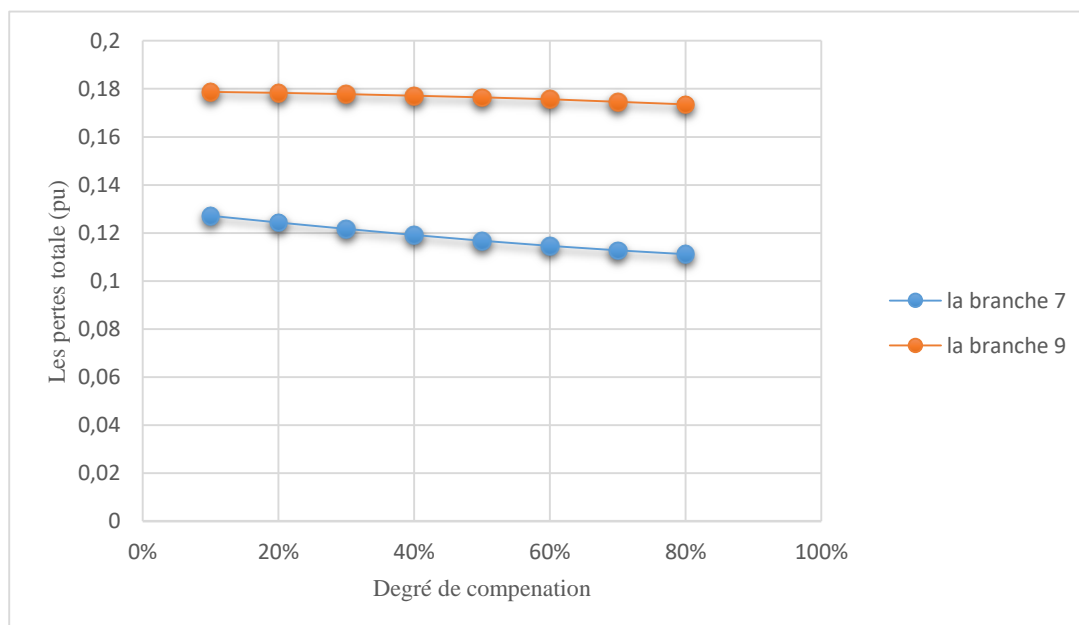


#### IV.4.2.4.Cas anormal (augmentation de la charge de 10% avec compensation) :

La section suivante est une comparaison de compensation entre les branches 7 et 9 avec une augmentation de charge de 10 %.

Compensation (%)	Pertes totales active (pu)	
	Branche 7	Branche 9
10%	0,12709154	0,17878992
20%	0,12433319	0,17831293
30%	0,12167071	0,17777151
40%	0,11913437	0,17715227
50%	0,11676078	0,17643818
60%	0,11459435	0,17560727
70%	0,11268902	0,17463106
80%	0,11111054	0,17347266

**Tableau (V.11) :** Les pertes totales à la branche 7 et 9 en augmentation de la charge en fonction degré de compensation de 10% à 70%



**Figure (V.15) :** Comparaison des pertes totales en fonction du degré de compensation : compensation des branches 7 et 9.

D'après cette figure (V.15), on remarque que la perte totale de la branche 9 est supérieure à celle de la branche 7.

On peut dire que la meilleure position du compensateur de la série TCSC est dans la branche 7.

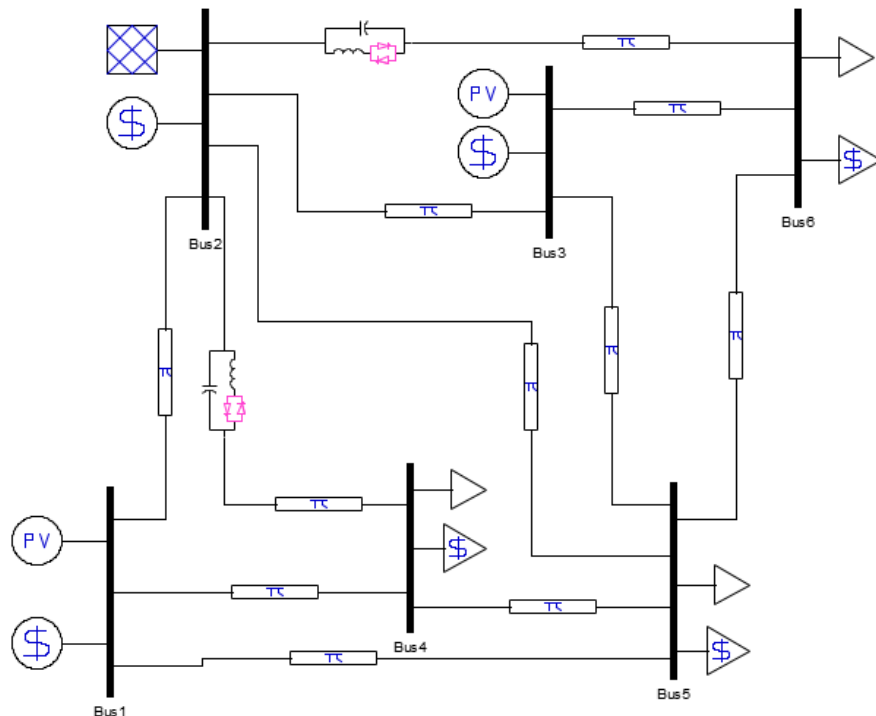
### V.5. Régime normal (avec deux compensations de la ligne 7 & 1) :

Dans la même option, nous avons introduit deux contrôleurs TCSC, on garde le premier TCSC<sub>1</sub> placé dans la branche 7 (Jb2-4) avec les mêmes caractéristiques et on insère un deuxième dans la branche 1 (Jb2-6). on effectue à nouveau un calcul de l'écoulement de puissance avec l'insertion d'un deuxième TCSC<sub>2</sub>

Le TCSC est installée dans deux branches 7 (Jb2-4) et 1 (Jb2-6). Le tableau (V.7) résume les résultats du flux de puissance avec compensation de 60 %.

S base = 100 MVA

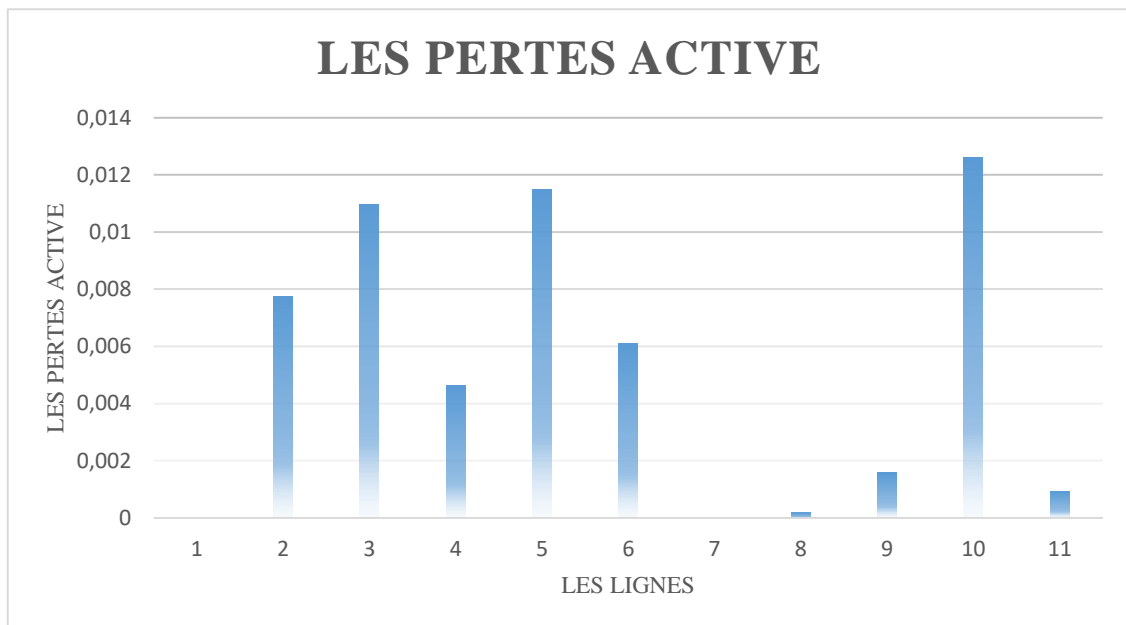
U base = 220 kV



**Figure (V.16) :** Installation d'un TCSC au niveau de deux branches 7 (Jb2-4) & 1 (Jb2-6)

Compensation (%)	Pertes totales active (pu)
60%	0,056234317

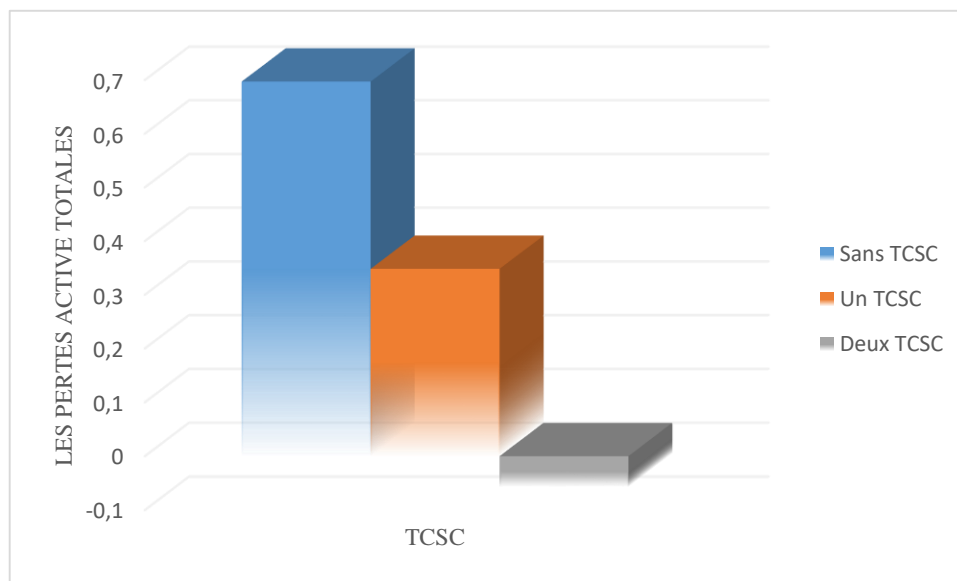
**Tableau (V.12) :** Les pertes totales actives avec deux TCSC



**Figure (V.17) :** Les pertes actives avec deux TCSC

On remarque que les pertes ont chuté pratiquement dans la majorité des lignes par rapport à l'état initial, par conséquent, une diminution des pertes active totales qui sont équivalent dans ce cas à 0,056 (pu).

Le histogramme représenté dans la figure (III.13) donnent respectivement l'évaluation des pertes actives totales dans un réseau électrique et l'évolution du coût incrémental sans et avec la présence du contrôleur TCSC



**Figure (V.18) :** Les pertes actives totales en (p.u) sans et avec TCSC

## V.6. Conclusion :

En introduisant des compensateurs de la série TCSC dans les réseaux électriques pour montrer les améliorations de l'état du réseau, en termes de réduction des pertes actives, pour les réseaux de test IEEE 6-Bus, les résultats partiels montrent que la branche 6 est considérée comme un emplacement valide.

Dans ce cas, le but de l'optimisation est d'utiliser au mieux la capacité du réseau. Les appareils TCSC sont placés dans le système pour maximiser la puissance Servir les consommateurs tout en respectant les contraintes de sécurité.

Dans notre étude, le contrôleur TCSC a été réglé à un niveau Compensation optimale sous contraintes de puissance. Le compensateur conduit à Solution plus économique que si la puissance est fixée à une certaine valeur Spécifié. La procédure que nous avons utilisée nous a donné des résultats satisfaisants.

## Conclusion générale :

Le développement rapide de la technologie de l'électronique de puissance a permis d'améliorer la gestion, les conditions de fonctionnement et le contrôle du réseau, en introduisant le système de transmission de puissance AC flexible FACTS qui utilise des commutateurs statiques modernes pour contrôler l'activation et la désactivation, tels que (GTO, IGBT, .. ), Grâce à ce système FACTS, le contrôle du flux de puissance active et réactive et la compensation de tension peuvent être réalisés et exécutés.

La recherche présentée dans ce mémoire montre l'impact du TCSC sur le contrôle du trafic dans le réseau.

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

Dans la première étape nous avons présenté en bref un rappel sur le réseau électrique et l'importance de la puissance réactive, ainsi que le principe générale de la compensation et ces moyens classique de compensation.

La deuxième phase de notre travail est consacrée à la description de différents systèmes permettant d'assurer la transmission de l'énergie électrique dans des conditions optimales, qui sont classés comme "systèmes FACTS". Les dispositifs FACTS peuvent être classés en trois catégories : les compensateurs shunts, les compensateurs sériels et les compensateurs hybrides (parallèle-série) Nous détaillons la structure de base et le principe de fonctionnement des dispositifs FACTS étudiés, ainsi que leurs caractéristiques. Excellentes explications et illustrations.

Dans la troisième étape, nous présentons une modélisation générale des dispositifs FACTS, tels que le condensateur série commandé par thyristor (TCSC) utilisé dans les simulations du chapitre suivant, pour étudier le comportement du réseau, avec et sans intégration de ce dernier.

Dans la dernière étape, nous montrons le schéma électrique équivalent du réseau de test de taille réduite. Afin de comprendre le comportement des appareils connectés au réseau pour optimiser la puissance réactive et le contrôle des transitions, nous avons effectué des simulations avec le logiciel PSAT dans l'environnement MATLAB. Les résultats obtenus à travers diverses simulations de TCSC valident généralement le modèle de dispositif utilisé et montrent bien que le compensateur démontre la haute efficacité du contrôle de transmission que nous visons dans le réseau de test étudié.

## Références bibliographique :

- [1] Support de Cours « Réseaux Electriques » Département de Technologie-Institut des Sciences-Centre Universitaire Nour El Bachir El Bayadh-2017/2018.
- [2] Pr. Ahmed GHERBI «Architectures des Réseaux Electriques » Département d'Electrotechnique- Faculté de Technologie - U.F.A - Sétif-1 – 2019/2020.
- [3] Boudjella Houari « Contrôle des puissances réactives et des tensions dans un réseau de transport au moyen de dispositif FACTS (SVC) », mémoire de magistère, option : conversion d'énergie et commande, université de Sidi Belabbas, soutenu le 23/01/2008.
- [4] MAMMERI Oussama, « Différentes méthodes de calcul de la puissance réactive dans une noeud a charge non linéaire en présence d'un système de compensation de l'énergie», Mémoire de magister, Option : Réseaux électriques, Université de Batna, 2011/2012.
- [5] Haimour Rachida, « contrôle des puissances réactives et des tensions par les dispositifs FACTS dans un réseau électrique », mémoire de magister en électrotechnique, option identification modélisation et commande numérique des processus, école normale supérieure de l'enseignement technologique d'Oran, année universitaire 2008/2009.
- [6] Kerbaa Amel « Etude de l'influence des systèmes FACTS sur la qualité de l'énergie électrique », mémoire master, Université Mohamed kheidher, Biskra.
- [7] HADDAD Salim, « Compensation d'énergie réactive par convertisseur statique», Mémoire de magister département d'électromécanique, Université Badji Mokhtar- Annaba, 2006.
- [8] Abdelaziz Chaghi « Documents pédagogiques et didactiques », Université Lhadj Lakhdar, Batna 2000/2001.
- [9] Georges Thomasset, "la conception des réseaux industriels en haute tension".
- [10] Noui Issam «Réduction des pertes dans les réseaux électriques par la compensation série TCSC» mémoire master, Université Mohamed Khider Biskra 2012.
- [11] Christophe Gombert « Simulation temps-réel des dispositifs d'Electronique de Puissance dédiés aux Réseaux d'Energie Electrique » thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2005.
- [12] Rabah Benabid «Optimisation Multi objectif de la Synthèse des FACTS par les Particules en Essaim pour le Contrôle de la Stabilité de Tension des Réseaux Electriques» mémoire de magister, l'Université de Jijel 2007.
- [13] K. R. Padiyar . 'FACTS controllers in power transmission and distribution ', New age international publishers, 2007.
- [14] Abdelaàli ALIBI, 'Contrôle des Réseaux Electriques par les Systèmes FACTS: (Flexible AC Transmission Systems)' Magister de l'Université de Batna 2009.

- [15] Tarik ZABAIYOU « Coordination Des Régulateurs Conventionnels Des Machines Synchrones Et Des Compensateurs Statiques (SVCS) », Thèse de Doctorat, UNIVERSITÉ DU QUÉBEC, Canada, 2010.
- [16] Madi H, Teghidet C « Etude de l'influence des systèmes FACTS-séries sur les réglages du transit de puissance et des dispositifs de protection » université de Bejaïa 2006.
- [17] Eskandar Cholipour Shakraki " Apport de l'UPFC à l'amélioration de stabilité transitoire des réseaux électriques" Thèse doctorat, université Henri Poincaré, Nancy-I.
- [18] Benmaachou Hayet "Apport des FACTS dans les réseaux électriques" Mémoire d'ingénieur, université de sidi bel abbés Septembre 2007.
- [19] Gabriela Glanzmann "FACTS flexible alternating current transmission systems" EEH, power systems laboratory 14/01/2005.
- [20] BIKASH PAL, BALARKO CHAUDHURI. Robust control in Power Systems. Ed. Springer Science and Business Media. 2005.
- [21] S. DAIBOUN, ''Renforcement de la stabilité transitoire par l'utilisation des FACTS, '' Mémoire de Magistère, Département d'électrotechnique Université de Skikda 2005.
- [22] Geidl, M., « Implementation of FACTS and Economic Generation Dispatch in an Interactive Power Flow Simulation Platform », ETH Zürich.
- [23] H. Ambriz-Pérez, E. Acha, C. R. Fuerte-Esquivel, « Advanced SVC Models for Newton-Raphson Load Flow and Newton Optimal Power Flow Studies », IEEE Transactions on Power Systems, 2000.
- [24] N. G. Hingorani, L. Gyugyi, « Understanding FACTS: Concepts and Technology of AC Transmission Systems », IEEE Press, N.Y., 2000, ISBN 0-7803-3455-8.
- [25] C. A. Canizares and Z. T. Faur, « Analysis of SVC and TCSC Controllers in voltage Collapse », IEEE, July 1999.
- [26] Enrique Acha « Facts: Modelling and simulation in power networks » John Wiley and Sons. 2007.
- [27] Stéphan Gerbex « Méta heuristiques Appliquées au placement optimal de dispositifs FACTS dans un réseau électrique» mémoire d'ingénieur, Ecole Polytechnique fédérale-Lausanne 2003.