

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BEN YAHIA - JIJEL



FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes Pour l'obtention du diplôme de :

**MASTER ACADEMIQUE**

---

Option : Réseaux électriques

---

**THEME**

**Compensation de l'énergie réactive d'un  
réseau de transport par un système FACTS**

Présenté par : Abdelkrim SAIM

Encadré par : Pr. Mohamed MELIT

Année Universitaire : 2017/2018

# REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je remercie dieu tout puissant qui m'a donné la force et le courage pour réaliser et de terminer ce travail.

Mes remerciements vont en premier lieu à mon encadreur, Mr : Mohamed MELIT pour sa disponibilité, son soutien, et ses précieux conseils durant toute la période de travail.

Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ma recherche en acceptant d'examiner ce modeste travail, et de l'enrichir par leurs propositions.

Mes remerciements s'étendent également aux enseignants du département d'électrotechnique, et plus particulièrement les enseignants de l'option réseaux électriques.

Et je remercie toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réussite et finalisation de ce travail.

## Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à toute personne chère ayant contribué de près ou de loin à ma réussite tout au long de mes années d'étude.

En premier lieu, à mes chers parents et mes sœurs qui ont été derrière moi tout au long de mon parcours universitaire, et qui m'ont soutenu dans mes moments les plus difficiles.

A ma chère Ghozlane qui m'a toujours poussé à donner du mieux que je peux, et qui m'a tant prêté main forte pendant la finition de ce mémoire.

A mes camarades de classe à qui j'avais la chance et l'honneur de connaître et de rencontrer dans ma vie.

A tous les membres et adhérents de notre association culturelle THILLELI n'Saadane et l'ensemble de mes amis, particulièrement : Fateh, Omar, Zazi, Badi, Sofiane, Nadjib, Lamine et Oualid.

---

# **TABLE DES MATIERES**

---

# Table des matières

---

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

## Chapitre I : Généralités

I.1. Le réseau d'énergie électrique .....	3
I.2. Structure du réseau électrique .....	3
I.2.1. Le réseau de transport.....	4
I.2.2. Le réseau de répartition .....	4
I.2.3. Le réseau de distribution .....	5
I.3. Réglage du réseau .....	5
I.3.1. Contraintes sur les réseaux de transport .....	6
I.3.1.1. Limite de tension haute.....	7
I.3.1.2. Limite de tension basse.....	7
I.3.2. Réglage de la tension dans les réseaux de transports .....	7
I.3.2.1. Réglage primaire de la tension.....	8
I.3.2.2. Réglage secondaire de la tension .....	8
I.3.2.3. Réglage tertiaire de la tension.....	9
I.4. Régulation de la tension dans les réseaux de distribution.....	9
I.4.1. Le régleur en charge au transformateur HTB/HTA.....	10
I.4.2. Les bancs de condensateurs .....	10
I.5. L'énergie réactive au sein du réseau .....	11
I.5.1. La puissance réactive.....	11
I.5.2. Effets de la puissance réactive.....	12
I.5.3. Couple tension réactif .....	12

## Chapitre II : Modélisation des éléments du réseau

II.1. Introduction.....	14
II.2. Modélisation des éléments du réseau.....	14
II.2.1. Modèle du générateur.....	14
II.2.2. Modèle d'une ligne de transport d'énergie .....	15
II.2.3. Modèles des nœuds du réseau .....	16
II.2.4. Modèle d'une charge.....	17
II.2.5. Modèle d'un transformateur.....	17
II.2.6. Modèle de l'élément shunt .....	18
II.3. Les systèmes FACTS.....	19
II.3.1. Introduction .....	19
II.3.2. Définition et généralités .....	19
II.3.3. Différentes catégories des FACTS .....	20
II.3.4. Rôle des dispositifs FACTS .....	22
II.3.5. Applications pratiques des dispositifs FACTS .....	23
II.3.6. Exemples de dispositifs FACTS .....	24
II.3.6.1. SVC (Static Var Compensator) .....	24
II.3.6.2. STATCOM (Static Synchronous Compensator) .....	25
II.3.6.3. TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) .....	25
II.3.6.4. UPFC (Unified Power Flow Controller) .....	27
II.3.7. Modélisation des dispositifs FACTS .....	28
II.3.7.1. Injection de puissance aux extrémités de la ligne.....	28
II.3.7.2. Modification de la matrice d'admittance nodale .....	30
II.3.7.3. Création d'un nœud fictif .....	30

### **Chapitre III : Ecoulement de puissance et compensation de l'énergie réactive**

III.1. Introduction .....	32
III.2. Puissance transmise par une ligne électrique .....	32
III.3. Chute de tension et compensation réactive .....	34
III.4. Problème de l'écoulement de puissance .....	36
III.5. Résolution numériques de problème d'écoulement de puissance .....	37
III.5.1. Méthode de Gauss-Seidel .....	37
III.5.2. Méthode de Gauss Seidel avec accélération .....	38
III.5.3. Méthode de Newton-Raphson .....	39

### **Chapitre IV : Validation et quelques applications**

IV.1. Introduction .....	44
IV.2. Validation .....	44
IV.2.1. Réseau test IEEE à 05 nœuds .....	44
IV.2.1.1. Résultats du calcul de l'écoulement de puissance .....	46
IV.2.1.2. Résultats du transit de puissance dans les lignes .....	47
IV.2.2. Réseau test IEEE à 09 nœuds .....	48
IV.2.2.1. Description du réseau à étudier .....	48
IV.2.2.2. Résultats du calcul de l'écoulement de puissance .....	50
IV.2.2.3. Résultats du transit de puissance dans les lignes .....	52
IV.3. Applications .....	54
IV.3.1. Application sur le réseau IEEE standard à 14 nœuds .....	54
IV.3.1.1. Description du réseau à étudier .....	54
IV.3.1.2. Cas normal sans compensation et sans surcharge .....	56
IV.3.1.3. Réseau avec surcharge sans compensation .....	59
IV.3.2. Apport du FACTS shunt (STATCOM) .....	60
IV.3.2.1. Utilisation d'un seul STATCOM .....	60

IV.3.2.1.1. Effet du STATCOM sur le profil de la tension .....	61
IV.3.2.1.2. Effet du STATCOM sur le transit de puissance.....	62
IV.3.2.2. Utilisation de deux STATCOM .....	64
IV.3.3. Application sur le réseau IEEE standard à 30 nœuds .....	65
IV.3.3.1. Description du réseau à étudier .....	65
IV.3.3.2. Cas normal sans compensation et sans surcharge.....	66
IV.3.3.3. Réseau avec surcharge et sans compensation .....	68
IV.3.3.4. Apport de deux FACTS de type STATCOM .....	69
IV.4. Conclusion.....	70
Conclusion générale.....	72
Références bibliographiques .....	73
Annexes .....	76



---

# **LISTE DES TABLEAUX ET DES FIGURES**

---

## Liste des tableaux

Tableau II.1 : Classification des nœuds d'un réseau électrique.....	16
Tableau II.2 : Les chiffres approximatifs des dispositifs FACTS installés dans le monde et leurs puissances totales.....	23
Tableau IV.1 : Données de production et de consommation.....	45
du réseau IEEE standard à 05 nœuds. ....	45
Tableau IV.2 : Données des lignes de transport du réseau IEEE 05 nœuds.....	45
Tableau IV.3.a : Résultats de l'écoulement de puissance dans un réseau .....	46
IEEE standard à 05 nœuds : Résultats de nos calculs. ....	46
Tableau IV.3.b : Résultats de l'écoulement de puissance dans un réseau IEEE standard à 05 nœuds : Résultats publiés. ....	47
Tableau IV.4 : Résultats du transit de puissance dans les lignes.....	48
Tableau IV.5 : Données de production et de consommation du réseau .....	48
IEEE standard à 09 nœuds.....	48
Tableau IV.6 : Données des lignes de transport du réseau IEEE standard à 09 nœuds. ....	49
Tableau IV.7.a : Résultats de l'écoulement de puissance dans un réseau .....	51
IEEE à 09 nœuds : Résultats de nos calculs. ....	51
Tableau IV.7.b : Résultats de l'écoulement de puissance dans le réseau .....	51
IEEE standard à 09 nœuds : Résultats publié.....	51
Tableau IV.8.a : Résultats du transit de puissance dans les lignes : Résultat de nos calculs. ..	52
Tableau IV.8.b : Résultats du transit de puissance dans les lignes : Résultats publiés. ....	53
Tableau IV.9 : Données de production et de consommation du réseau .....	55
IEEE standard à 14 nœuds.....	55
Tableau IV.10 : Données des lignes de transport du réseau IEEE standard à 14 nœuds. ....	55
Tableau IV.11.a : Résultats de l'écoulement de puissance dans le réseau .....	56
IEEE à 14 nœuds : Résultats de nos calculs. ....	56
Tableau IV.11.b : Résultats de l'écoulement de puissance dans le réseau .....	57
IEEE à 14 nœuds : Résultats publiés.....	57
Tableau IV.12 : Résultats du transit de puissance dans les lignes.....	58
Tableau IV.13 : Amplitudes du nœud 14 pour différentes surcharges.....	61
Tableau IV.14 : Variation de $V_{sh}$ et de $Q_{sh}$ en fonction de la charge. ....	61
Tableau IV.15 : Résultats du transit de puissance dans les lignes pour une augmentation de charge de 80% avec STATCOM au nœud 14. ....	63

Tableau IV.16 : Résultats de l'écoulement de puissance dans le réseau IEEE à 30 nœuds. .... 66

### Liste des figures

Figure I.1 : Organisation du réseau électrique.....	3
Figure I.2 : Schéma d'une structure maillée.....	4
Figure I.3 : Schéma d'une structure radiale ou bouclée. ....	5
Figure I.4 : Schéma d'une structure arborescente. ....	6
Figure I.5 : Réglage hiérarchisé de la tension. ....	7
Figure I.6 : La dynamique du régulateur en charge.....	10
Figure II.1 : Modèle du générateur de puissance.....	15
Figure II.2 : Schéma en $\pi$ d'une ligne de transport d'énergie.....	15
Figure II.3 : Modèle d'une charge. ....	17
Figure II.4 : Modèle du transformateur. ....	17
Figure II.5 : Modèle de l'élément shunt : .....	18
(a) symbole, (b) élément inductif, (c) élément capacitif.....	18
Figure II.6 : Principaux dispositifs FACTS.....	21
Figure II.7 : Schéma de principe d'un SVC. ....	24
Figure II.8 : Caractéristique d'un SVC.....	24
Figure II.9 : Schéma électrique d'un STATCOM. ....	25
Figure II.10 : Diagramme fonctionnel du STATCOM : .....	26
(a) Courant inductif, (b) Courant capacitif. ....	26
Figure II.11 : (a) Structure d'un TCSC, (b) Représentation par réactance variable.....	27
Figure II.12 : Schéma de base de l'UPFC. ....	27
Figure II.13 : Modélisation par injection de puissance : .....	29
(a) ligne avec FACTS, (b) ligne équivalente avec injection.....	29
Figure II.14 : Intégration d'un dispositif FACTS dans une ligne.....	30
Figure II.15 : Connexion de FACTS avec l'injection de puissance aux deux extrémités. ....	30
Figure III.1 : Ligne électrique alimentant une charge : .....	32
(a) Schéma monophasé d'une ligne de transport, (b) Diagramme des tensions.....	32
Figure III.2 : Ligne de charge du système. ....	33
Figure III.3 : Ligne électrique avec compensateur shunt. ....	34
Figure III.4 : Diagramme des tensions pour une ligne compensée (Tension constante).....	35

Figure IV.1 : Topologie du réseau IEEE standard à 05 nœuds. ....	44
Figure IV.2 : Vue du réseau IEEE à 05 nœuds sous le logiciel PSAT. ....	46
Figure IV.3 : Amplitude des tensions dans chaque nœud du réseau. ....	47
Figure IV.4 : Topologie du réseau IEEE standard à 09 nœuds. ....	50
Figure IV.5 : Vue du réseau IEEE 09 nœuds sur le logiciel PSAT. ....	50
Figure IV.6 : Amplitude des tensions dans chaque nœud du réseau. ....	52
Figure IV.7 : Schéma unifilaire du réseau IEEE standard à 14 nœuds. ....	54
Figure IV.8 : Amplitude des tensions dans chaque nœud du réseau. ....	58
Figure IV.9 : Amplitudes des tensions des nœuds de chargés en fonction du degré de surcharge. ....	60
Figure IV.10 : Amplitudes des nœuds de charge du réseau pour une surcharge de 80%. ....	62
Figure IV.11 : Amplitude des tensions aux nœuds de charge sans et avec STATCOM. ....	64
Figure IV.12 : Amplitude des tensions aux nœuds de charge sans et avec STATCOM pour deux placements différents. ....	65
Figure IV.13 : Schéma unifilaire du réseau IEEE standard à 30 nœuds. ....	66
Figure IV.14 : Amplitude des tensions dans chaque nœud du réseau. ....	68
Figure IV.15 : Effets de la surcharge sur le plan des tensions. ....	69
Figure IV.16 : Influence de deux STATCOM sur les tensions des nœuds du réseau. ....	70

---

# Introduction générale

---

## **Introduction générale**

De nos jours, les problèmes liés au fonctionnement des réseaux de transport et de production d'énergie électrique ont pris une importance considérable. Face à une consommation d'électricité qui ne cesse d'augmenter et à des conditions d'environnement très contraignantes, les réseaux d'énergie électrique ont tendance à s'accroître et deviennent de plus en plus maillés et interconnectés. Le transport se fait, en outre, sur de longues distances en utilisant des lignes de grande capacité de transport. Cette complexité de structure a de très nombreuses conséquences. La difficulté de maintenir un profil de tension acceptable a substantiellement augmenté [1].

Les réseaux de transport et de distribution de l'énergie électrique comportent jusqu'à maintenant des appareillages passifs. Par ailleurs, le maillage des réseaux exige de plus en plus le contrôle des puissances transitées. La complexité des réseaux exige aussi des marges de sécurité accrues afin que les perturbations locales ne provoquent aucune instabilité qui pourrait s'étendre sur tout le réseau de transport [2].

Habituellement, l'énergie réactive circule constamment dans tout réseau électrique, cette dernière est appelée par les consommateurs via des demandes fluctuantes au cours de la journée. Une demande brusque de cette énergie fait alourdir le réseau et peut affecter son fonctionnement et sa stabilité en déstabilisant son plan de tensions. Le plan de tensions est intimement lié aux transits de l'énergie réactive; une altération de cette dernière aura certainement des conséquences sur la qualité de la fourniture en énergie électrique ainsi que les équipements du réseau tel que les protections et les ouvrages du réseau électrique. Le contrôle et la maîtrise du transit de puissance réactive est alors indispensable et nécessite des moyens financiers non négligeables, nous avons alors un problème technico-économique.

Les systèmes de Transmission Flexible en Courant Alternatif, terme traduit de l'anglais Flexible Alternating current transmission systems (FACTS), peuvent contribuer pour remédier les différents problèmes rencontrés dans l'exploitation des réseaux électriques. Plusieurs types de FACTS avec des architectures et des technologies différentes ont été développés. Parmi eux les plus connus sont le SVC (static var compensator), le STATCOM (Synchronous Compensator), TCSC (thyristor controlled series capacitor), l'UPFC (unified power flow controller). Chacun d'eux possède ses propres caractéristiques et peut être utilisé pour des besoins bien précis. De manière générale les dispositifs FACTS agissent en

fournissant ou en absorbant de la puissance réactive, en augmentant ou en réduisant la tension aux nœuds [3].

Le travail effectué dans ce mémoire concerne, en particulier, la compensation de l'énergie réactive d'un réseau de transport d'énergie électrique par un système FACTS. Notre travail se répartit comme suit :

Dans le premier chapitre, nous avons exposé les généralités concernant les réseaux d'énergies électriques en général à savoir leurs structures et leurs réglages, et nous avons aussi parlé sur l'énergie réactive au sein du réseau.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté la modélisation des différents éléments du réseau tel que les générateurs, les lignes de transport d'énergie, les charges et les transformateurs de puissance. Nous avons aussi présenté des exemples les systèmes FACTS par l'exposition de leurs types selon leurs modes de compensation ainsi que leur modélisation.

Dans le troisième chapitre, nous avons étalé le problème de l'écoulement de puissance dans un réseau électrique et nous avons exposé les méthodes numériques de calcul de l'écoulement de puissance les plus utilisées.

Dans le quatrième chapitre, nous avons réalisé la validation des résultats de l'écoulement de puissance de quatre réseaux test, à savoir le réseau IEEE standard à 05 nœuds et le réseau IEEE standard à 09 nœuds et le réseau IEEE standard à 14 et 30 nœuds en utilisant nos développements sous MATLAB. Comme première application, nous avons choisi le réseau IEEE standard à 14 nœuds et on s'est intéressé à l'observation du comportement du réseau dans le cas normal et dans le cas perturbé pour constater l'effet de la surcharge sur les tensions et l'écoulement de puissance dans le réseau. Par la suite, nous avons procédé à l'insertion d'un dispositif de compensation FACTS shunt de type STATCOM et on s'est focalisé sur l'emplacement optimal et le nombre requis pour le faire, et cela dans la mesure d'atteindre une meilleure compensation de l'énergie réactive du réseau. Afin de compléter notre travail, nous avons traité le réseau standard IEEE à 30 bus et cela sans et avec compensation.

Le mémoire se termine par une conclusion générale et des perspectives envisagées pour les futurs travaux.

# Chapitre I

---

## Généralités

---



## I.1. Le réseau d'énergie électrique

Les sources de production d'énergie électrique, particulièrement les grandes centrales, sont généralement éloignées des centres de consommation, c'est-à-dire des centres industriels et des villes. L'énergie est donc acheminée à distance par des liaisons électriques à grand flux qui remplissent une fonction du transport d'énergie.

Le réseau électrique peut se définir comme l'infrastructure permettant la mise en relation entre la production d'électricité et les usages finaux. En réalisant cette interface, le réseau assure non seulement un lien physique permettant la circulation des flux d'énergie mais aussi une mise à disposition de services pour la collectivité qu'il irrigue [4].

Mettant en regard l'offre et la demande, il joue nécessairement un rôle majeur dans la réalisation et le suivi de l'équilibre, en étant la structure clé des « systèmes électriques », c'est-à-dire des ensembles interconnectés production – transport/distribution – consommation. Ceux-ci sont d'immenses machines distribuées, couvrant parfois des zones à l'échelle de continents. Ils sont régis par des lois physiques qui rendent leur gestion complexe et délicate, car leur bon fonctionnement repose sur des équilibres de chaque instant qui ne sont jamais acquis et sur le respect d'innombrables contraintes techniques évoluant au cours du temps [4].

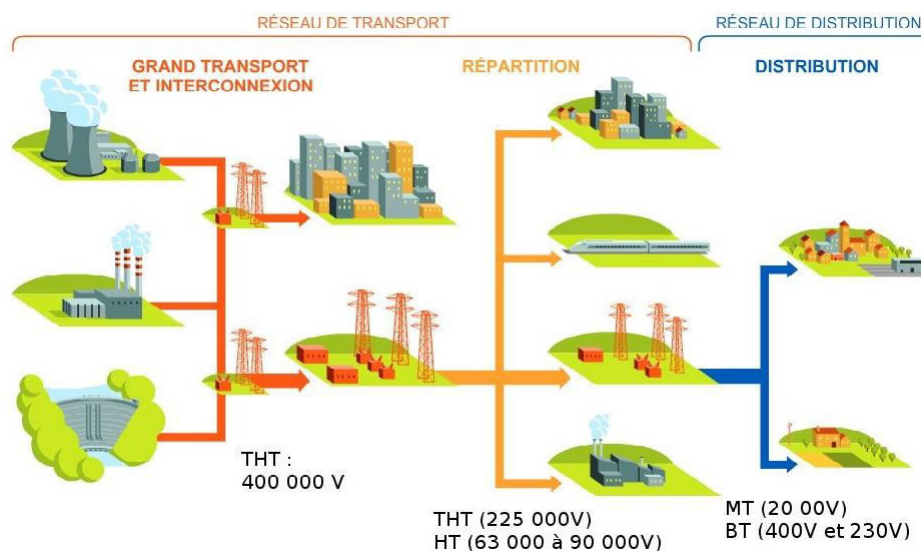


Figure I.1 : Organisation du réseau électrique.

## I.2. Structure du réseau électrique

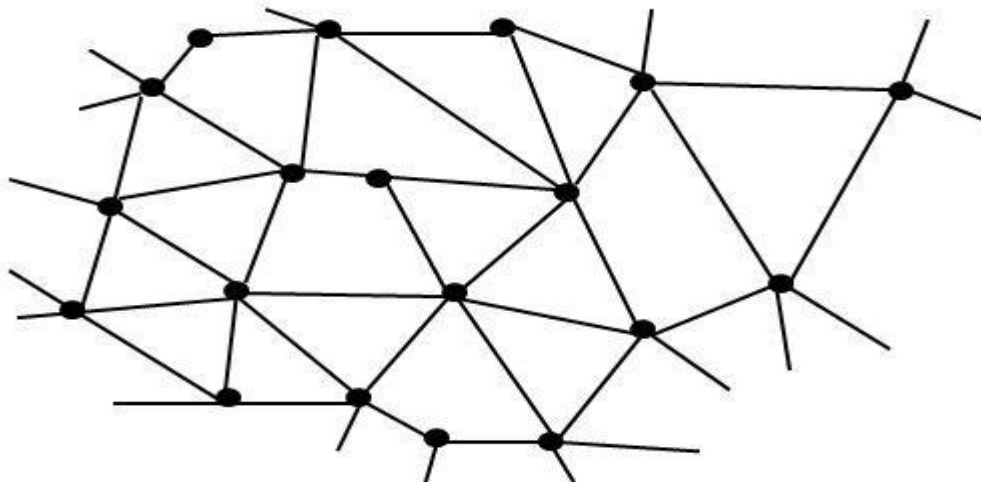
Le souci de réduire le nombre et le volume des infrastructures d'équipements à construire et la volonté de limiter les pertes d'énergie, imposent de transporter l'énergie électrique sur de grandes distances à des tensions très élevées dites à très hautes tensions

(THT). Il est donc nécessaire d'élever la tension à la sortie des groupes de production puis, après son transport, de l'abaisser par plusieurs transformations successives pour alimenter les réseaux de répartition puis les réseaux de distribution.

Les réseaux électriques peuvent être organisés selon plusieurs types de structures en suivant différents paliers de tension comme suite :

### I.2.1. Le réseau de transport

Les réseaux de transport sont à très haute tension (de 150 kV à 800 kV) et ont pour but de transporter l'énergie des grands centres de production vers les régions consommatrices d'électricité. Les grandes puissances transitées imposent des lignes électriques de forte capacité de transit, ainsi qu'une structure maillée (ou interconnectée). Les réseaux maillés garantissent une très bonne sécurité d'alimentation, car la perte de n'importe quel élément (ligne électrique, transformateur ou groupe de production) n'entraîne aucune coupure d'électricité si l'exploitant du réseau de transport respecte la règle dite du "N-1" ; possibilité de perdre n'importe quel élément du réseau sans conséquences inacceptables pour les consommateurs [5].



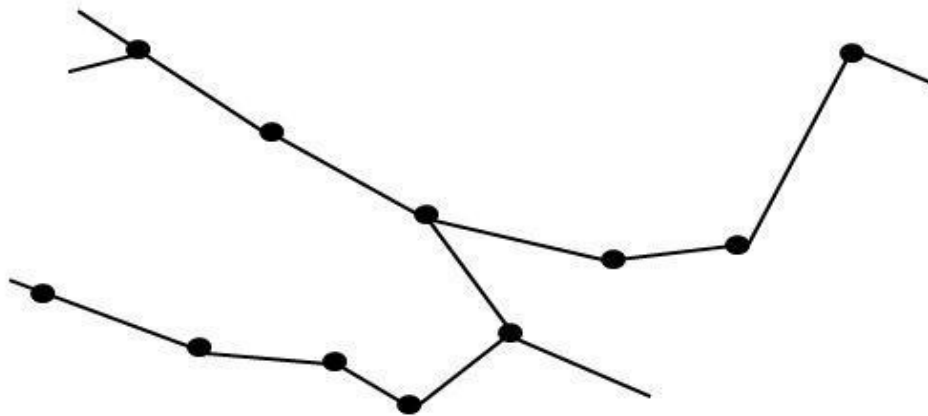
**Figure I.2 :** Schéma d'une structure maillée.

### I.2.2. Le réseau de répartition

Les réseaux de répartition sont à haute tension (de l'ordre de 30 à 150 kV) et ont pour but d'assurer à l'échelle régionale la fourniture d'électricité. L'énergie y est injectée essentiellement par le réseau de transport via des transformateurs, mais également par des

centrales électriques de moyennes puissances (inférieures à environ 100 MW). Les réseaux de répartition sont distribués de manière assez homogène sur le territoire d'une région.

Ils ont une structure à la fois maillée et bouclée suivant les régions considérées. Contrairement aux réseaux de transport qui sont toujours bouclés (afin de pouvoir assurer un secours immédiat en N-1), les réseaux de répartition peuvent être exploités bouclés ou débouclés selon les transits sur le réseau (débouclé signifie qu'un disjoncteur est ouvert sur l'artère, limitant ainsi les capacités de secours en N-1). Les problèmes de report de charge se posent également pour le réseau de répartition, sa conduite est donc assurée en coordination avec celle du réseau de transport et nécessite également des moyens de simulation en temps réel [5].



**Figure I.3 :** Schéma d'une structure radiale ou bouclée.

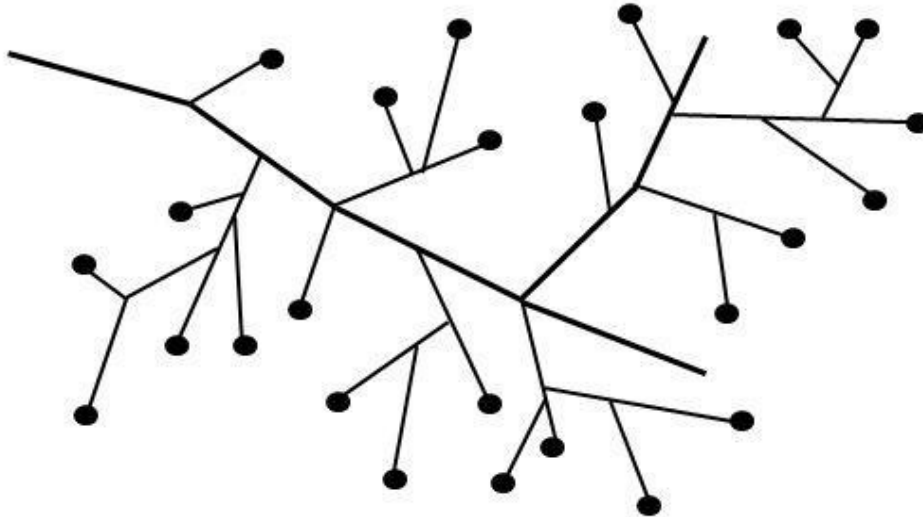
### I.2.3. Le réseau de distribution

Les réseaux de distribution ont pour but d'alimenter l'ensemble des consommateurs. Il existe deux sous niveaux de tension :

- les réseaux à moyenne tension (de 3 à 33 kV) ;
- les réseaux à basse tension (de 110 à 600 V), sur lesquels sont raccordés les utilisateurs domestiques.

Les réseaux à moyenne tension (MT) ont de façon très majoritaire une structure arborescente, qui autorise des protections simples et peu coûteuses : à partir d'un poste source (lui-même alimenté par le réseau de répartition), l'électricité parcourt une artère (ou ossature) sur laquelle sont reliées directement des branches de dérivation au bout desquelles se trouvent les postes MT/BT de distribution publique, qui alimentent les réseaux basse tension (BT) sur lesquels sont raccordés les plus petits consommateurs. La structure arborescente de ces

réseaux implique qu'un défaut sur une ligne électrique MT entrainera forcément la coupure des clients alimentés par cette ligne, même si des possibilités de secours plus ou moins rapides existent [5].



**Figure I.4 :** Schéma d'une structure arborescente.

### **I.3. Réglage du réseau**

Le respect des caractéristiques contractuelles de la tension et de la fréquence est, avec la continuité du service, l'un des critères essentiels qui permettent d'apprécier la qualité du service, souci majeur du producteur et du distributeur.

Par ailleurs, la tension et la fréquence sont également des indicateurs très précieux de la bonne exploitation, technique et économique, du système production-transport. La tension et la fréquence apparaissent donc comme des paramètres fondamentaux du fonctionnement de tout système d'énergie électrique.

Pour ce qui concerne la tension, nous verrons qu'il s'agit d'un problème essentiellement local (compensation). Il faut limiter les transits de réactif dans le réseau. On admet des plages de variations de l'ordre de 5 à 10% selon le niveau de tension et le type de clientèle [6].

#### **I.3.1. Contraintes sur les réseaux de transport**

Quelques clients gros consommateurs sont raccordés directement aux réseaux de transport. Ils disposent, en général, de leurs propres moyens de transformation et de réglage. Les plages de tensions admissibles seront donc seulement liées à des considérations concernant le bon fonctionnement du système production-transport.

### I.3.1.1. Limite de tension haute

Imposée par la tenue des matériels (tenue diélectrique, vieillissement des isolants) ou par leur fonctionnement correct (saturation des transformateurs, tenue des unités de production). C'est ainsi que, par exemple, on ne dépasse pas en régime normal, 245 kV sur le réseau 225 kV et 420 kV sur le réseau 400 kV.

### I.3.1.2. Limite de tension basse

Met en cause la sécurité du système électrique : surcharge des lignes et des transformateurs, tension critique, stabilité des alternateurs, franchissement du domaine de fonctionnement des groupes de production ou de leurs auxiliaires pouvant entraîner leur flottage.

## I.3.2. Réglage de la tension dans les réseaux de transports

Le réglage de la tension est alors indispensable pour une exploitation sûre du système électrique, pour minimiser les pertes et exploiter les matériels dans leur domaine de fonctionnement normal. Sur le réseau de transport le réglage de la tension est effectué en contrôlant la puissance réactive car sur ce type de réseau, en raison des caractéristiques des lignes, ce sont essentiellement les transits de puissance réactive qui créent des chutes de tension. Généralement, trois niveaux de réglage permettent d'atteindre les objectifs cités [7].

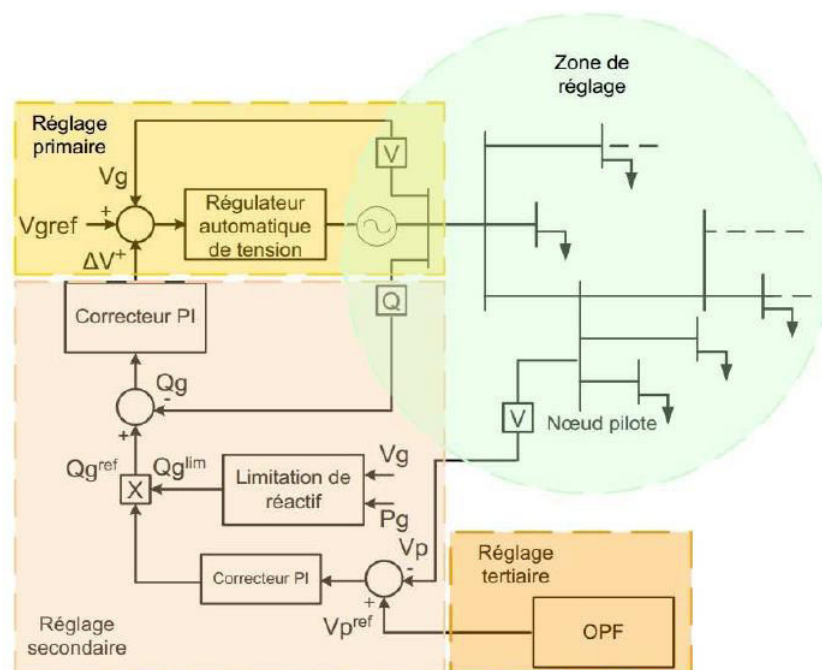


Figure I.5 : Réglage hiérarchisé de la tension.

$V_g$  et  $V_g^{ref}$  sont la tension mesurée et la référence de l'alternateur ;

$Q_g$  et  $Q_g^{ref}$  sont la puissance réactive mesurée et la référence de l'alternateur ;

$V_p$  et  $V_p^{ref}$  sont la tension mesurée et la référence du nœud pilote.

Ces réglages hiérarchisés permettent de réguler la tension sur les réseaux HTB (transport et répartition).

Pour le réseau de distribution le contrôle se fait localement à l'aide de systèmes gérant l'apport en puissance réactive nécessaire afin de limiter le transit de cette puissance sur les réseaux amont via les postes HTB/HTA qui occasionnent des pertes supplémentaires [8].

### **I.3.2.1. Réglage primaire de la tension**

Le réglage primaire de tension est assuré par les groupes de production équipés d'un régulateur primaire de tension. Grâce à ce régulateur les alternateurs maintiennent la tension à une valeur de consigne sur leur point de raccordement. Cette valeur est fixée par le gestionnaire du réseau. Le principe est d'agir sur l'excitation d'alternateur pour garder le niveau de tension désiré. En effet, si l'alternateur est surexcité celui-ci va produire de la puissance réactive ce qui aura pour effet d'accroître la tension à son point de connexion. Inversement, dans le cas d'une sous-excitation de l'alternateur celui-ci va absorber de la puissance réactive et donc faire diminuer la tension à ses bornes. Ceci est réalisable dans les limites propres de chaque alternateur. Le réglage primaire est le premier à intervenir suite à une perturbation. Il se caractérise par une action basée sur des critères locaux en asservissant la tension aux bornes du groupe à une valeur de référence. Son temps de réaction est de quelques centaines de millisecondes [8].

Aujourd'hui, ces fonctions sont réalisées par les alternateurs synchrones de grande puissance qui constituent les principales sources de tension sur le réseau [8].

### **I.3.2.2. Réglage secondaire de la tension**

Le principe du réglage secondaire de tension consiste à organiser le réseau en « zones de réglage », et à réguler la tension d'un point particulier de chaque zone, appelé « nœud pilote ». Celui-ci est choisi de façon à ce que sa tension soit représentative de celle de l'ensemble de la zone. Le réglage secondaire a pour objet de limiter les transits de puissance réactive sur les lignes d'interconnexion entre chaque zone, et de maintenir la tension aux nœuds pilotes de chaque zone à sa valeur de consigne [8].

Cette action est réalisée en élaborant une correction des valeurs de consigne de chaque groupe participant au réglage secondaire. Le correcteur du réglage secondaire élabore un

niveau de participation à partir de l'écart entre la consigne de tension du nœud pilote et la tension mesurée en ce même nœud. Ce niveau est ensuite utilisé par la boucle de réactif de chaque alternateur pour déterminer la correction à apporter sur la consigne de tension de ce dernier. Afin de protéger le réseau contre d'éventuelles oscillations dues à des actions contradictoires des réglages primaires et secondaires, ce dernier a un temps de réponse nettement plus long que le précédent : il est de l'ordre de la minute [8].

### **I.3.2.3. Réglage tertiaire de la tension**

Le réglage tertiaire est nécessaire pour coordonner les actions entre deux zones régies par des RST (Réglages Secondaires de Tension) différents. Ce réglage est effectué par les opérateurs de dispatching régional et comprend le calcul des tensions aux points pilotes.

Le réglage tertiaire, manuel, qui est effectué en France par le dispatching national, consiste à réévaluer, à intervalles de quinze minutes, les consignes de tension des nœuds pilotes de chaque zone de réglage selon des critères technico-économiques dont les principaux sont les suivants [9]:

- Exploiter le réseau en assurant au mieux sa sûreté;
- Respecter les contraintes de fonctionnement des matériels;
- Minimiser les pertes et les coûts de production;
- Utiliser au mieux la capacité des ouvrages de transport.

Il a pour but d'assurer une bonne tenue globale du plan de tension, et d'éviter des situations engendrant des surcoûts ou des risques pour le système électrique. Les consignes de tension des nœuds pilotes sont calculées par un Optimal Power Flow (OPF), en tenant compte des critères précédemment cités.

## **I.4. Régulation de la tension dans les réseaux de distribution**

La régulation de la tension dans les réseaux de distribution est relativement plus simple puisque le gestionnaire du réseau de distribution manque d'informations nécessaires sur son réseau (peu de capteurs installés, d'où les travaux actuels sur l'estimation d'état). Normalement, il ne peut piloter que la tension au jeu de barres HTA à l'aide du régleur en charge et compenser, avec les bancs de condensateurs, la puissance réactive prélevée sur le réseau HTB amont pour limiter la chute de tension dans le transformateur.

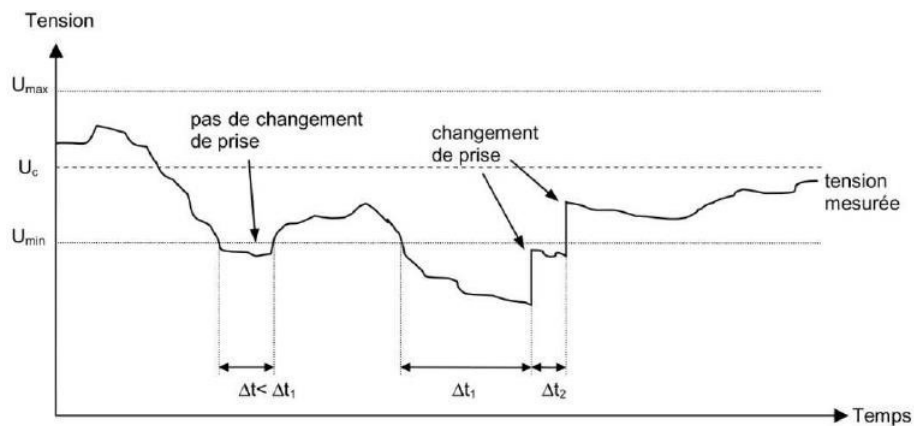
La régulation de tension sur tout le réseau nécessite des mesures abondantes réparties dans le réseau et les moyens de réglage le long des départs. L'évolution de cette régulation progresse dans le contexte du réseau de distribution intelligent.

### I.4.1. Le régleur en charge au transformateur HTB/HTA

Le régleur au sein du transformateur est un système électromécanique qui permet d'ajuster le rapport de transformation en ajoutant, ou retranchant, quelques spires de réglage en série avec les spires de l'enroulement haute tension. Cet ajustement peut être réalisé en charge, comme c'est souvent le cas sur de gros appareils, ou hors charge. Les régleurs en charge sont plus complexes que les commutateurs hors tension, mais ils permettent de stabiliser le réseau en maintenant une tension quasi-constante. Le régleur en charge (On-Load Tap Changer ou OLTC) installé au transformateur HTB/HTA est le moyen de réglage de la tension le plus utilisé dans le réseau de distribution HTA.

Ceux-ci permettent d'ajuster la tension des jeux de barre HTA en fonction de l'évolution des charges et des fluctuations de la tension amont. Un régleur en charge typique possède 17 prises (8 à la hausse et 8 à la baisse) avec le pas 0.625%, c'est-à-dire qu'il permet de modifier le rapport de tension dans l'intervalle  $\pm 5\%$ .

Le fonctionnement dynamique du régleur en charge s'illustre par la figure (I.6) [7].



**Figure I.6 :** La dynamique du régleur en charge.

Si la tension mesurée dépasse le seuil de plage admissible, le premier changement de prise se fait avec un retard  $\Delta t_1$  d'une minute, pour éviter des manœuvres excessives non-nécessaires due aux fluctuations transitoires lors de la connexion ou déconnexion des charges importantes. Dès que le premier changement a lieu, le retard  $\Delta t_2$  est réduit à 10s pour les changements de prise suivants si nécessaire.

### I.4.2. Les bancs de condensateurs

Les bancs de condensateur installés au poste source permettent d'injecter la puissance réactive au jeu de barre. La puissance réactive injectée est exprimée par l'équation (I.1) :



$$Q_c = Q_N U_c^2 \quad (I.1)$$

Où :  $Q_c$  est la puissance réactive injectée par le condensateur en MVAR,  $Q_N$  est la valeur nominale du condensateur en MVAR,  $U_c$  est la tension du condensateur en pu.

La puissance réactive injectée par le condensateur est capable de compenser la puissance réactive transférée via le transformateur et donc réduire le transit de puissance réactive depuis le réseau amont. La compensation par les bancs de condensateurs permet d'améliorer le facteur de puissance vis-à-vis du réseau de transport et donc d'y réduire les chutes de tension. Cela permet aussi de diminuer les pertes actives du réseau de transport puisqu'il y a moins de transits de courant.

## I.5. L'énergie réactive au sein du réseau

Aujourd'hui l'exploitation des grands réseaux électriques est de plus en plus complexe du fait de l'augmentation de leurs taille, de la présence des lignes d'interconnexion de grande longueur, de l'adoption de nouvelles techniques, de contraintes économiques, politiques et écologiques... ; Ces facteurs obligent les opérateurs à exploiter ces réseaux près de la limite de stabilité et de sécurité [11].

La gestion du réseau électrique ne consiste pas seulement à faire en sorte que les transits soient inférieurs aux capacités de transport de chaque ouvrage du réseau. Il faut également surveiller plusieurs paramètres techniques, dont la puissance réactive et le niveau de tension; la tension électrique doit rester dans une plage autorisée en tout point du réseau, dans toutes les situations de production et de consommation prévisibles. En effet, la tension peut localement être dégradée, par exemple les jours de forte consommation, dans ce cas, les transits à travers les lignes du réseau sont importants, ce qui provoque une chute de tension dans ces lignes [11].

### I.5.1. La puissance réactive

La puissance réactive apparaît lorsqu'il existe un déphasage entre la tension et le courant qui traverse le récepteur, c'est-à-dire lorsque celui-ci comporte des inductances ou des condensateurs en régime sinusoïdal. Elle caractérise l'existence d'une composante de courant qui ne donne lieu à aucun échange de puissance moyenne mais qui occasionne des pertes et des chutes de tension.

Les machines électriques utilisant le courant alternatif (moteurs, transformateurs, éclairages, etc.) mettent en jeu deux types d'énergie.

L'énergie active consommée présente la puissance mécanique (travail) et les pertes (chaleur). L'énergie réactive consommée présente l'énergie utilisée par les circuits magnétiques des machines électriques.

L'énergie électrique livrée par les gestionnaires de réseau d'électricité est ainsi composée de puissance active (qui est utilisée par les moteurs et pour la chaleur), et de puissance réactive transformée par les machines électriques pour créer leur propre champ électromagnétique.

### I.5.2. Effets de la puissance réactive

En pratique, la puissance réactive se transporte mal et sa circulation sur les réseaux entraîne, du fait d'un courant appelé plus important, un échauffement des câbles d'alimentation, des pertes supplémentaires, des chutes de tension importantes et des surcharges au niveau des transformateurs, ce qui alourdi le transit de puissance et impose un surdimensionnement des installations.

À l'exception de ces aspects purement statiques, la puissance réactive peut jouer un grand rôle dans d'autres aspects dynamiques, tels que les fluctuations de tension produites par les variations soudaines des charges, et le phénomène de flicker [12].

Afin de garantir une bonne qualité d'énergie il est nécessaire de satisfaire l'équilibre entre l'offre et la demande de l'énergie réactive, de fournir une tension aussi régulière que possible et de respecter un certain nombre de contraintes techniques [12].

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 [12].

### I.5.3. Couple tension réactif [13]

La tension en un point du réseau est fonction, d'une part, des forces électromotrices des générateurs qui y sont raccordés, d'autre part, des chutes de tension dans les divers éléments du réseau (machines, transformateurs, lignes, etc.). Pour un réseau triphasé, l'écart de tension peut être approché par la relation :

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{U_1 - U_2}{U} = \frac{RP + XQ}{U^2} \quad (I.2)$$

La diminution de la chute de tension entre deux sommets d'un réseau passe ainsi par une réduction de la somme R.P + X.Q et une augmentation de la tension U d'exploitation.

Pour un réseau de transport, dans lequel la résistance des lignes HTB est négligeable par rapport à la réactance ( $R \ll X$ ), la relation (I.2) devient :

$$\frac{\Delta U}{U} \cong \frac{XQ}{U^2} \quad (I.3)$$

C'est donc, de façon prépondérante, c'est la circulation de puissance réactive qui crée les chutes de tension dans une ligne HTB. La tension et la puissance réactive sont donc des grandeurs très liées. Ainsi, la puissance réactive « se transporte » mal et au-delà d'une certaine distance, la puissance réactive fournie par les alternateurs ou les condensateurs ne peut pas parvenir jusqu'à l'endroit où elle est nécessaire.

Pour régler la tension sur un réseau, il faut donc maîtriser le transit de la puissance réactive dans les ouvrages du réseau de transport. Pour réaliser cet objectif, il faut donc compenser la puissance réactive :

- Au plus près des charges essentiellement consommatrices de puissance réactive ;
- Des réseaux de transport et de distribution qui peuvent produire ou consommer de la puissance réactive selon l'état de charge du réseau.

Comme les moyens de compensation statiques en réseau ou chez les clients sont souvent insuffisants et de moindre performances (réglages lents et discontinus), le réglage continu et dynamique des groupes de production est donc indispensable pour la tenue de la tension sur le réseau de transport.

Pour augmenter la capacité de transit des lignes existantes et améliorer la sûreté du réseau et la qualité de l'électricité acheminée, il est donc conseillé de :

- Produire ou consommer la puissance réactive là où elle est consommée ou produite (alternateurs, compensateurs synchrones, condensateurs, inductances, FACTS) ;
- Maintenir un niveau de tension constant en un maximum de points du réseau (alternateurs, FACTS, régulateurs en charge) ;
- Compenser les impédances des lignes de transport (FACTS, inductances, condensateurs).

# Chapitre II

---

## Modélisation des éléments du réseau

---

## II.1. Introduction

Après un bref aperçu sur l'énergie réactive dans le réseau électrique que nous avons exposé dans le chapitre précédent, nous nous intéressons dans ce chapitre à la modélisation des différents composants constituant un réseau électrique à savoir : les générateurs d'énergie électriques, les lignes de transport, les transformateurs et les charges électriques. On procédera aussi à la présentation de quelques compensateurs d'énergie réactive connus sous le nom de FACTS et de leur modélisation dans le réseau électrique.

## II.2. Modélisation des éléments du réseau

### II.2.1. Modèle du générateur [14]

Les générateurs sont des éléments du réseau capables de fournir de la puissance active au système. Ils peuvent aussi produire, voir consommer, de la puissance réactive de manière à maintenir un certain niveau de tension. Les limites de production des générateurs sont définies par :

$$P_{Gimin} \leq P_{Gi} \leq P_{Gimax} \quad (\text{II. 1})$$

$$Q_{Gimin} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gimax} \quad (\text{II. 2})$$

Deux modèles sont utilisés pour décrire les générateurs :

Dans ce modèle, ils sont représentés comme des nœuds PV et leurs caractéristiques sont la puissance active produite  $P_{Gi}$  et la tension de consigne  $U_{i\ set}$ . La valeur de la puissance réactive est calculée de manière à maintenir la tension nodale à sa valeur de consigne. Lorsque  $Q_{Gi}$  dépasse une de ses limites, elle est fixée à cette dernière et la tension ne peut plus être contrôlée. Le nœud se comporte alors comme un nœud PQ.

Dans ce modèle, les générateurs sont modélisés par des injections de puissance complexes constantes. Dans ce cas les valeurs de puissance active  $P_{Gi}$  et réactive  $Q_{Gi}$  sont données et il n'y a pas de contrôle de tension possible.

Un des générateurs est pris comme référence (slack), il est admis comme ayant des puissances active et réactive infinies, sa phase choisie comme référence pour le système et est fixée à  $\delta_{ref} = 0^\circ$ .

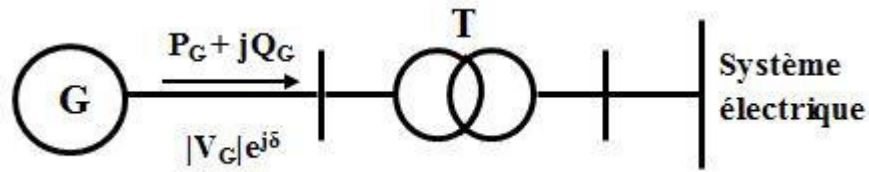
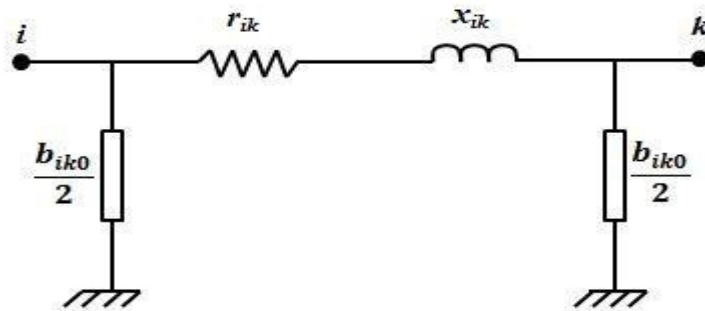


Figure II.1 : Modèle du générateur de puissance.

### II.2.2. Modèle d'une ligne de transport d'énergie

Une ligne peut être considérée comme une série de circuits à constantes réparties uniformément sur toute sa longueur. Ces circuits sont composés d'une infinité d'éléments identiques constitués, d'une inductance linéique de réactance  $x_{ik}$ , et d'une résistance linéique  $r_{ik}$ , dans le sens longitudinal, qui donnent naissance à des chutes de tension. Une conductance linéique et une capacité linéique dans le sens transversale. Le schéma équivalent en  $\pi$  est représenté par la figure (II.2).

Figure II.2 : Schéma en  $\pi$  d'une ligne de transport d'énergie.

La matrice d'admittance nodale d'une ligne reliant un nœud  $i$  à un nœud  $k$  est donnée par :

$$\underline{Y} = \begin{pmatrix} \underline{y}_{ik} + \frac{y_{iko}}{2} & -\underline{y}_{ik} \\ -\underline{y}_{ik} & \underline{y}_{ik} + \frac{y_{iko}}{2} \end{pmatrix} \quad (\text{II. 3})$$

Où l'admittance longitudinale  $\underline{y}_{ik}$  vaut :

$$\underline{y}_{ik} = \frac{1}{r_{ik} + jx_{ik}} = g_{ik} - b_{ik} \quad (\text{II. 4})$$

Avec :

$r_{ik}$  : résistance longitudinale.

$x_{ik}$  : réactance longitudinale.

L'admittance transversale correspondant aux effets capacitifs s'écrit :

$$y_{ik0} = jb_{ik0} \quad (\text{II. 5})$$

Avec :

$b_{ik0}$  : susceptance transversale [3].

### II.2.3. Modèles des nœuds du réseau [1]

Les nœuds dans un réseau électrique sont divisés en trois types :

- **Nœud de charge (PQ)** : c'est un nœud connecté directement avec la charge, il ne possède aucune source d'énergie. Les puissances active et réactive sont considérées connues. Les variables à déterminer sont le module et la phase de la tension.
- **Nœud générateur (PV)** : c'est un nœud connecté directement avec un générateur ou une source d'énergie réactive. La puissance active et la tension sont considérées connues. La production de l'énergie réactive est limitée par des valeurs inférieures et supérieures,  $Q_{Gmin}$  et  $Q_{Gmax}$  respectivement. Si l'une des deux limites est atteinte, la valeur se fixe à cette limite et la tension se libère, le nœud devient alors un nœud (PQ). Les variables à déterminer sont la phase de la tension et la puissance réactive.
- **Nœud bilan (slack bus)** : c'est un nœud connecté avec un générateur relativement puissant ; il est considéré dans le calcul d'écoulement de puissance afin de compenser les pertes actives et assurer l'égalité entre la demande et la génération de la puissance active. Dans un nœud bilan, l'amplitude et l'angle de la tension sont supposés connus. Les valeurs à déterminer sont les puissances active et réactive.

Le tableau (II.1) ci-dessous donne les variables connues et inconnues pour chaque type de jeu de barres.

**Tableau II.1** : Classification des nœuds d'un réseau électrique.

Type du jeu de barres	Variables connues	Variables inconnues
Référence (Slack)	$ V , \delta$	P,Q
Contrôle (PV)	P,V	Q, $\delta$
Charge (PQ)	P,Q	$ V , \delta$

### II.2.4. Modèle d'une charge [14]

Les charges représentent les consommateurs connectés au réseau. Elles correspondent à des injections négatives aux nœuds. Les charges sont modélisées par des puissances constantes indépendantes de la tension nodale.

$$\underline{S}_{Li} = P_{Li} + jQ_{Li} \tag{II.6}$$

Où  $\underline{S}_{Li}$  est la puissance complexe de la charge,  $P_{Li}$  la puissance active et  $Q_{Li}$  la puissance réactive. La puissance réactive  $Q_{Li}$ , qui peut être positive ou négative correspond respectivement à des charges de nature inductive ou capacitive.

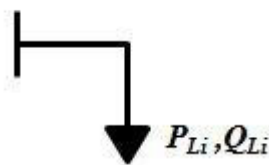


Figure II.3 : Modèle d'une charge.

### II.2.5. Modèle d'un transformateur

Un transformateur d'énergie électrique est représenté par un quadripôle en  $\pi$  non symétrique. Les grandeurs associées sont le rapport de transformation  $a$  et l'impédance de fuite. Les rapports  $a_{ij}$  sont inclus dans les éléments de la matrice admittance, c'est-à-dire que les susceptances de la matrice admittance  $b_{ij}$  sont vues comme des fonctions de rapports de transformation  $a$  (figure II.4) [15].

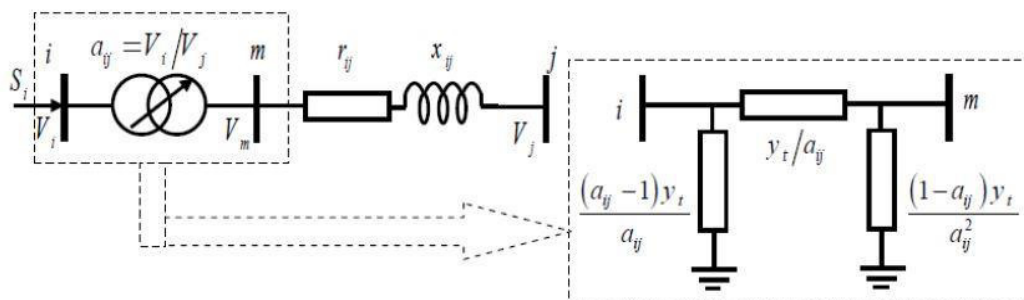


Figure II.4 : Modèle du transformateur.

La matrice d'admittance d'un transformateur inséré entre un nœud  $i$  et un nœud  $j$  s'écrit:



$$Y = \begin{pmatrix} \frac{1}{a^2} y_{ij} & -\frac{1}{a} y_{ij} \\ -\frac{1}{a} y_{ij} & y_{ij} \end{pmatrix} \quad (\text{II. 7})$$

Avec :

$a$  : le rapport de transformation.

$y_{ij}$  : l'admittance de la branche  $i$ - $j$ .

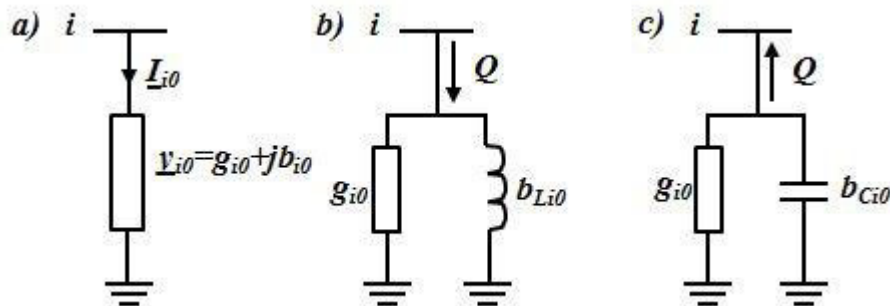
Dans certains cas, la branche magnétisante est prise en compte dans le modèle. Elle se présente alors sous la forme d'une susceptance inductive shunt.

### II.2.6. Modèle de l'élément shunt [14]

Les dispositifs shunt, généralement utilisés pour la compensation de l'énergie réactive et le maintien du profil de la tension, sont modélisés par des admittances  $\underline{y}_{i0}$  de la forme :

$$\underline{y}_{i0} = g_{i0} + j b_{i0} \quad (\text{II. 8})$$

Le symbole général représentant un élément shunt est représenté dans la figure (II.5.(a)). La susceptance  $b_{i0}$  peut être inductive ou capacitive. Dans le premier cas, l'élément consomme de la puissance réactive (figure II.5.(b)), alors qu'il en fournit au système dans le second (figure II.5.(c)).



**Figure II.5 :** Modèle de l'élément shunt :

(a) symbole, (b) élément inductif, (c) élément capacitif.

## II.3. Les systèmes FACTS

### II.3.1. Introduction

Les dispositifs FACTS (*Flexible Alternative Current Transmission Systems*) peuvent contribuer à faire face aux problèmes rencontrés dans l'exploitation des réseaux électriques. Le concept FACTS, introduit en 1986 par *Electric Power Research Institut* (EPRI), regroupe l'ensemble des dispositifs, basés sur l'électronique de puissance, qui permettent d'améliorer l'exploitation d'un réseau électrique. Leur développement est étroitement lié aux progrès réalisés dans le domaine des semi-conducteurs de puissance et plus particulièrement des éléments commandables tel que le thyristor et le thyristor GTO. Ces éléments jouent le rôle d'interrupteurs très rapides ; ce qui confère aux dispositifs FACTS une vitesse et une fiabilité bien supérieur à celle des systèmes électromécaniques classiques.

Des études et des réalisations pratiques ont mis en évidence l'énorme potentiel des dispositifs FACTS. Avec leur capacité à modifier l'impédance apparente d'une ligne de transport. Ils peuvent être utilisés aussi bien pour le contrôle de la puissance active que celui de la puissance réactive et de la tension. En régime permanent, les FACTS permettent d'utiliser les lignes plus près de leur limite thermique en repoussant les limitations liées à la stabilité. Leur vitesse de commande élevée leur confère également un grand nombre d'avantages en régime transitoire ainsi qu'en cas de court-circuit. De manière générale, les dispositifs FACTS agissent en fournissant ou en absorbant de la puissance réactive, en augmentant ou en réduisant la tension aux nœuds, en contrôlant l'impédance des lignes ou en modifiant les phases des tensions.

### II.3.2. Définition et généralités

Selon L'IEEE (Institut of Electrical and Electronics Engineers), la définition du terme FACTS est la suivante : *Systèmes de Transmission en Courant Alternatif comportant des dispositifs basés sur l'électronique de puissance et d'autres dispositifs statiques utilisés pour accroître la contrôlabilité et augmenter la capacité de transfert du réseau de puissance* [16].

Avec leurs aptitudes de modifier les caractéristiques apparentes des lignes, les FACTS sont capables d'accroître la capacité du réseau dans son ensemble en contrôlant les transits de puissances. Il est donc important de souligner que les dispositifs FACTS ne peuvent pas augmenter la capacité thermique des lignes de transport. En revanche, ils permettent d'utiliser les lignes plus proches de leurs limites en repoussant d'autres limitations. Finalement, il faut

noter que les FACTS ne remplacent pas la construction de nouvelles lignes. Ils sont un moyen de différer les investissements en permettant une utilisation plus efficace du réseau existant [1].

### II.3.3. Différentes catégories des FACTS

Plusieurs types de FACTS avec des architectures et des technologies différents, ont été développés. Parmi eux, les plus connus sont le SVC (Static Var Compensator), le TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor), le STATCOM (Static Synchronous Compensator), et l'UPFC (Unified Power Flow Controller). Chacun de ces dispositifs possède ses propres caractéristiques et peut être utilisé pour répondre à des besoins bien précis. Le choix du dispositif approprié est donc essentiel et dépend des objectifs à atteindre. La position de l'installation dans le réseau est également un paramètre important pour son efficacité. Lorsque plusieurs dispositifs sont insérés dans un réseau, il convient que leurs effets soient coordonnés afin qu'ils n'agissent pas de façon opposée. Dans ce cas, la stratégie de contrôle revêt une importance toute particulière [1].

La figure (II.6) représente les grandes catégories des dispositifs de contrôle des réseaux électriques : la colonne sur la gauche contient les systèmes conventionnels constitués de composant de base RLC et transformateurs de valeurs fixes (compensation fixe) ou variable commandés par des interrupteurs mécaniques. Les dispositifs FACTS contiennent également les mêmes composants mais rapidement commandables avec des interrupteurs statiques et convertisseurs de l'électronique de puissance [16].

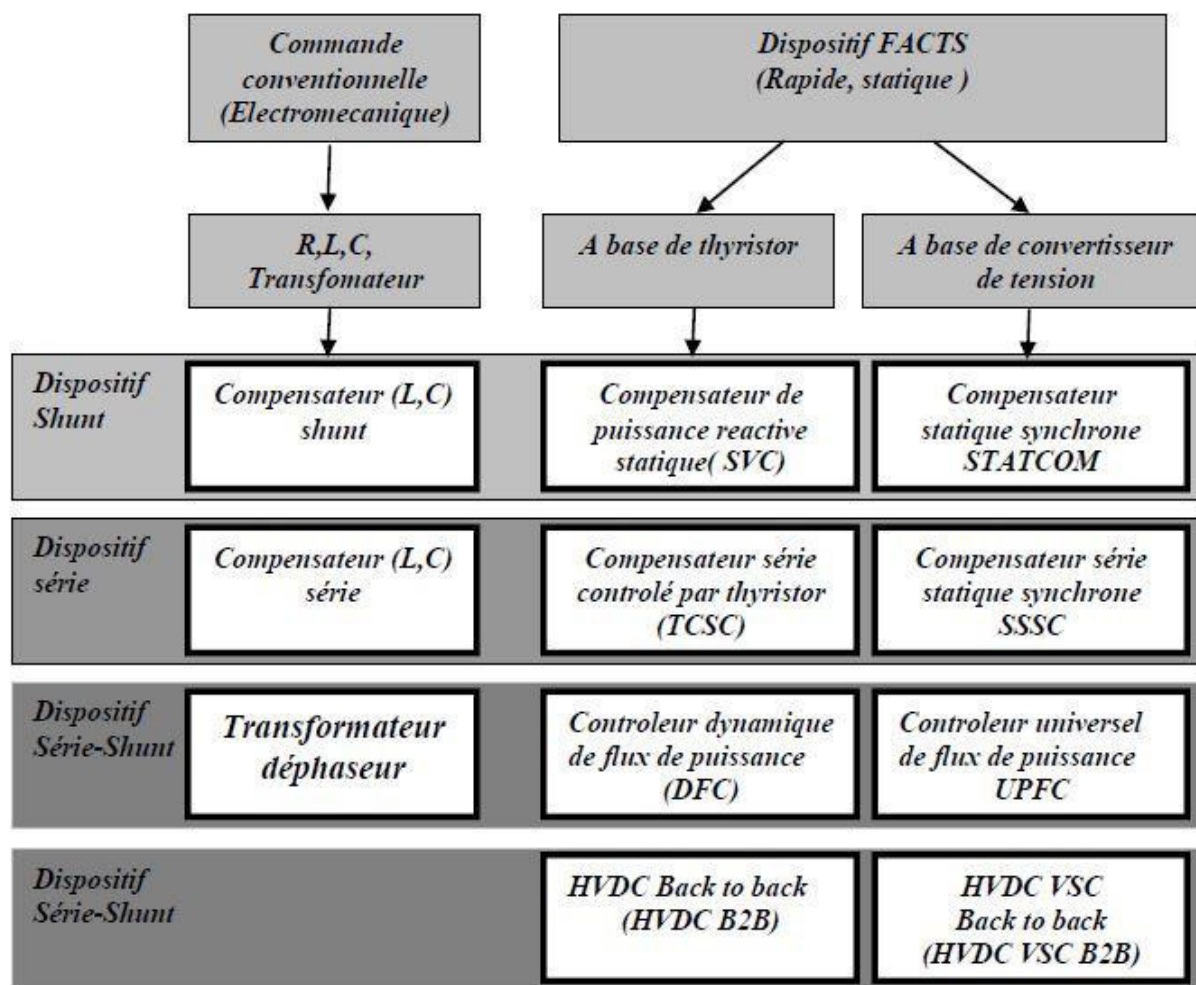


Figure II.6 : Principaux dispositifs FACTS [17].

La colonne gauche des systèmes FACTS présente les contrôleurs à base des thyristors ou bien à des convertisseurs à thyristor tel que le SVC et le TCSC qui sont connus depuis plusieurs dizaines d'années à titre de compensateurs shunt et série respectivement et qui ont prouvé leur fiabilité dans le contrôle des réseaux. Les dispositifs dans la colonne de droite sont la technologie la plus avancée des FACTS avec des convertisseurs de sources de tension à base des interrupteurs statiques sophistiqués IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors) ou bien les IGCT (Insulated Gate Commutated Thyristors) tel que le STATCOM, le SSSC et l'UPFC. Ces convertisseurs de source de tension fournissent ou injectent une tension totalement contrôlable en amplitude et en phase en série ou en parallèle dans le réseau selon les exigences de contrôle en exerçant une MLI sur les gâchettes des interrupteurs de ces convertisseurs [17].

Chaque élément de ces colonnes peut être structuré selon sa connexion au réseau, en général les FACTS sont divisés en trois grandes catégories principales :

- **Compensateurs séries** : ces compensateurs sont connectés en série avec le réseau comme une impédance variable (inductive ou capacitive) ou une source de tension variable. Utilisés pour la compensation série de la puissance réactive et par leur influence sur l'impédance effective des lignes ils interviennent dans le contrôle du flux de puissance et la stabilité de ce dernier. En général ces dispositifs séries injectent une tension en série avec la ligne de transmission [17].
- **Compensateurs shunts** : ils consistent en une impédance variable, source variable ou une combinaison des deux. Ils injectent un courant dans le réseau à travers le point de connexion. Ils sont principalement pour la compensation de la puissance réactive et par conséquent contrôler la tension des nœuds [17].
- **Compensateurs hybrides série-shunt** : c'est une combinaison des dispositifs séries et shunts commandés d'une manière coordonnée afin d'accomplir un contrôle prédéfini. Ils permettent un contrôle multi variables, ils servent à contrôler le flux de puissance active et réactive, la tension et l'angle de transport de l'énergie [17].

#### II.3.4. Rôle des dispositifs FACTS [3]

Le développement des dispositifs FACTS est essentiellement dû aux progrès réalisés dans le domaine des semi-conducteurs de puissance et plus particulièrement des éléments commandables tels que le thyristor et le thyristor GTO. Les FACTS représentent une alternative aux dispositifs de réglages de puissance utilisant des techniques passives : bobine d'induction et condensateur déclenchés par disjoncteurs, transformateur déphaseur à réglage en charge mécanique, ...etc. Dans les dispositifs FACTS, les interrupteurs électromagnétiques sont remplacés par des interrupteurs électroniques. Ils disposent ainsi de vitesses de commande très élevées et ne rencontrent pas les problèmes d'usure de leurs prédécesseurs, de ce fait, les FACTS possèdent une très grande fiabilité et une flexibilité pratiquement sans limite.

Dans un réseau électrique, les FACTS permettent de remplir des fonctions tant en régime stationnaire qu'en régime transitoire. Ils agissent généralement en absorbant ou en fournissant de la puissance réactive, en contrôlant l'impédance des lignes ou en modifiant les angles des tensions. En régime permanent, les FACTS sont utilisés principalement dans les deux contextes suivants :

- Le maintien de la tension à un niveau acceptable en fournissant de la puissance réactive lorsque la charge est élevée et que la tension est trop basse, alors qu'à l'inverse ils en absorbent si la tension est trop élevée.
- Le contrôle des transits de puissances de manière à réduire les surcharges dans les lignes ou les transformateurs. Ils agissent alors en contrôlant la réactance des lignes et en ajustant les déphasages.

De par leur vitesse de commande élevée, les FACTS possèdent de nombreuses qualités en régime dynamique. Ils permettent en particulier :

- D'accroître la réserve de stabilité transitoire.
- D'amortir les oscillations de puissance.
- De supporter de manière dynamique la tension.

### II.3.5. Applications pratiques des dispositifs FACTS [17]

Les systèmes FACTS sont habituellement connus comme nouvelle technologie, mais des centaines d'installations dans le monde, plus particulièrement du SVC depuis 1970 avec une puissance totale installée de 90.000 MVAR, prouvent l'acceptation de ce genre de technologie. Le tableau (II.2) montre des chiffres approximatifs des dispositifs FACTS installés dans le monde avec les puissances totales installées.

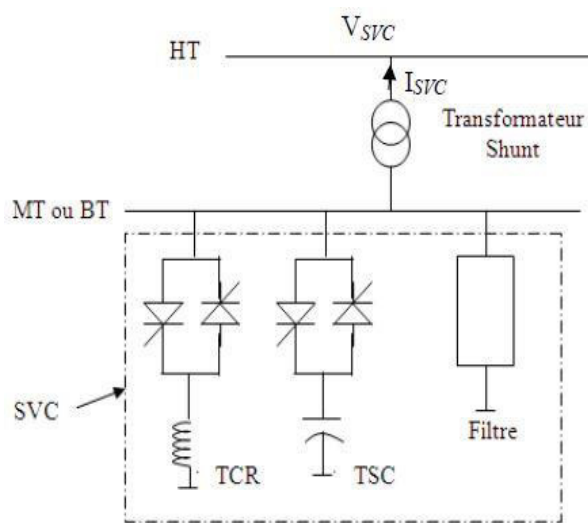
**Tableau II.2 :** Les chiffres approximatifs des dispositifs FACTS installés dans le monde et leurs puissances totales.

<i>Type</i>	<i>Nombre</i>	<i>Puissance installée en MVA</i>
<b>SVC</b>	<b>600</b>	<b>90.000</b>
<b>STATCOM</b>	<b>15</b>	<b>1.200</b>
<b>Série Compensation</b>	<b>700</b>	<b>350.000</b>
<b>TCSC</b>	<b>10</b>	<b>2.000</b>
<b>HVDC B2B</b>	<b>41</b>	<b>14.000</b>
<b>UPFC</b>	<b>2-3</b>	<b>250</b>

## II.3.6. Exemples de dispositifs FACTS

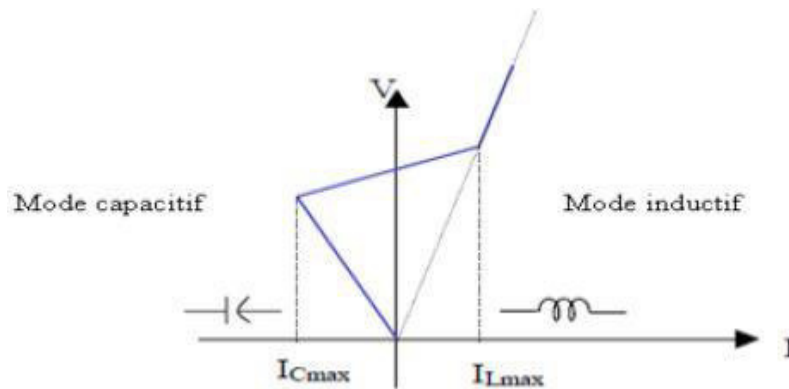
### II.3.6.1. SVC (Static Var Compensator) [18]

Dans la pratique, il y a plusieurs modèles de SVC, le modèle défini par (Conférence Internationale des Grandes Réseaux Electrique) considère le SVC comme un générateur synchrone qui ne produit aucune puissance active, identique à un condensateur synchrone en parallèle avec une réactance inductive. Le jeu de barres au point de raccordement est comme un jeu de barres PV bus, devient PQ bus quand le SVC fonctionne à sa limite.



**Figure II.7 :** Schéma de principe d'un SVC.

Le SVC est l'association d'une inductance commandée par thyristor (Thyristor-Controlled Reactor: TCR), d'un condensateur commuté par thyristor (Thyristor-Switched Capacitor: TSC) et d'un filtre d'harmoniques. La caractéristique statique de ce type de FACTS est donnée par la figure (II.8).



**Figure II.8 :** Caractéristique d'un SVC.

$I_{Cmax}$  et  $I_{Lmax}$  sont les courants limites que peuvent supporter respectivement le TCR et le TSC.

Le SVC est un dispositif qui met en jeu des thyristors montés en tête-bêche; Un "Static Var Compensator" est un dispositif shunt, branché en général à travers un transformateur HT/MT ou BT. Un SVC est un générateur de puissance réactive qui produit/absorbe une puissance variant de façon continue depuis :  $+Q_c$  à  $-Q_1$ .

Le SVC répond en dynamique, dans un temps court, de l'ordre de deux cycles, pour compenser une variation brusque de la tension consécutive à un à-coup de charge ou à un défaut.

Le TSC fournit rien, ou sa pleine puissance:  $0/+Q_c$

Le TCR absorbe de façon continûment variable:  $0/-Q_1$

Le filtre fournit en permanence sa puissance :  $+Q_f$

Le bilan du SVC est donc :  $Q = +Q_c + Q_f - Q_1$

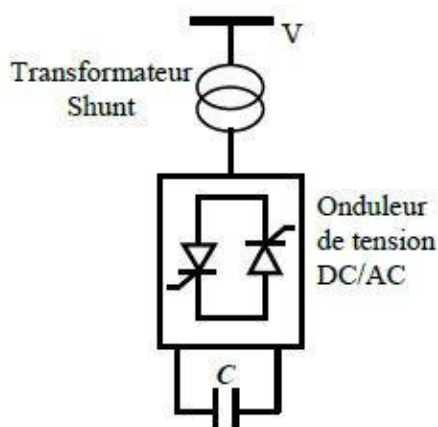
### II.3.6.2. STATCOM (Static Synchronous Compensator)

Ce type de compensateur a été défini par IEEE comme un générateur synchrone fonctionnant comme un compensateur parallèle de l'énergie réactive. Le courant capacitif et inductif peut être contrôlé séparément de la tension du réseau [19].

Ce type de compensateur a été développé à la fin des années 70, mais ce n'est que durant les années 90 qu'il a connu un essor important grâce aux développements des interrupteurs GTO de forte puissance [20].

La figure (II.9),représente le schéma électrique d'un STATCOM. Son rôle est d'échanger de l'énergie réactive avec le réseau. L'onduleur est couplé au réseau par l'intermédiaire d'un transformateur shunt de couplage.





**Figure II.9 :** Schéma électrique d'un STATCOM.

Son principe est simple, un onduleur de tension produit, grâce à une source de tension continue, un jeu de tensions triphasées, en phase et couplées aux tensions d'une ligne via une inductance faible. Celle-ci correspond en général à l'inductance de fuite par phase du transformateur de couplage [21].

L'échange d'énergie réactive se fait par le contrôle de la tension de sortie de l'onduleur  $V_{sh}$ , laquelle est en phase avec la tension du réseau  $V$ . Le fonctionnement peut être décrit de la façon suivante [22].

- Si la tension  $V_{sh}$  est inférieure à  $V$ , le courant circulant dans l'inductance est déphasé de  $(-\pi/2)$  par rapport à la tension  $V$  ce qui donne un courant inductif (Figure II.10.(a)).
- Si la tension  $V_{sh}$  est supérieure à  $V$ , le courant circulant dans l'inductance est déphasé de  $(+\pi/2)$  par rapport à la tension  $V$  ce qui donne un courant capacitif (Figure II.10.(b)).
- Si la tension  $V_{sh}$  est égale à  $V$ , le courant circulant dans l'inductance est nul et par conséquent il n'y a pas d'échange d'énergie.



**Figure II.10 :** Diagramme fonctionnel du STATCOM :

(a) Courant inductif, (b) Courant capacitif.

Les avantages et les inconvénients que porte ce moyen de compensation sont :

➤ **Avantage :**

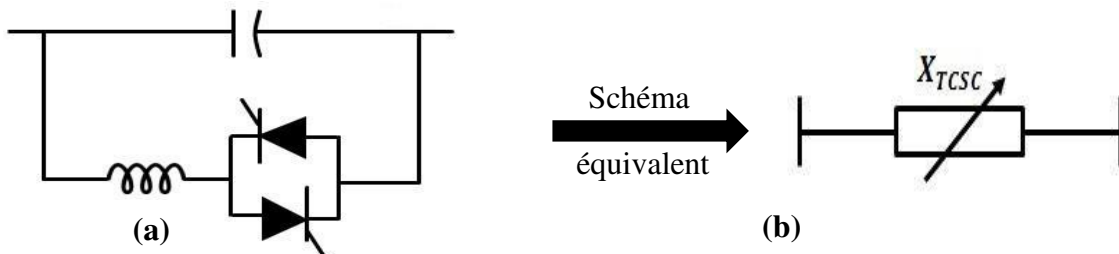
- Pouvoir échanger de l'énergie de nature inductive ou capacitive uniquement à l'aide d'une seule inductance. Contrairement au compensateur statique, de pouvoir fournir un courant constant important même lorsque la tension  $V$  diminue [22].

➤ **Inconvénient :**

- Une seule fonction qui est l'échange d'énergie réactive (absorber/fournir) avec le jeu de barre.

### II.3.6.3. TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor)

Constitué d'une inductance en série avec un gradateur et l'ensemble en parallèle avec une capacité (figure II.11).



**Figure II.11 :** (a) Structure d'un TCSC, (b) Représentation par réactance variable.

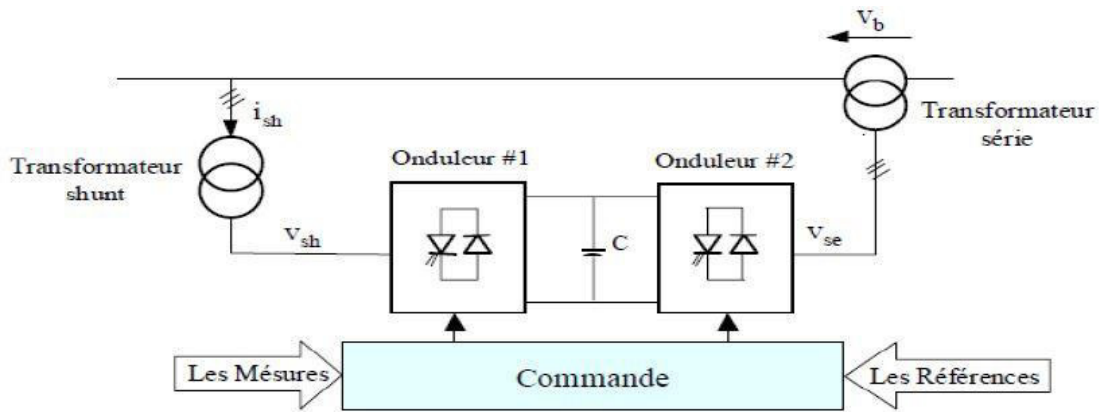
Le TCSC placé en série dans une ligne de transport permet de contrôler le flux de puissance et d'élever la capacité de transfert des lignes en agissant sur la réactance qui varie selon l'angle de retard à l'amorçage des thyristors  $\alpha$  donné par la formule suivante [23]:

$$X_{TCSC}(\alpha) = \frac{jL\omega}{\frac{2}{\pi} \left( \pi - \alpha + \frac{\sin(2\alpha)}{2} \right) - LC\omega^2} \quad (\text{II. 9})$$

Le TCSC permet une compensation qui varie entre 20% inductive et 80% capacitive [24].

### II.3.6.4. UPFC (Unified Power Flow Controller)

Composé de deux convertisseurs de tension (onduleur) qui partagent le même condensateur dans leurs côtés continus et possédant un système de commande unifié. La figure (II.12), illustre son schéma de base [25].



**Figure II.12** : Schéma de base de l'UPFC [25].

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

- Le réglage de la tension.
- Le contrôle de flux de puissance active et réactive.
- L'amélioration de la stabilité [26].

### II.3.7. Modélisation des dispositifs FACTS

Différentes façons de modéliser les dispositifs FACTS ont été développées pour l'étude des régimes stationnaires. Elles se différencient principalement par la méthode utilisée pour intégrer les FACTS dans le calcul du load flow. Les trois modélisations rencontrées le plus souvent dans la littérature sont basées respectivement sur l'injection de puissance équivalente, la création d'un nœud fictif ou encore la modification de la matrice d'admittance. Ces trois techniques sont présentées aux paragraphes suivants [15].

#### II.3.7.1. Injection de puissance aux extrémités de la ligne [15]

Une des méthodes les plus répandues consiste à représenter les dispositifs FACTS sous forme d'injections de puissances aux nœuds telles que représentées à la figure (II.13).

Le principe consiste à remplacer l'effet dû au dispositif FACTS sur les transits de puissances dans la ligne (figure II.13.(a)), par des injections de puissances aux deux extrémités (figure II.13.(b)). Celles-ci sont calculées de manière à ce que l'effet produit soit équivalent à celui du dispositif en question. Les injections de puissances active et réactive au nœud  $i$  sont données par :

$$P_i^F = P_{ij} - P_{ij}^F \quad (\text{II. 9})$$

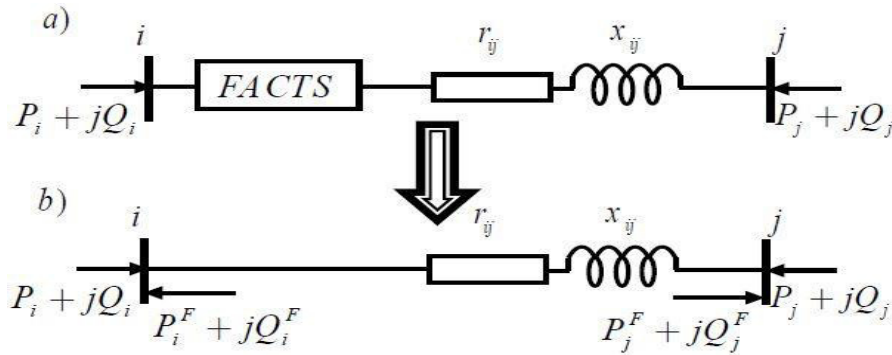
$$Q_i^F = Q_{ij} - Q_{ij}^F \quad (\text{II. 10})$$

Avec :

$P_i^F, Q_i^F$  : Injections équivalentes de puissances active et réactive au nœud  $i$  ;

$P_{ij}, Q_{ij}$  : Transits de puissances active et réactive sans dispositif FACTS ;

$P_{ij}^F, Q_{ij}^F$  : Transits de puissances active et réactive avec le FACTS dans la ligne.



**Figure II.13** : Modélisation par injection de puissance :

(a) ligne avec FACTS, (b) ligne équivalente avec injection.

Deux relations similaires sont obtenues pour le nœud  $j$ . Ces quatre injections équivalentes, ainsi que le modèle standard de la ligne, sont utilisées dans les équations du load flow. Elles sont traitées comme des charges ou des générations aux nœuds  $i$  et  $j$ . Les injections de puissances actives aux nœuds PV et PQ s'écrivent :

$$P_i + P_i^F = V_i \sum_{k=1}^n V_j [G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)] \quad (\text{II. 11})$$

Et les puissances réactives injectées aux nœuds PQ valent :

$$Q_i + Q_i^F = -V_i \sum_{k=1}^n V_j [G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)] \quad (\text{II. 12})$$

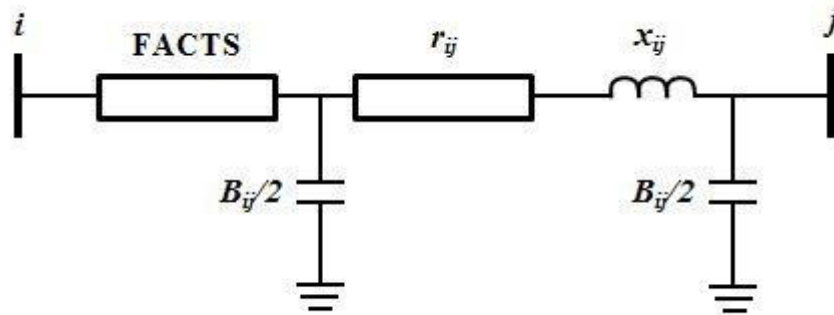
Avec:

$n$  : nombre de nœuds du système.

Les valeurs des injections  $P_i^F$  et  $Q_i^F$  sont calculées après chaque itération, mais ne sont pas utilisées dans le calcul de la matrice Jacobienne.

### II.3.7.2. Modification de la matrice d'admittance nodale [15]

Les FACTS sont envisagés comme des éléments venant modifier directement la matrice d'admittance nodale du réseau. Ils sont insérés dans la ligne selon la représentation de la figure (II.14). Selon le type de FACTS modélisé, le dispositif peut être placé au milieu ou à une extrémité de la ligne.



**Figure II.14 :** Intégration d'un dispositif FACTS dans une ligne.

Les paramètres d'une ligne équivalente sont déterminés et substitués à ceux de la ligne sans FACTS dans la matrice d'admittance nodale. Cette dernière est modifiée de la manière suivante:

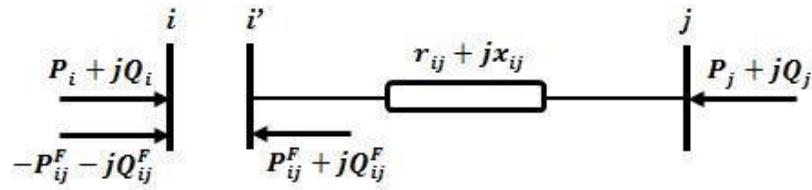
$$Y_{mod} = \begin{bmatrix} Y'_{ii} & Y'_{ij} \\ Y'_{ji} & Y'_{jj} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} Y_{ii} & Y_{ij} \\ Y_{ji} & Y_{jj} \end{bmatrix}}_{\text{Ligne}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} Y_{ii}^F & Y_{ij}^F \\ Y_{ji}^F & Y_{jj}^F \end{bmatrix}}_{\text{FACTS}} \quad (\text{II. 13})$$

Selon le type de FACTS et sa position dans la ligne, seule une partie des coefficients de la matrice Y subissent des modifications.

Différentes méthodes sont possibles pour traiter les valeurs des dispositifs. Elles peuvent être utilisées comme grandeurs d'entrées dans un load flow classique ou alors comme variables à optimiser dans un calcul optimal de répartition des puissances.

### II.3.7.3. Création d'un nœud fictif [21]

Dans ce type de modélisation qui est basé sur la création d'un point fictif (figure II.15).



**Figure II.15 :** Connexion de FACTS avec l'injection de puissance aux deux extrémités.

Un nœud fictif  $i'$  dans lequel là où les puissances contrôlées sont injectées, est temporairement créé. Pour conserver le bilan de puissance, la puissance injectée dans le nœud  $i'$  est soustraite du nœud  $i$ . Le nouveau nœud est pris en compte dans le calcul de répartition des puissances en modifiant la structure de la matrice Jacobienne.

# Chapitre III

---

Écoulement de puissance et  
compensation de l'énergie  
réactive

---

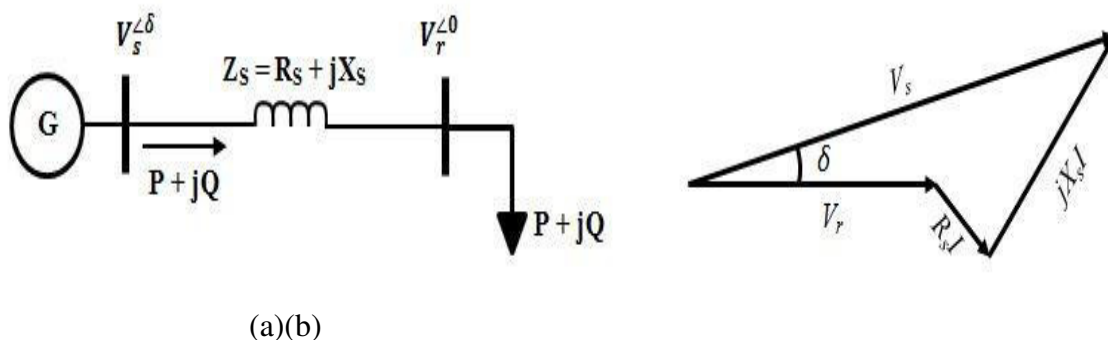
### III.1. Introduction

Les écoulements de puissances sont utilisés afin d'observer les tensions et puissances à chacune des barres et ceci à l'aide de simulations permettant d'en comparer les résultats avec les tensions et puissances obtenues en temps réel lorsqu'il y a des changements ou des ajustements dans le réseau (perte de lignes, changement brusque de charges, etc.). Ils sont donc utilisés pour voir la réaction d'un réseau électrique lorsque celui-ci est en régime stable et permanent. Ceci permettra alors de prévoir comment gérer des situations où les conditions dans celui-ci changent. Cette étude de réseau aide les ingénieurs à prévoir comment celui-ci réagira vis-à-vis différentes situations qu'ils pourraient affronter. Pour ce faire, il faut utiliser différents outils mathématiques permettant de calculer l'écoulement de puissance, et ce, dans toutes les situations possibles [27].

### III.2. Puissance transmise par une ligne électrique

L'énergie électrique est transportée par des lignes électriques de capacités limitées à cause des limites thermiques des câbles, des tensions appliquées aux bornes et de l'angle de charge. Les puissances transmises par une ligne électrique radiale sont données par les formules qui suivent [28]:

La figure (III.1) qui représente une ligne électrique alimentant une charge ( $P + jQ$ ) en admettant que la résistance de la ligne est très faible vis-à-vis sa réactance, l'impédance est donc:  $Z_s = jX_s$ .



**Figure III.1 :** Ligne électrique alimentant une charge :

(a) Schéma monphasé d'une ligne de transport, (b) Diagramme des tensions.



En prenant la tension aux bornes de la charge  $V_r$  comme référence des phases (figure III.1.(b)) et en négligeant la résistance  $R_s$ , le courant sera en phase avec  $V_r$ . La puissance demandée par la charge sera donnée par les équations qui suivent :

$$S_t = P + jQ = V_r I_r^* \quad (\text{III. 1})$$

Avec :

$$I_r = \frac{V_s - V_r}{Z_s} \quad (\text{III. 2})$$

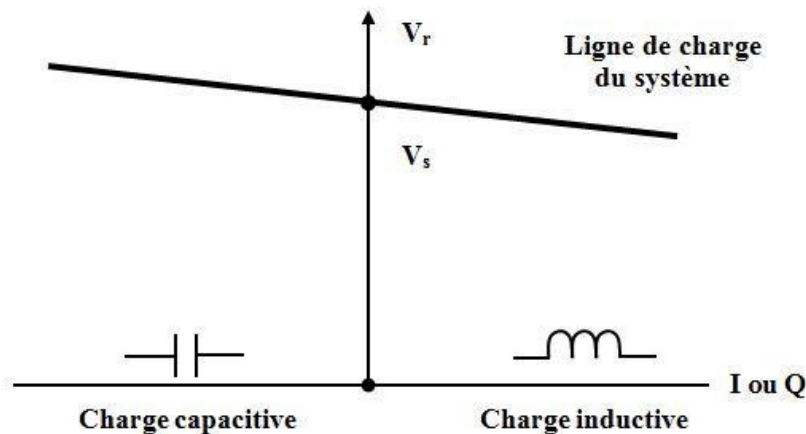
$$P = \frac{V_s V_r}{X_s} \sin(\delta) \quad (\text{III. 3})$$

$$Q = \frac{V_s V_r}{X_s} \cos(\delta) - \frac{V_r^2}{X_s} \quad (\text{III. 4})$$

$$V_r = V_s \cos(\delta) \quad (\text{III. 5})$$

La relation entre la tension au jeu de barre de charge et le courant de charge  $I$  est décrite par la droite de la figure (III.2), appelée ligne de charge du système qui est définie par l'équation d'une droite qui passe par  $V_s$  et de pente  $-Z_s$  :

$$V_s - V_r = Z_s * I \Rightarrow V_r = -Z_s * I + V_s \quad (\text{III. 6})$$



**Figure III.2 :** Ligne de charge du système.

On peut démontrer facilement le besoin du maintien de la tension aux bornes de la charge pour permettre un maximum de puissance à transmettre:

Si la charge varie et aucune précaution n'est prise pour maintenir la tension  $V_r$  égale à  $V_s$  alors depuis le diagramme de phase de la figure (III.1(b)) :

$$V_r = V_s \cos(\delta) \tag{III. 7}$$

En remplaçant dans l'équation (III.3), on aura :

$$P = \frac{V_s^2}{X_s} \sin(\delta) \cos(\delta) = \frac{V_s^2}{2X_s} \sin(2\delta) \tag{III. 8}$$

Dans ce cas on ne peut transporter qu'une puissance maximale pour un angle  $\delta = 45^\circ$  égale à :

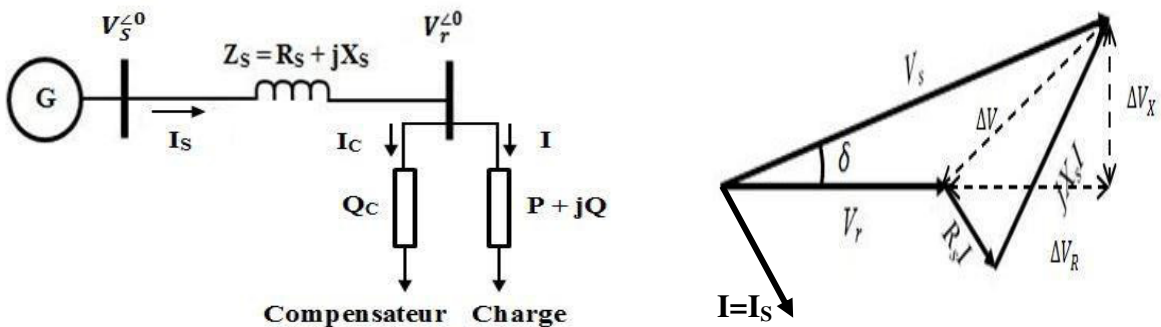
$$P_{max} = \frac{V_s^2}{2X_s}$$

Dans le cas où on maintient la tension  $V_r$  égale à  $V_s$  on peut avoir, depuis l'équation (III.3), une puissance maximale:

$$P_{max} = \frac{V_s^2}{X_s}$$

### III.3. Chute de tension et compensation réactive

En considérant la ligne électrique de la figure (III.3) sans tenir en compte le compensateur, la représentation du diagramme des tensions est donnée sur la figure (III.3.(b)). Lorsque la charge appelle un courant  $I$  à partir de la source  $V_s$ , la tension  $V_r$  chute au-dessous de la valeur  $V_s$  [25].



a) Circuit équivalent d'une ligne avec charge et compensateur.

b) Diagramme des tensions sans compensation.

Figure III.3 : Ligne électrique avec compensateur shunt.

La chute de tension  $\Delta V$ , à partir du schéma équivalent et du diagramme des tensions de la figure (III.3.(b)) est donnée par la formulation qui suit:

$$\Delta V = V_s - V_r = Z_s * I \quad (\text{III. 9})$$

Avec :

$I$  : le courant de charge qui est donné en fonction des puissances  $P$  et  $Q$  de la charge par l'équation :

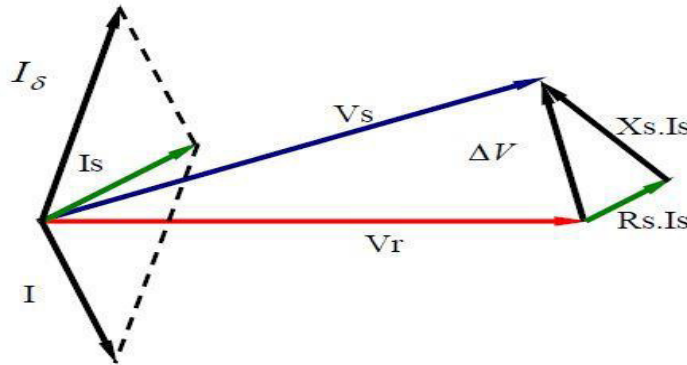
$$I = \frac{P - jQ}{V_r} \quad (\text{III. 10})$$

En tenant la tension  $V_r$  comme référence des phases, donc  $\overline{V_r} = V_r + j0$ , on peut écrire alors:

$$\Delta V = (R_s + jX_s) \frac{P - jQ}{V_r} = \frac{R_s P + X_s Q}{V_r} + \frac{X_s P - R_s Q}{V_r} j = \Delta V_R + j\Delta V_X \quad (\text{III. 11})$$

La chute de tension possède donc deux composantes  $\Delta V_R$  en phase avec la tension  $V_r$  et une composante  $\Delta V_X$  en quadrature avec  $V_r$ . D'après l'équation (III.11), la chute  $\Delta V$  dépend de la puissance active et réactive de la charge.

En connectant un compensateur de puissance réactive en parallèle avec la charge, il sera possible de maintenir la tension  $V_r$  égale en module à la tension  $V_s$ . La puissance réactive totale connectée au jeu de barre de charge sera remplacée par  $Q_s = Q + Q_\delta$ , où  $Q_\delta$  est la puissance réactive injectée par le compensateur et qui sera ajustée pour faire tourner le vecteur  $\Delta V$  jusqu'à ce que la tension  $|V_r|$  sera égale à la tension  $|V_s|$  comme le montre la figure (III.4) [25].



**Figure III.4 :** Diagramme des tensions pour une ligne compensée (Tension constante).

A partir des équations (III.9) et (III.11) nous avons:

$$|V_S|^2 = \left[ V_r + \frac{R_s \cdot P + X_s \cdot Q}{V_r} \right]^2 + \left[ \frac{X_s \cdot P - R_s \cdot Q}{V_r} \right]^2 \quad (\text{III.12})$$

La valeur de  $Q_\delta$  nécessaire pour maintenir la tension  $V_r$  constante est obtenue en résolvant l'équation (III.12) pour  $Q_\delta = Q_S$  en considérant  $V_r = |V_S|$ , puis  $Q_\delta = Q_S - Q$ . Pratiquement cette valeur est obtenue automatiquement par une boucle de contrôle fermée de  $V_r = V_{ref} = V_S$  [25].

### III.4. Problème de l'écoulement de puissance

Le calcul de répartition des puissances (écoulement des puissances ou load flow ou encore power flow) consiste à déterminer l'ensemble des transits de puissances et des tensions dans le réseau pour un cas de charge donné. Quatre grandeurs sont associées à chaque nœud du système : les puissances active et réactive ainsi que le module et la phase de la tension. Seules deux de ces quatre variables sont connues en un nœud, les deux autres étant déterminées lors du calcul.

L'objectif est de déterminer les tensions complexes des jeux de barres à partir desquelles toutes les autres grandeurs telles que les courants dans les lignes de transports, les puissances et les pertes de puissances peuvent être dérivées. Pour un réseau électrique avec N jeux de barres, les équations des tensions nodales du système sont exprimées par la relation matricielle :

$$I_{bus} = Y_{bus} \cdot U_{bus} \quad (\text{II.13})$$

Où : I est le vecteur  $N \times 1$  des courants complexes injectés à chaque jeu de barres et U est le vecteur  $N \times 1$  des tensions complexes de chaque jeu de barres .Y est une matrice  $N \times N$  , elle contient toutes les informations concernant les lignes, les transformateurs et les condensateurs.

Le courant  $I_i$  s'écrit :

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} U_j = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| V_j e^{j(\theta_j + \delta_{ij})} \quad (\text{II.14})$$

La puissance injectée dans le système au jeu de barre  $i$  est donnée par :

$$S_i = U_i I_i^* \quad (\text{III. 15})$$

Cette dernière équation nous montre que les puissances actives et réactives transmises à un jeu de barre quelconque sont en fonction de module et de l'argument des tensions aux niveaux des autres jeux de barres du système en utilisant cette équation on peut écrire la puissance active et réactive injectée dans un jeu de barre  $i$  sous la forme suivant:

$$P_i = P_{Gi} - P_{Di} = \sum_{j=1}^n V_i V_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (\text{III. 16})$$

$$Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di} = \sum_{j=1}^n V_i V_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (\text{III. 17})$$

Avec :

$\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$  : est la différence angulaire entre les jeux de barres  $i$  et  $j$ ,  $\theta_i$  et  $\theta_j$  sont les angles de tension des jeux de barres  $i$  et  $j$ .

$g_{ij}$  et  $b_{ij}$  sont respectivement la partie réelle de l'admittance (conductance) et la partie imaginaire (la susceptance) de la ligne de transmission.

À cause de non linéarité des équations de l'écoulement de puissance, il est très difficile d'avoir des solutions analytiques. Pour cette raison, plusieurs méthodes numériques ont été proposées pour résoudre le problème de l'écoulement de puissance, parmi lesquelles on va discuter les méthodes de Gauss-Seidel et Newton-Raphson [29].

## III.5. Résolution numériques de problème d'écoulement de puissance

### III.5.1. Méthode de Gauss-Seidel

La méthode de GAUSS-SEIDEL est l'une des plus simples méthodes itératives utilisées pour la résolution du problème de l'écoulement de puissance ou généralement pour la résolution d'un ensemble très large d'équations algébriques non linéaires. Cette méthode consiste à enlever séquentiellement chaque nœud et actualiser sa tension en fonction des valeurs disponibles de toutes les tensions des autres nœuds. Pour le cas de l'étude de

l'écoulement de puissance, les solutions recherchées sont déduites de la résolution de l'équation nodale suivante [30]:

$$I_i = Y_{i1}V_1 + Y_{i2}V_2 + \dots + Y_{in}V_n = \sum_{m=1}^n Y_{im}V_m \quad (\text{III. 18})$$

En général, on calcule le vecteur  $V$  qui satisfait le système non linéaire et qui est donné par :

$$V_i^{(k+1)} = \frac{1}{Y_{ii}} \left[ \frac{P_i - jQ_i}{(V_i^*)^k} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq m}}^n Y_{im}V_m^{(k)} \right] \quad (\text{III. 19})$$

La convergence du système est atteinte lorsque la condition suivante est satisfaite : ( $10^{-3}$ )

$$\max |V^{k+1} - V^k| \leq \varepsilon \quad (\text{III. 20})$$

Les puissances actives et réactives, peuvent être calculées à partir des deux expressions (III.21) et (III.22) respectivement.

$$P_i^{(k+1)} = \Re e \left[ V_i^{*(k)} \left[ V_i^{(k)} Y_{ii} - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq m}}^n Y_{im} V_m^{(k)} \right] \right] \quad (\text{III. 21})$$

$$Q_i^{(k+1)} = -\Im m \left[ V_i^{*(k)} \left[ V_i^{(k)} Y_{ii} - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq m}}^n Y_{im} V_m^{(k)} \right] \right] \quad (\text{III. 22})$$

Le critère d'arrêt est choisi par rapport aux puissances actives et réactives :

$$\max |P^{k+1} - P^k| \leq \varepsilon \quad (\text{III. 23})$$

$$\max |Q^{k+1} - Q^k| \leq \varepsilon \quad (\text{III. 24})$$

### III.5.2. Méthode de Gauss Seidel avec accélération

Dans le but de réduire le nombre des itérations pour atteindre la convergence, nous pouvons utiliser la méthode de Gauss-Seidel avec accélération qui utilise le même processus

que celle de Gauss-Seidel classique ; la valeur calculée sera accélérée avant d'être introduite dans le calcul de la prochaine itération.

La valeur accélérée est calculée à partir de l'expression suivante :

$$V_i^{(k+1)} = V_i^{(k)} + \alpha \cdot \Delta V_i^{(k+1)} \quad (\text{III.25})$$

$\Delta V_i^{(k+1)}$  : est calculé après chaque itération en utilisant l'expression suivante :

$$\Delta V_i^{(k+1)} = V_i^{(k+1)} - V_i^{(k)} \quad (\text{III.26})$$

Les calculs s'arrêtent lorsque la condition suivante est vérifiée :

$$|\Delta V_i^{(k+1)}| \leq \varepsilon \quad (\text{III.27})$$

Le coefficient  $\alpha$  est dit « coefficient d'accélération de convergence ».

En pratique, chaque réseau possède son propre coefficient d'accélération optimal, Il est généralement compris entre 1.4 et 1.8 [31].

### III.5.3. Méthode de Newton-Raphson [30]

Cette méthode permet de réduire fortement le temps de calcul de l'écoulement de puissance surtout pour les grands réseaux. Par contre, elle nécessite une très grande mémoire de stockage car elle nécessite plus de calculs mathématiques et en conséquence plus de temps par itération que celle de Gauss-Seidel, alors qu'elle converge plus rapidement (moins d'itérations) même pour les grands réseaux.

Les puissances actives et réactives en chaque nœud  $i$  du réseau peuvent être exprimés par (III.28) :

$$\left. \begin{aligned} P_i &= \sum_{m=1}^n |V_i||V_m||Y_{im}| \cos(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}) \\ Q_i &= - \sum_{m=1}^n |V_i||V_m||Y_{im}| \sin(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}) \end{aligned} \right\} i = 1, 2, \dots, n \quad (\text{III.28})$$

Avec :

$n$  : Nombre de nœuds.

$i$  : Numéro du nœud.

$i = 1$ : Généralement considéré comme nœud de référence.

Après développement de  $P_i$  et  $Q_i$  en série de TAYLOR autour de la première approximation :

$$\left. \begin{aligned} P_i &= P_i^{(0)} + \left(\frac{\partial P_i}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} \Delta\delta_2^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial P_i}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} \Delta\delta_n^{(0)} + \left(\frac{\partial P_i}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} \Delta|V_2|^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial P_i}{\partial |V_n|}\right)^{(0)} \Delta|V_n|^{(0)} \\ Q_i &= Q_i^{(0)} + \left(\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} \Delta\delta_2^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} \Delta\delta_n^{(0)} + \left(\frac{\partial Q_i}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} \Delta|V_2|^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial Q_i}{\partial |V_n|}\right)^{(0)} \Delta|V_n|^{(0)} \end{aligned} \right\} \text{(III. 29)}$$

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

Avec :

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_i^{(0)} &= P_i - P_i^{(0)} \\ \Delta Q_i^{(0)} &= Q_i - Q_i^{(0)} \end{aligned} \right\} \text{(III. 30)}$$

Les deux systèmes d'équation (III.29) et (III.30) donnent :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(0)} \\ \Delta Q_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\Delta P_2}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\Delta P_2}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} & \left(\frac{\Delta P_2}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\Delta P_2}{\partial |V_n|}\right)^{(0)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\Delta P_n}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\Delta P_n}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} & \left(\frac{\Delta P_n}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\Delta P_n}{\partial |V_n|}\right)^{(0)} \\ \left(\frac{\Delta Q_2}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\Delta Q_2}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} & \left(\frac{\Delta Q_2}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\Delta Q_2}{\partial |V_n|}\right)^{(0)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\Delta Q_n}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\Delta Q_n}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} & \left(\frac{\Delta Q_n}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\Delta Q_n}{\partial |V_n|}\right)^{(0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta\delta_n^{(0)} \\ \Delta|V_2|^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta|V_n|^{(0)} \end{bmatrix} \text{(III. 31)}$$

Donc on peut écrire le système comme suite :

$$\begin{bmatrix} \Delta P^{(0)} \\ \Delta Q^{(0)} \end{bmatrix} = [J^{(0)}] \begin{bmatrix} \Delta\delta^{(0)} \\ \Delta|V|^{(0)} \end{bmatrix} \text{(III. 32)}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta^{(0)} \\ \Delta|V|^{(0)} \end{bmatrix} = [J^{(0)}]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P^{(0)} \\ \Delta Q^{(0)} \end{bmatrix} \text{(III. 33)}$$



On rappelle que :

$$\Delta\delta^{(k)} = \delta_i^{(k+1)} - \delta_i^{(k)} \quad (\text{III. 34})$$

$$\Delta|V_i|^{(k)} = |V_i|^{(k+1)} - |V_i|^{(k)} \quad (\text{III. 35})$$

L'adaptation (III.33) avec (III.35) donne :

$$\begin{bmatrix} \delta_i^{(k+1)} \\ |V|^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_i^{(k)} \\ |V|^{(k)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta|V| \end{bmatrix} \quad (\text{III. 36})$$

$$\begin{bmatrix} \delta_i^{(k+1)} \\ |V|^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_i^{(k)} \\ |V|^{(k)} \end{bmatrix} + [J^{(k)}]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P^{(k)} \\ \Delta Q^{(k)} \end{bmatrix} \quad (\text{III. 37})$$

En remplaçant l'expression de l'équation (III.33) dans l'équation ci-dessus on aura :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta|V| \end{bmatrix} \quad (\text{III. 38})$$

Avec :

$$J = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \quad (\text{III. 39})$$

$J_1, J_2, J_3$  et  $J_4$  : sont les sous-matrices du Jacobien.

#### • Détermination des sous-matrices du Jacobien $J_i$

A partir du système (III.28), on peut déterminer les éléments de  $J$ .

**Sous matrice  $J_1$  :**

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -|Y_{im}||V_i||V_m| \sin(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}), \quad i \neq m \quad (\text{III. 40})$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{\substack{m=1 \\ i \neq m}}^n |Y_{im}||V_i||V_m| \sin(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}), \quad i = m \quad (\text{III. 41})$$

**Sous matrice  $J_2$  :**

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = |Y_{im}||V_m| \cos(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}), \quad i \neq m \quad (\text{III. 42})$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|Y_{im}||V_m| \cos(\theta_{im}) + \sum_{\substack{m=1 \\ i \neq m}}^n |Y_{im}||V_m| \cos(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}), \quad i = m \quad (\text{III.43})$$

**Sous matrice  $J_3$  :**

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = -|Y_{im}||V_i||V_m| \sin(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}), \quad i \neq m \quad (\text{III.44})$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{\substack{m=1 \\ i \neq m}}^n |Y_{im}||V_i||V_m| \sin(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}), \quad i = m \quad (\text{III.45})$$

**Sous matrice  $J_4$  :**

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = -|V_{im}||V_m| \sin(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}), \quad i \neq m \quad (\text{III.46})$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = - \sum_{\substack{m=1 \\ i \neq m}}^n |Y_{im}||V_m| \sin(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}) - 2|Y_{im}||V_i| \sin(\theta_{im}), \quad i = m \quad (\text{III.47})$$

- **Les étapes de calcul**

- 1- A partir des données du système, on prend la matrice d'admittance bus  $Y_{bus}$ .
- 2- On estime les valeurs initiales  $|V_i|^{(0)}$  et  $\delta_i^{(0)}$  pour les nœuds de charge et  $\delta_i^{(0)}$  pour les nœuds de contrôle.
- 3- On calcule  $P_i$  et  $Q_i$  qui nous donnent  $\Delta P$  et  $\Delta Q$ .
- 4- Formation de la matrice Jacobienne  $J$ .
- 5- On trouve l'inverse de la Jacobienne.
- 6- On calcule :

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (\text{III.48})$$

On obtient :

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i^{(k)} \quad (\text{III.49})$$

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + |\Delta V_i^{(k)}| \quad (\text{III.50})$$

7- Le processus se répète jusqu'à ce que la tolérance suivante se vérifie :

$$\max |\Delta P_i^{(k)}| \leq \varepsilon \quad (\text{III. 51})$$

$$\max |\Delta Q_i^{(k)}| \leq \varepsilon \quad (\text{III. 52})$$

8- On prend les résultats obtenus.

# Chapitre IV

---

## Validation et quelques applications

---

## IV.1. Introduction

Cette étude nous permettra à partir des données topologiques du réseau (nœuds, lignes et impédances des lignes), des données des charges (puissance active et réactives) et des données des générateurs (puissance actives, tensions et limites en puissance réactives) d'avoir le module et la phase de la tension en chaque nœud, les pertes et les transits de puissance actives et réactives dans chaque ligne. Plusieurs algorithmes ont été testés pour calculer la répartition de charge dans le réseau, dans ce chapitre nos calculs d'écoulement de puissance sont basés sur la méthode de Newton-Raphson du fait que c'est une méthode rapide à un nombre d'itérations réduit par rapport à la méthode de Gauss-Seidel. Cette méthode sera testée sur un réseau IEEE standard à 05, 09, 14 et 30 nœuds.

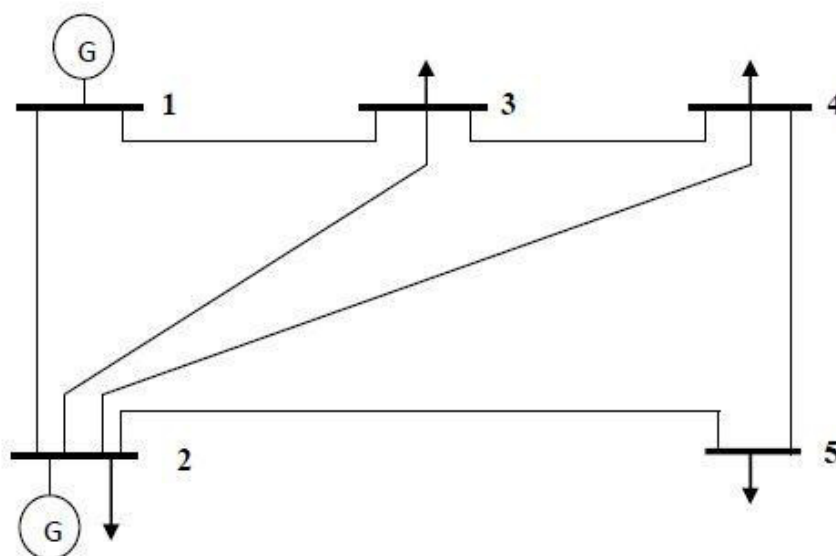
## IV.2. Validation

### IV.2.1. Réseau test IEEE à 05 nœuds

Un simple réseau électrique test à 05 nœuds (bus) est utilisé (figure IV.1). Ce réseau test est constitué de :

- 02 générateurs,
- 07 lignes électriques,
- 04 charges.

Sachant que le nœud 01 est pris comme nœud de référence et que tous les angles de phase ont une valeur initiale de  $0,0^\circ$ .



**Figure IV.1 :** Topologie du réseau IEEE standard à 05 nœuds.

La puissance et la tension de base utilisées valent respectivement 100 MVA et 330 kV. Les données de production et de consommation ainsi que les caractéristiques des lignes sont indiquées sur le tableau (IV.1) et le tableau (IV.2) respectivement.

**Tableau IV.1 :** Données de production et de consommation  
du réseau IEEE standard à 05 nœuds.

Nœud	Type	Tension (pu)	Puissances générées		Puissances consommées	
			$P_{Gi}$ (MW)	$Q_{Gi}$ (MVar)	$P_{Li}$ (MW)	$Q_{Li}$ (MVar)
1	Slack	1,06	0,00	0,00	0,00	0,00
2	PV	1,00	40,0	0,00	20,0	10,0
3	PQ	1,00	0,00	0,00	45,0	25,0
4	PQ	1,00	0,00	0,00	40,0	65,0
5	PQ	1,00	0,00	0,00	60,0	10,0

**Tableau IV.2 :** Données des lignes de transport du réseau IEEE 05 nœuds.

Lignes						
Nœud de départ	Nœud d'arrivée	R (pu)	X (pu)	B/2 (pu)	X'mer Tap « a »	
1	2	0,0200	0,0600	0,0600	1	
1	3	0,0800	0,2400	0,0500	1	
2	3	0,0600	0,1800	0,0400	1	
2	4	0,0600	0,1800	0,0400	1	
2	5	0,0400	0,1200	0,0300	1	
3	4	0,0100	0,0300	0,0200	1	
4	5	0,0800	0,2400	0,0500	1	

La topologie du réseau IEEE standard à 05 nœuds à étudier vue sous le logiciel PSAT est présentée sur la figure (IV.2) comme suite :

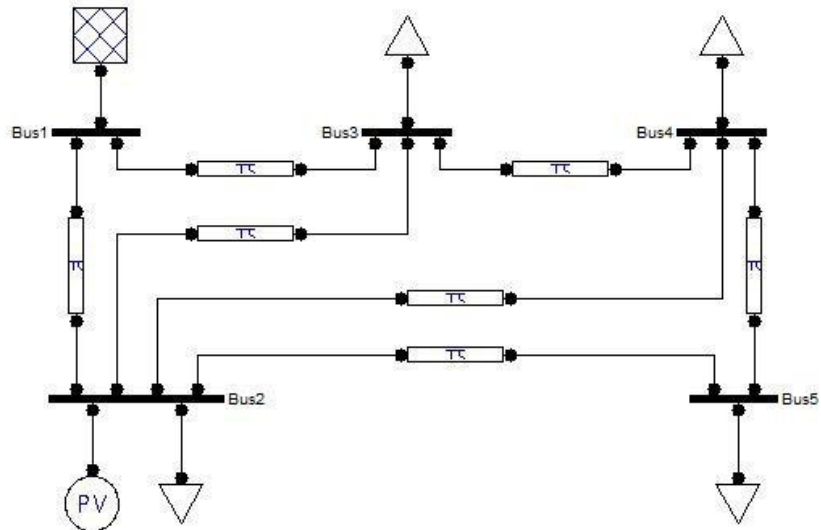


Figure IV.2 :Vue du réseau IEEE à 05 nœuds sous le logiciel PSAT.

### IV.2.1.1. Résultats du calcul de l'écoulement de puissance

Les résultats de l'écoulement de puissance par la méthode de Newton-Raphson sont présentés dans le tableau (IV.3).

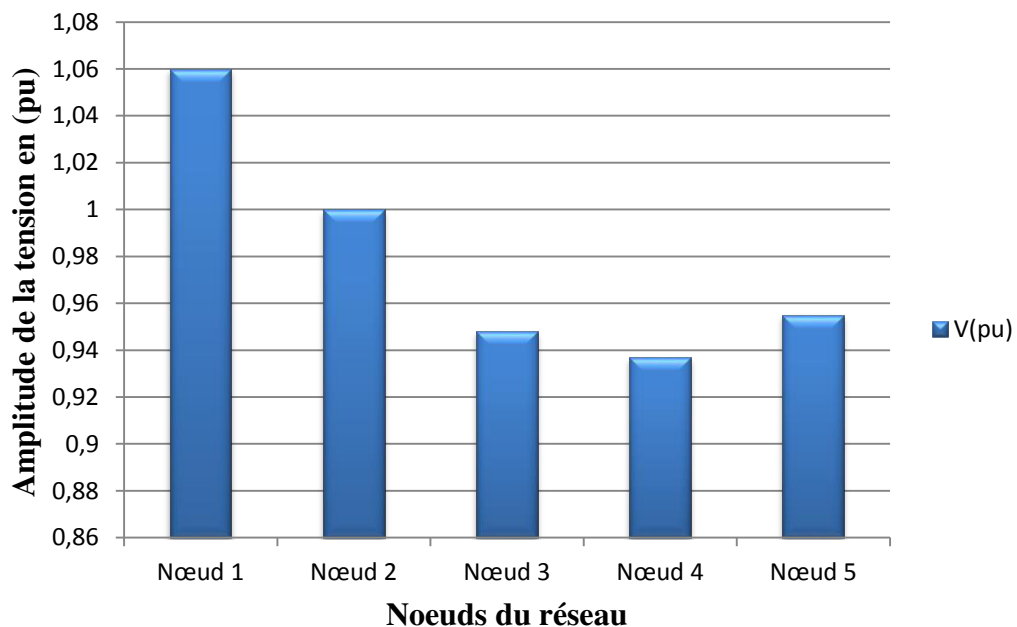
Tableau IV.3.a : Résultats de l'écoulement de puissance dans un réseau IEEE standard à 05 nœuds : Résultats de nos calculs.

Méthode de Newton-Raphson après 03 itérations						
N° Nœud	Tension		Générateur		Charge	
	Amplitude (pu)	Phase (degré)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
01	1,060	0,000	132,834	107,039	0,000	0,000
02	1,000	-2,118	40,000	-1,653	20,00	10,00
03	0,948	-4,076	0,000	0,000	45,00	25,00
04	0,937	-4,259	0,000	0,000	40,00	65,00
05	0,955	-5,638	0,000	0,000	60,00	10,00
		<b>Total</b>	172,834	105,386	165,000	110,000

**Tableau IV.3.b** : Résultats de l'écoulement de puissance dans un réseau IEEE standard à 05 nœuds : Résultats publiés [3].

Nœuds	Tension (pu)	Angle (°)	$P_G$ (MW)	$Q_G$ (MVar)	$P_D$ (MW)	$Q_D$ (MVar)
1	1.060	0.000*	132.83	107.04	0	0
2	1.000	-2.119	40.00	-1.65	20.00	10.00
3	0.949	-4.077	0	0	45.00	25.00
4	0.938	-4.260	0	0	40.00	65.00
5	0.956	-5.639	0	0	60.00	10.00
PL (MW)	7.8342					

Nous remarquons une très bonne concordance entre nos résultats de simulation en utilisant le PSAT et les résultats déjà publiés [3], cela confirme la validité de nos simulations.



**Figure IV.3** : Amplitude des tensions dans chaque nœud du réseau.

#### IV.2.1.2. Résultats du transit de puissance dans les lignes

Le tableau (IV.4) qui suit, résume le transit de puissance sur l'ensemble des différentes lignes du réseau IEEE à 05 nœuds.



**Tableau IV.4** : Résultats du transit de puissance dans les lignes.

Méthode de Newton-Raphson									
Du nœud	Au nœud	P (MW)	Q (Mvar)	Du nœud	Au nœud	P (MW)	Q (Mvar)	Pertes (ligne)	
								(MW)	(Mvar)
1	2	90,943	73,522	2	1	-88,418	-72,319	2,524	1,203
1	3	41,890	33,516	3	1	-39,702	-32,008	2,188	1,508
2	3	24,873	18,607	3	2	-24,347	-20,528	0,626	-1,912
2	4	28,030	23,714	4	2	-27,162	-24,867	0,868	-1,153
2	5	55,514	18,344	5	2	-54,124	-17,044	1,390	1,300
3	4	18,949	27,536	4	3	-18,819	-28,926	0,129	-1,389
4	5	5,981	-11,206	5	4	-5,875	7,044	0,106	-4,162
<b>Total</b>								7,831	-4,605

## IV.2.2. Réseau test IEEE à 09 nœuds

### IV.2.2.1. Description du réseau à étudier

Un simple réseau électrique test à 09 nœuds est utilisé (figure IV.4). Ce réseau test est constitué de :

- 03 générateurs,
- 11 lignes électriques,
- 08 charges.

Sachant que le nœud 01 est pris comme nœud de référence et que tous les angles de phase ont une valeur initiale de  $0,0^\circ$ . La puissance et la tension de base utilisées valent respectivement 100 MVA et 69 kV. Les données des générateurs et des charges ainsi que les caractéristiques des lignes sont indiquées dans les tableaux (IV.5) et (IV.6).

**Tableau IV.5** : Données de production et de consommation du réseau

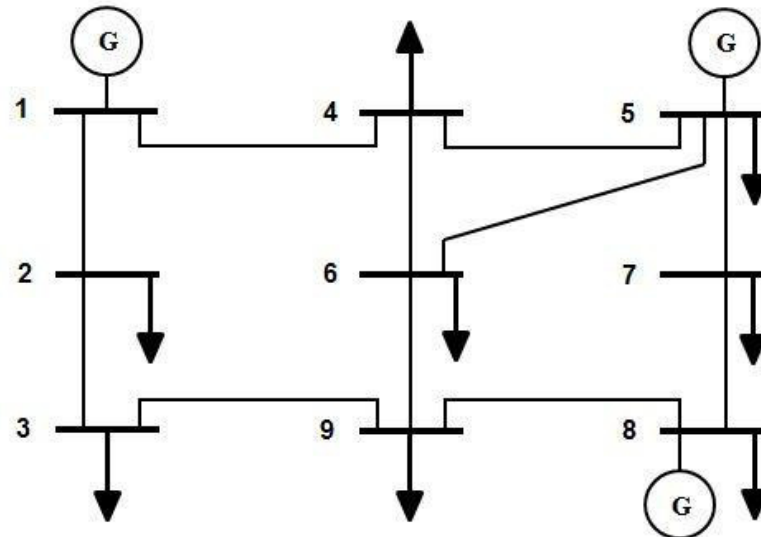
IEEE standard à 09 nœuds.

Nœud	Type	Tension (pu)	Puissances générées		Puissances consommées	
			$P_{Gi}$ (MW)	$Q_{Gi}$ (Mvar)	$P_{Li}$ (MW)	$Q_{Li}$ (Mvar)
1	Slack	1,03	0,00	0,00	0,00	0,00
2	PQ	1,00	0,00	0,00	10,0	5,0
3	PQ	1,00	0,00	0,00	25,0	15,0

4	PQ	1,00	0,00	0,00	60,0	40,0
5	PV	1,06	80,0	0,00	10,0	5,0
6	PQ	1,00	0,00	0,00	100,0	80,0
7	PQ	1,00	0,00	0,00	80,0	60,0
8	PV	1,01	120,0	0,00	40,0	20,0
9	PQ	1,00	0,00	0,00	20,0	10,0

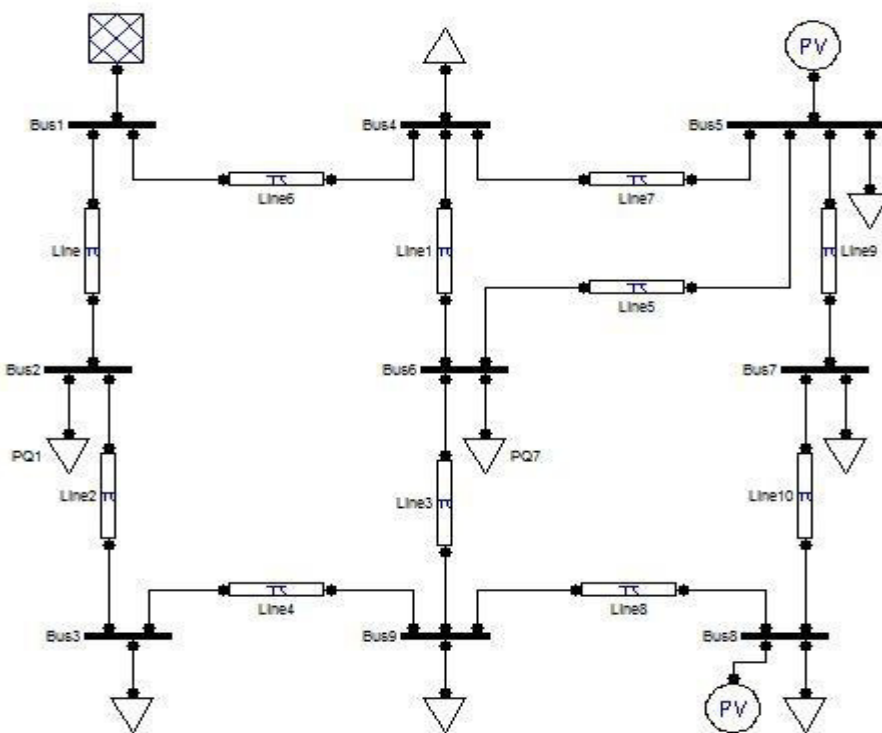
**Tableau IV.6 :** Données des lignes de transport du réseau IEEE standard à 09 nœuds.

Lignes					
Nœud de départ	Nœud d'arrivée	R (pu)	X (pu)	B/2 (pu)	X'mer Tap « a »
1	2	0,0180	0,0540	0,0045	1
1	4	0,0150	0,0450	0,0038	1
2	3	0,0180	0,0560	0	1
3	9	0,0200	0,0600	0	1
4	5	0,0130	0,0360	0,0030	1
4	6	0,0200	0,0660	0	1
5	6	0,0600	0,0300	0,0028	1
5	7	0,0140	0,0360	0,0030	1
6	9	0,0100	0,0500	0	1
7	8	0,0320	0,0760	0	1
8	9	0,0220	0,0650	0	1



**Figure IV.4 :** Topologie du réseau IEEE standard à 09 nœuds.

La topologie du réseau IEEE standard à 09 nœuds à étudier sous le logiciel PSAT est présentée sur la figure (IV.5) comme suite :



**Figure IV.5 :** Vue du réseau IEEE 09 nœuds sur le logiciel PSAT.

#### IV.2.2.2. Résultats du calcul de l'écoulement de puissance

Les résultats de l'écoulement de puissance par la méthode de Newton-Raphson sont portés dans le tableau (IV.7(a et b)).

**Tableau IV.7.a** : Résultats de l'écoulement de puissance dans un réseau

IEEE à 09 nœuds : Résultats de nos calculs.

Méthode de Newton-Raphson après 03 itérations						
N° Nœud	Tension		Générateur		Charge	
	Amplitude (pu)	Phase (degré)	P (MW)	Q (Mvar)	P (MW)	Q (Mvar)
01	1,030	0,000	156,484	-11,633	0,000	0,000
02	1,013	-1,182	0,000	0,000	10,00	50,00
03	1,000	-2,180	0,000	0,000	25,00	15,00
04	1,027	-2,929	0,000	0,000	60,00	40,00
05	1,060	-4,230	80,000	275,433	10,00	5,00
06	1,004	-3,235	0,000	0,000	100,0	80,00
07	1,021	-4,131	0,000	0,000	80,00	60,00
08	1,010	-1,464	120,00	-10,711	40,00	20,00
09	1,001	-2,571	0,000	0,000	20,00	10,00
<b>Total</b>			356,484	253,089	345,000	280,000

**Tableau IV.7.b** : Résultats de l'écoulement de puissance dans le réseau

IEEE standard à 09 nœuds : Résultats publié [29].

Méthode de Newton-Raphson après 3 itérations						
N° Nœuds	Tension		Charge		Générateur	
	Amplitude (pu)	Phase (degré)	P (MW)	Q(Mvar)	P (MW)	Q(Mvar)
1	1.030	0.000	0.000	0.000	156.287	-10.844
2	1.013	-1.171	10.000	5.000	0.000	0.000
3	1.000	-2.157	25.000	15.000	0.000	0.000
4	1.027	-2.929	60.000	40.000	0.000	0.000
5	1.060	-4.157	10.000	5.000	80.000	274.326
6	1.004	-3.198	100.000	80.000	0.000	0.000
7	1.022	-4.065	80.000	60.000	0.000	0.000
8	1.010	-1.416	40.000	20.000	120.000	-10.455
9	1.001	-2.535	20.000	10.000	0.000	0.000
<b>Total</b>			345.000	235.000	356.287	253.027

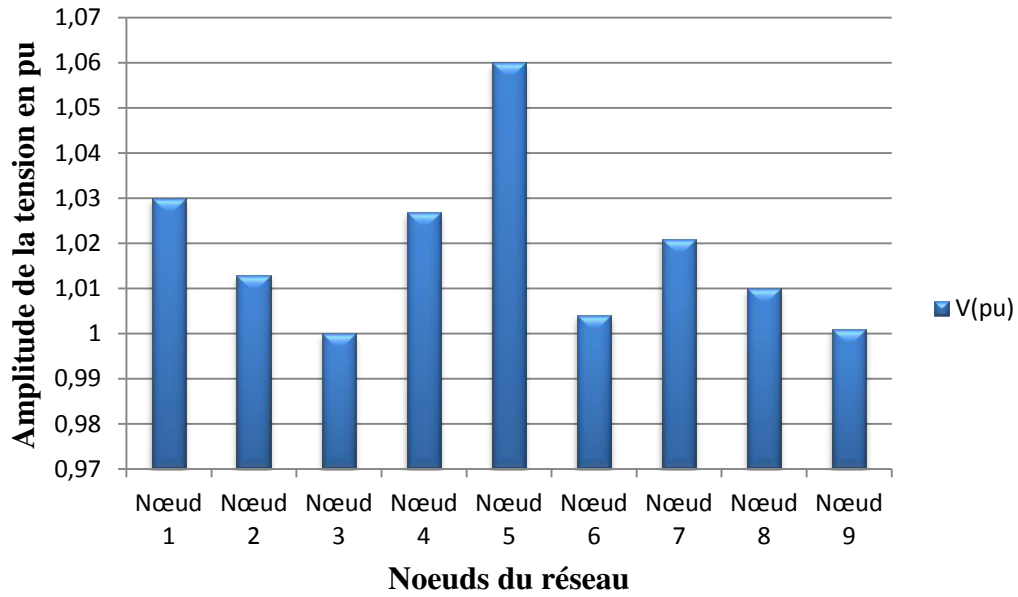


Figure IV.6 : Amplitude des tensions dans chaque nœud du réseau.

### IV.2.2.3. Résultats du transit de puissance dans les lignes

Le tableau (IV.8.a) suivant, résume le transit de puissance sur l'ensemble des différentes lignes du réseau IEEE à 09 nœuds. Sachant que nos résultats sont obtenus en utilisant la méthode de Newton-Raphson tandis que la méthode de Gauss-Seidel a été utilisée pour les résultats publiés [30].

Tableau IV.8.a : Résultats du transit de puissance dans les lignes : Résultat de nos calculs.

Méthode de Newton-Raphson									
Du nœud	Au nœud	P (MW)	Q (Mvar)	Du nœud	Au nœud	P (MW)	Q (Mvar)	Pertes (ligne)	
								MW	Mvar
1	2	45,676	16,916	2	1	-47,271	-16,639	0,405	0,276
1	4	110,808	-28,549	4	1	-108,96	33,289	1,848	4,739
2	3	35,271	11,639	3	2	-35,029	-10,886	0,241	0,752
3	9	10,029	-4,113	9	3	-10,005	-4,183	0,023	0,070
4	5	31,397	-3,628	5	4	-29,962	106,950	1,435	3,321
4	6	17,562	30,338	6	4	-17,329	-29,570	0,232	0,768
5	7	33,788	99,901	7	5	-32,394	-96,966	1,394	2,934
6	5	-61,655	-61,919	5	6	66,173	63,581	4,518	1,662

6	9	-21,015	11,490	9	6	21,072	-11,206	0,056	0,284
7	8	-47,605	36,966	8	7	48,719	-34,320	1,114	2,645
9	8	-31,066	-2,977	8	9	31,280	3,608	0,213	0,631
							<b>Total</b>	11,479	18,082

**Tableau IV.8.b** : Résultats du transit de puissance dans les lignes : Résultats publiés [30].

Méthode de Gauss-Seidel									
Nœud de départ	Nœud d'arrêté	P		Q		P		Perte (ligne)	
		MW	Mvar	Nœud de départ	Nœud d'arrêté	Mvar	MW	MW	Mvar
1	2	45.368	17.138	2	1	-44.966	-16.872	0.402	0.266
1	4	110.963	-27.969	4	1	109.114	32.710	1.848	4.741
2	3	34.906	11.879	3	2	-34.668	-11.137	0.238	0.742
3	9	9.711	-3.943	9	3	-9.689	4.009	0.022	0.066
4	5	32.437	-103.322	5	4	-31.188	106.648	1.249	3.325
4	6	16.632	30.725	6	4	-16.401	-29.962	0.231	0.746
5	6	67.108	62.923	6	5	-62.568	-61.250	4.540	1.673
5	7	34.171	99.723	7	5	-32.778	-96.791	1.393	2.932
6	9	-21.053	11.145	9	6	21.109	-10.863	0.056	0.281
7	8	-47.260	36.815	7	8	-47.260	36.815	1.101	2.614
8	9	31.621	3.777	9	8	-31.402	-3.131	0.219	0.646
							<i>Total</i>	11.300	18.050

Nous remarquons une très bonne concordance entre nos résultats de simulation en utilisant le PSAT et les résultats déjà publiés [30], cela malgré le choix différent des méthodes numériques pour la résolution des équations de transit de puissance. Nous notons un nombre d'itérations relativement élevé pour la méthode de Gauss-Seidel.

### IV.3. Applications

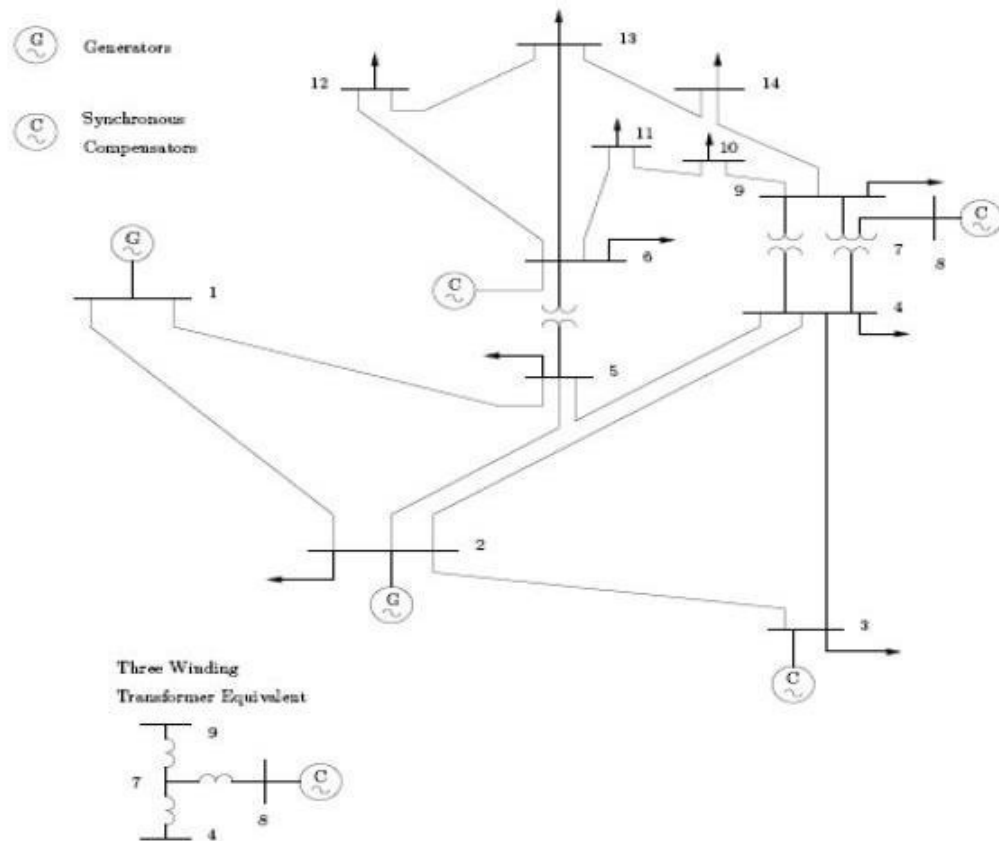
#### IV.3.1. Application sur le réseau IEEE standard à 14 nœuds

##### IV.3.1.1. Description du réseau à étudier

Dans cet exemple d'application, un réseau électrique IEEE standard à 14 nœuds [1] est utilisé (figure IV.7). Ce réseau est constitué de :

- 02 générateurs,
- 03 compensateurs synchrones,
- 20 lignes électriques,
- 11 charges.

Sachant que le nœud 01 est pris comme nœud de référence et que tous les angles de phase ont une valeur initiale de  $0,0^\circ$ .



**Figure IV.7 :** Schéma unifilaire du réseau IEEE standard à 14 nœuds.

La puissance et la tension de base utilisées valent respectivement 100 MVA et 69 kV. Les données des générateurs et des charges ainsi que les caractéristiques des lignes sont indiquées dans les tableaux (IV.9) et (IV.10).

**Tableau IV.9** : Données de production et de consommation du réseau

IEEE standard à 14 nœuds.

Nœud	Type	Tension (pu)	Puissances générées		Puissances consommées	
			P <sub>Gi</sub> (MW)	Q <sub>Gi</sub> (Mvar)	P <sub>Li</sub> (MW)	Q <sub>Li</sub> (Mvar)
1	Slack	1.060	0,00	0,00	0,00	0,00
2	PV	1.045	40,00	42,40	21,70	12,70
3	PV	1,010	0,00	23,40	94,20	19,00
4	PQ	1,00	0,00	0,00	47,80	-3,90
5	PQ	1,00	0,00	0,00	7,60	1,60
6	PV	1,070	0,00	12,20	11,20	7,50
7	PQ	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	PV	1,090	0,00	17,40	0,00	0,00
9	PQ	1,00	0,00	0,00	29,50	16,60
10	PQ	1,00	0,00	0,00	9,00	5,80
11	PQ	1,00	0,00	0,00	3,50	1,80
12	PQ	1,00	0,00	0,00	6,10	1,60
13	PQ	1,00	0,00	0,00	13,50	5,80
14	PQ	1,00	0,00	0,00	14,90	5,00

**Tableau IV.10** : Données des lignes de transport du réseau IEEE standard à 14 nœuds.

Lignes					
Nœud de départ	Nœud d'arrivée	R (pu)	X (pu)	B/2 (pu)	X'mer Tap « a »
1	2	0,01938	0,05917	0,0264	1
1	5	0,05403	0,22304	0,0246	1
2	3	0,04699	0,19797	0,0219	1
2	4	0,05811	0,17632	0,0170	1
2	5	0,06595	0,17388	0,0173	1
3	4	0,06701	0,17103	0,0064	1
4	5	0,01335	0,04211	0	1
4	7	0	0,20912	0	0,978
4	9	0	0,55618	0	0,969



5	6	0	0,25202	0	0,932
6	11	0,09498	0,19890	0	1
6	12	0,12291	0,25581	0	1
6	13	0,06615	0,13027	0	1
7	8	0	0,17615	0	1
7	9	0	0,11001	0	1
9	10	0,03181	0,08450	0	1
9	14	0,12711	0,27038	0	1
10	11	0,08205	0,19207	0	1
12	13	0,22092	0,19988	0	1
13	14	0,17093	0,34802	0	1

#### IV.3.1.2. Cas normal sans compensation et sans surcharge

D'après les données du réseau IEEE standard à 14 nœuds, nous avons utilisé la programmation sur MATLAB pour résoudre les équations de l'écoulement de puissance précédemment décrites au chapitre III. Le résultat de l'écoulement de puissance et du transit de puissance dans les lignes obtenus par la méthode de Newton-Raphson sont portés successivement sur le tableau (IV.11) et le tableau (IV.12).

**Tableau IV.11.a :** Résultats de l'écoulement de puissance dans le réseau

IEEE à 14 nœuds : Résultats de nos calculs.

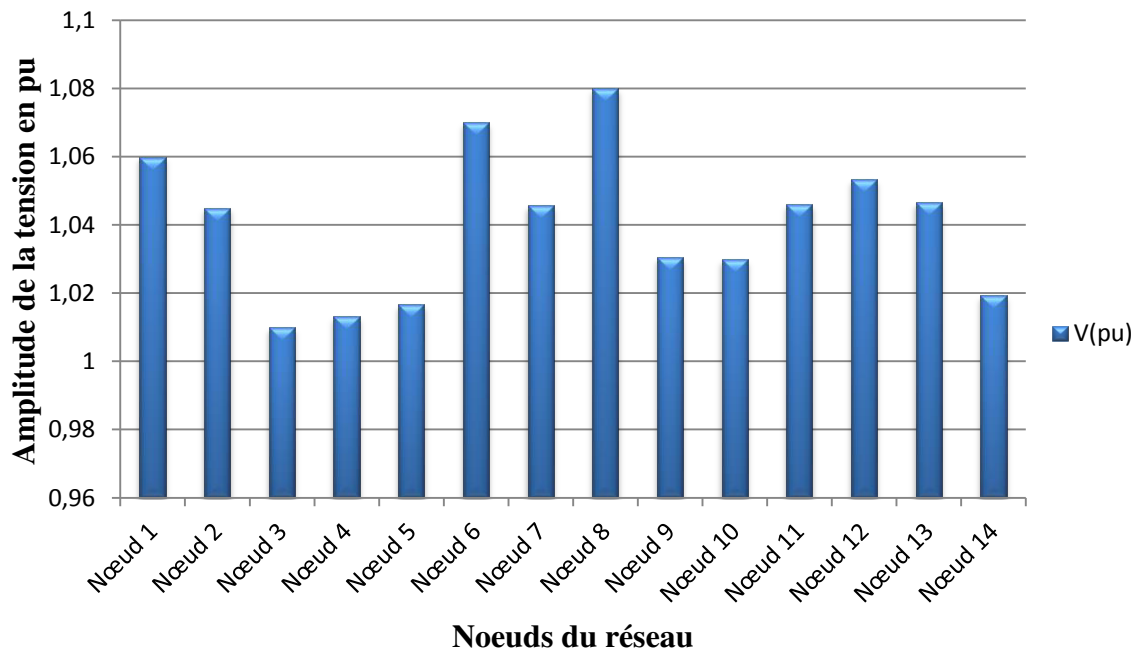
Méthode de Newton-Raphson après 03 itérations						
N° Nœud	Tension		Générateur		Charge	
	Amplitude (pu)	Phase (degré)	P (MW)	Q (Mvar)	P (MW)	Q (Mvar)
01	1,0600	0,000	232,593	-15,233	0,000	0,000
02	1,0450	-4,9891	40,000	47,928	21,700	12,700
03	1,0100	-12,4792	0,000	27,758	94,200	19,000
04	1,0132	-10,2420	0,000	0,000	47,800	-3,900
05	1,0166	-8,7601	0,000	0,000	7,600	1,600
06	1,0700	-14,4469	0,000	23,026	11,200	7,500

<b>07</b>	1,0457	-13,2368	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>08</b>	1,0800	13,2368	0,000	21,030	0,000	0,000
<b>09</b>	1,0305	-14,8201	0,000	0,000	29,500	16,600
<b>10</b>	1,0299	-15,0360	0,000	0,000	9,000	5,800
<b>11</b>	1,0461	-14,8581	0,000	0,000	3,500	1,800
<b>12</b>	1,0533	-15,2973	0,000	0,000	6,100	1,600
<b>13</b>	1,0466	-15,3313	0,000	0,000	13,500	5,800
<b>14</b>	1,0193	-16,0717	0,000	0,000	14,900	5,000
		<b>Total</b>	272,593	104,509	259,000	73,500

**Tableau IV.11.b** : Résultats de l'écoulement de puissance dans le réseau

IEEE à 14 nœuds : Résultats publiés [29].

Méthode de Newton-Raphson après 3 itérations						
N° Nœuds	Tension		Charge		Générateur	
	Amplitude (pu)	Phase (degré)	P (MW)	Q(Mvar)	P (MW)	Q(Mvar)
1	1.0600	0.000	0.000	0.000	232.551	-15.529
2	1.0450	-4.9874	21.700	12.700	40.000	46.921
3	1.0100	-12.7424	94.200	19.000	0.000	27.136
4	1.0142	-10.2564	47.800	-3.900	0.000	0.000
5	1.0172	-8.7646	7.600	1.600	0.000	0.000
6	1.0700	-14.4177	11.200	7.500	0.000	21.604
7	1.0503	-13.2519	0.000	0.000	0.000	0.000
8	1.0800	-13.2519	0.000	0.000	0.000	18.182
9	1.0337	-14.8323	29.500	16.600	0.000	0.000
10	1.0326	-15.0412	9.000	5.800	0.000	0.000
11	1.0475	-14.8478	3.500	1.800	0.000	0.000
12	1.0535	-15.2684	6.100	1.600	0.000	0.000
13	1.0471	-15.3081	13.500	5.800	0.000	0.000
14	1.0213	-16.0647	14.900	5.000	0.000	0.000
		<b>Total</b>	259.000	73.500	272.551	98.314



**Figure IV.8 :** Amplitude des tensions dans chaque nœud du réseau.

La figure précédente (figure IV.8), montre les niveaux de tension dans les différents nœuds du réseau, nous remarquons que le réseau étudié est bien en régime équilibré et que les tensions sont acceptables et par conséquent, une distribution équilibrée de l'énergie électrique sur les différentes branches du réseau.

**Tableau IV.12 :** Résultats du transit de puissance dans les lignes.

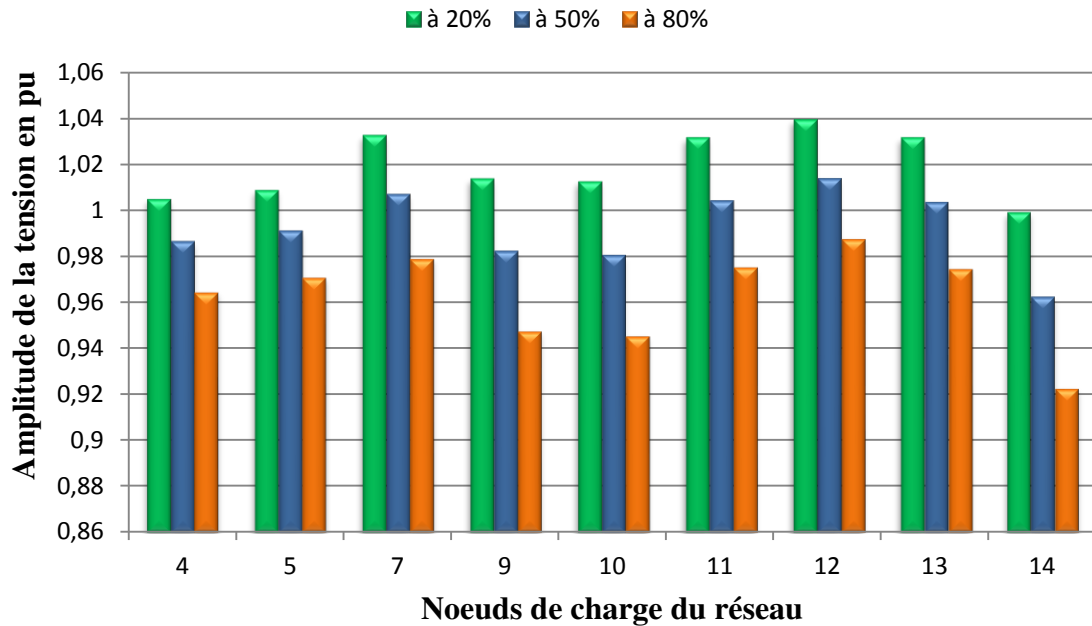
Méthode de Newton-Raphson									
Du nœud	Au nœud	P (MW)	Q (Mvar)	Du nœud	Au nœud	P (MW)	Q (Mvar)	Pertes (ligne)	
								MW	Mvar
1	2	157,080	-17,484	2	1	-152,772	30.639	4.309	13.155
1	5	75,513	7,981	5	1	-72,740	3.464	2.773	11.445
2	3	73,396	5,936	3	2	-71,063	3.894	2.333	9.830
2	4	55,943	2,935	4	2	-54,273	2.132	1.670	5.067
2	5	41,733	4,738	5	2	-40,813	-1.929	0.920	2.809
3	4	-23,137	7,752	4	3	23,528	-6.753	0.391	0.998
4	5	-59,585	11,574	5	4	60,064	-10.063	0.479	1.511
4	7	27,066	-15,396	7	4	-27,066	17.327	0.000	1.932

4	9	15,464	-2,640	9	4	-15,464	3.932	0.000	1.292
5	6	45,889	-20,843	6	5	-45,889	26.617	0.000	5.774
6	11	8,287	8,898	11	6	-8,165	-8.641	0.123	0.257
6	12	8,064	3,176	12	6	-7,984	-3.008	0.081	0.168
6	13	18,337	9,981	13	6	-18,085	-9.485	0.252	0.496
7	8	0,000	-20,362	8	7	0,000	21.030	0.000	0.668
7	9	27,066	14,798	9	7	-27,066	-13.840	0.000	0.957
9	10	4,393	-0,904	10	9	-4,387	0.920	0.006	0.016
9	14	8,637	0,321	14	9	-8,547	-0.131	0.089	0.190
10	11	-4,613	-6,720	11	10	4,665	6.841	0.051	0.120
12	13	1,884	1,408	13	12	-1,873	-1.398	0.011	0.010
13	14	6,458	5,083	14	13	-6,353	-4.869	0.105	0.215
<b>Total</b>								13.593	56.910

#### IV.3.1.3. Réseau avec surcharge sans compensation

Pour obtenir une déstabilisation rapide du réseau, nous avons choisi d'augmenter les charges uniquement au niveau des zones fragiles à savoir les nœuds 4, 5, 9, 10 et 14.

Dans cet essai, nous augmentons la charge de façon homogène dans l'ensemble des nœuds de charge du réseau, et nous étudions à chaque niveau de charge l'écoulement de puissance et particulièrement la puissance réactive depuis les niveaux de tension des nœuds du réseau. Pour ce faire, nous avons procédé à une augmentation progressive de la charge des nœuds PQ du réseau à des valeurs de 20%, 50% et 80% de leurs charges.



**Figure IV.9 :** Amplitudes des tensions des nœuds de chargés en fonction du degré de surcharge.

D'après les résultats de l'écoulement de puissance obtenus, et plus particulièrement les plans de tensions (figure IV.9), on remarque clairement que la chute de tension est plus importante dans les nœuds de charge 4, 5, 9, 10 et 14. Ce résultat est logique, vu que les nœuds 4 et 5 sont à proximité de transformateurs de puissance car ces derniers consomment abondamment de l'énergie réactive, et que la zone où se trouvent les nœuds 9, 10 et 14 est la plus éloignée des nœuds de production. Ces deux zones sont considérées comme étant les zones les plus fragiles du réseau standard IEEE à 14 nœuds.

Nous remarquons aussi que l'amplitude de la tension du nœud 14 est la plus petite. Cela, nous ramène à considérer ce nœud comme étant le nœud de charge le plus faible du réseau, il est alors le nœud qui a le plus besoin d'être soutenu.

### IV.3.2. Apport du FACTS shunt (STATCOM)

L'influence du système FACTS shunt « STATCOM » sur le profil de la tension est une image de son influence sur le transit de l'énergie réactive dans le réseau étudié.

#### IV.3.2.1. Utilisation d'un seul STATCOM

Le STATCOM est implanté sur le nœud de charge le plus fragile du réseau. Pour le réseau standard IEEE à 14 nœuds, on a vu précédemment que le nœud concerné est le

nœud14. Nous appliquons des surcharges progressives de 20%, 50% et 80% aux nœuds de charges du réseau.

#### IV.3.2.1.1. Effet du STATCOM sur le profil de la tension

D'après le tableau (IV.13), il paraît clairement que le STATCOM améliore le profil de tension du nœud où il est implanté à savoir le nœud 14. En effet, l'amplitude de la tension est augmentée pour se stabiliser à 1,0 pu.

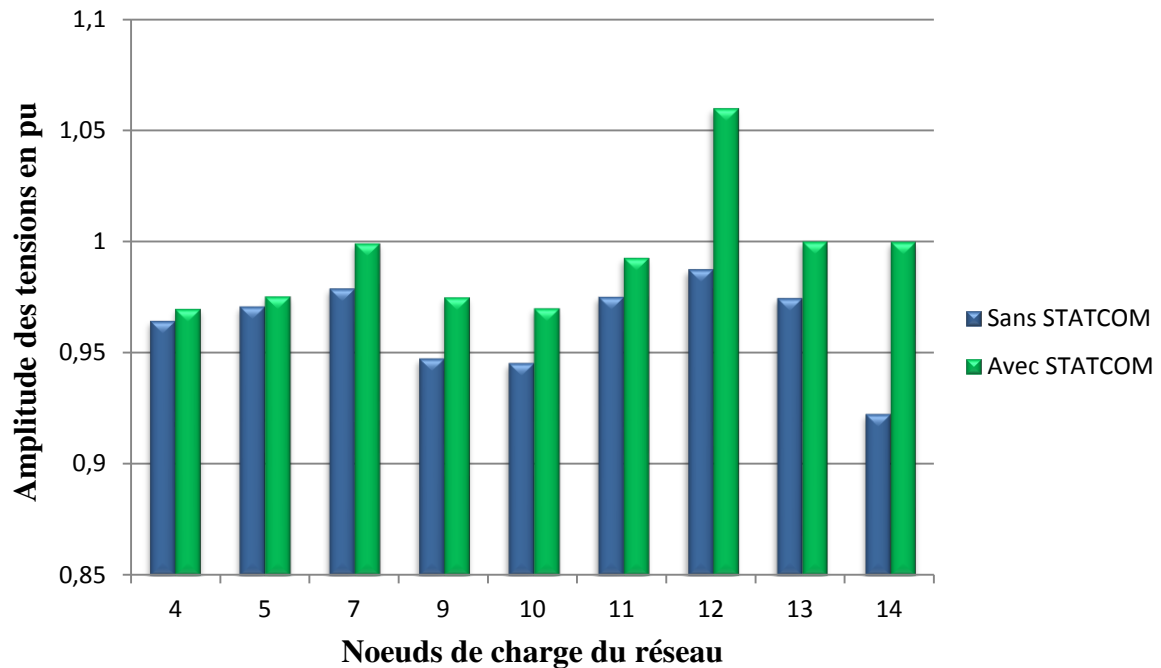
**Tableau IV.13 :** Amplitudes du nœud 14 pour différentes surcharges.

Degré de surcharge	Amplitude la tension en pu	
	Sans STATCOM	Avec STATCOM
20%	0,9993	1,000
50%	0,9625	1,000
80%	0,9227	1,000

**Tableau IV.14 :** Variation de  $V_{sh}$  et de  $Q_{sh}$  en fonction de la charge.

Surcharge	Amplitude la tension au nœud 14 (pu)	STATCOM	
		$V_{sh}$	$Q_{sh}$
20%	0,9993	0,9997	0,0033
50%	0,9625	1,0048	-0,0836
80%	0,9227	1,0210	-0,2101

Le tableau (VI.14), donne les variations de la tension  $V_{sh}$  et de la puissance réactive  $Q_{sh}$  en fonction du degré de surcharge dans le nœud 14. Nous constatons que les caractéristiques du STATCOM  $V_{sh}$  et  $Q_{sh}$  augmentent parallèlement avec l'augmentation de la surcharge.



**Figure IV.10 :** Amplitudes des nœuds de charge du réseau pour une surcharge de 80%.

Nous remarquons que le compensateur shunt ne s'est pas limité uniquement à la compensation du nœud 14 mais son action s'est élargie sur l'ensemble des nœuds du réseau et particulièrement les nœuds voisins. Cet effet est l'une des caractéristiques des systèmes FACTS shunt qui soutiennent la tension de façon homogène sur l'ensemble du réseau.

Par ailleurs, l'amplitude de la tension du nœud 14 est toujours inférieure à 1,0 pu pour un réseau surchargé. Afin de soutenir ce nœud et améliorer l'état global du réseau, le STATCOM adapte sa tension  $V_{sh}$  qui doit être supérieure à celle du nœud 14 et varie en fonction du niveau de tension dans le but de fournir la puissance réactive suffisante.

#### IV.3.2.1.2. Effet du STATCOM sur le transit de puissance

Pour voir le transit de puissances dans les différentes branches du réseau sous présence d'un dispositif FACTS de type STATCOM implanté dans le nœud le plus faible du réseau, nous avons fixé les nœuds consommateurs à un niveau de surcharge de 80%.

**Tableau IV.15 :** Résultats du transit de puissance dans les lignes pour une augmentation de charge de 80% avec STATCOM au nœud 14.

Méthode de Newton-Raphson									
Du nœud	Au nœud	P (MW)	Q (Mvar)	Du nœud	Au nœud	P (MW)	Q (Mvar)	Pertes (ligne)	
								MW	Mvar
1	2	238,686	0,099	2	1	-228,859	29,903	9,826	30,002
1	5	117,138	25,263	5	1	-110,233	3,241	6,905	28,504
2	3	91,319	-0,590	3	2	-87,589	16,304	3,730	15,714
2	4	88,384	9,367	4	2	-84,014	3,890	4,369	13,257
2	5	67,457	10,645	5	2	-64,929	-2,926	2,528	7,719
3	4	-6,611	20,352	4	3	6,918	-19,569	0,307	0,783
4	5	-8,603	16,128	5	4	86,680	-12,731	1,077	3,396
4	7	48,818	-8,453	7	4	-48,818	13,789	0,000	5,336
4	9	27,842	1,294	9	4	-27,842	3,156	0,000	4,450
5	6	74,802	-16,037	6	5	-74,802	30,482	0,000	14,445
6	11	15,448	11,931	11	6	-15,107	-11,217	0,341	0,714
6	12	14,243	3,004	12	6	-13,998	-2,493	0,245	0,511
6	13	33,911	6,918	13	6	-33,164	-5,447	0,747	1,471
7	8	0,000	-20,795	8	7	0,000	21,568	0,000	0,772
7	9	48,818	17,615	9	7	-48,818	-14,611	0,000	3,004
9	10	7,532	2,795	10	9	-7,510	-2,738	0,022	0,057
9	14	16,028	-15,752	14	9	-15,353	17,188	0,675	1,436
10	11	-8,690	-7,702	11	10	8,807	7,977	0,118	0,275
12	13	3,018	-0,387	13	12	-2,997	0,405	0,020	0,018
13	14	11,861	-5,398	14	13	-11,571	5,989	0,290	0,591
							<b>Total</b>	31,200	132,457

Les résultats de l'écoulement de puissance obtenus (Tableau VI.15) nous montrent que le STATCOM assure la compensation en énergie réactive dans le nœud où il est connecté principalement et l'ensemble du réseau généralement, et cela via sa contribution à diminuer



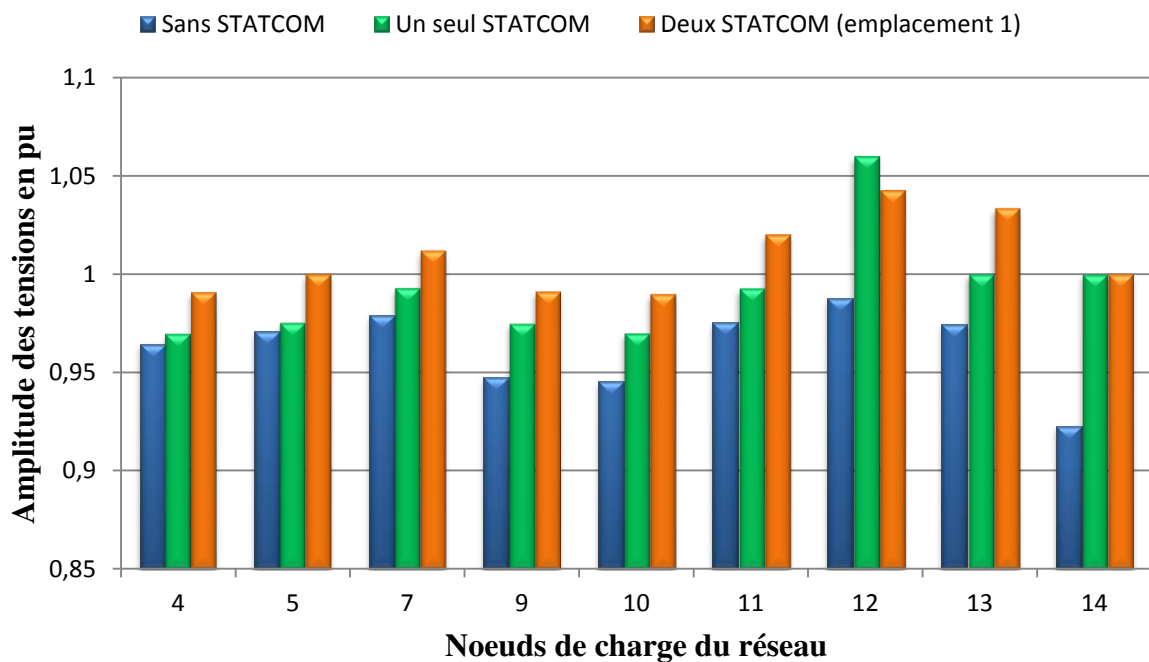
les pertes dans le réseau et principalement les pertes réactives, ce qui rends ce dernier plus souple à des niveaux de tensions acceptables.

### IV.3.2.2. Utilisation de deux STATCOM

Dans cette application, nous avons installé deux FACTS de type STATCOM pour mieux améliorer le plan de tensions de notre réseau, et de le rendre plus fluide en matière de transit de puissance en diminuant ses pertes causées principalement par la circulation de l'énergie réactive.

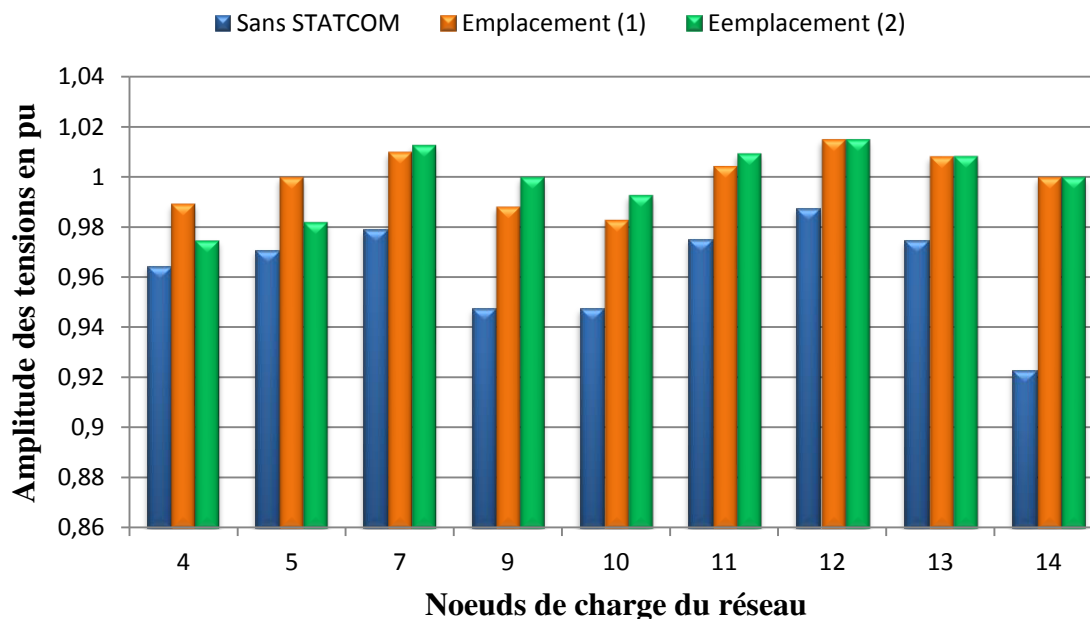
Pour faire, nous avons procédé comme précédent à une surcharge de 80% aux nœuds de charge du réseau, et nous avons placé les deux STATCOM dans deux emplacements différents à fin de pouvoir retrouver un positionnement idéal pour nos systèmes de compensation.

- Emplacement (1) : Deux STATCOM (un premier au nœud 05 et un autre au nœud 14).
- Emplacement (2) : Deux STATCOM (un premier au nœud 09 et un autre au nœud 14).



**Figure IV.11** : Amplitude des tensions aux nœuds de charge sans et avec STATCOM.

Depuis la figure (IV.11), nous constatons que l'apport de deux FACTS positionnés respectivement aux nœuds 05 et 14, contribue à une meilleure amélioration du plan de tensions dans l'ensemble des nœuds de charge du réseau, et prouve leurs efficacité en ce qui concerne la compensation de l'énergie réactive qui est traduite par une diminution constatable des pertes réactives globales du réseau.



**Figure IV.12 :** Amplitude des tensions aux nœuds de charge sans et avec STATCOM

pour deux placements différents.

D'après la figure (IV.12), nous réalisons que l'emplacement (1) des deux STATCOM conduit à un meilleur rétablissement du plan de tension et une meilleure compensation de l'énergie réactive du réseau en lui évitant d'avantages de pertes actives et réactives et cela comparé à l'emplacement (2), ce qui nous conduit à conclure que l'emplacement (1) est considéré comme étant le meilleur emplacement des FACTS du type STATCOM dans le réseau IEEE standard à 14 nœuds.

### IV.3.3. Application sur le réseau IEEE standard à 30 nœuds

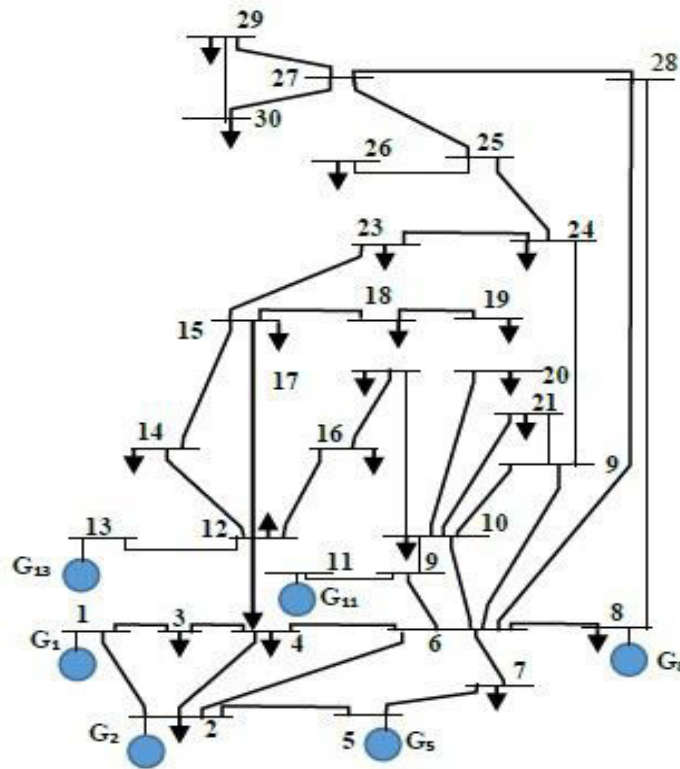
#### IV.3.3.1. Description du réseau à étudier

Dans cet exemple d'application, un réseau électrique IEEE standard à 30 nœuds est utilisé (figure IV.13). Ce réseau est constitué de :

- 06 générateurs,
- 41 lignes électriques,
- 24 charges.

La tension de base pour chaque nœud est de 135 kV, et la puissance de base du réseau en général est de 100 MVA.

Sachant que le nœud 01 est pris comme nœud de référence et que tous les angles de phase ont une valeur initiale de  $0,0^\circ$ .



**Figure IV.13 :** Schéma unifilaire du réseau IEEE standard à 30 nœuds.

Les données des générateurs et des charges ainsi que les caractéristiques des lignes sont indiquées dans l'annexe.

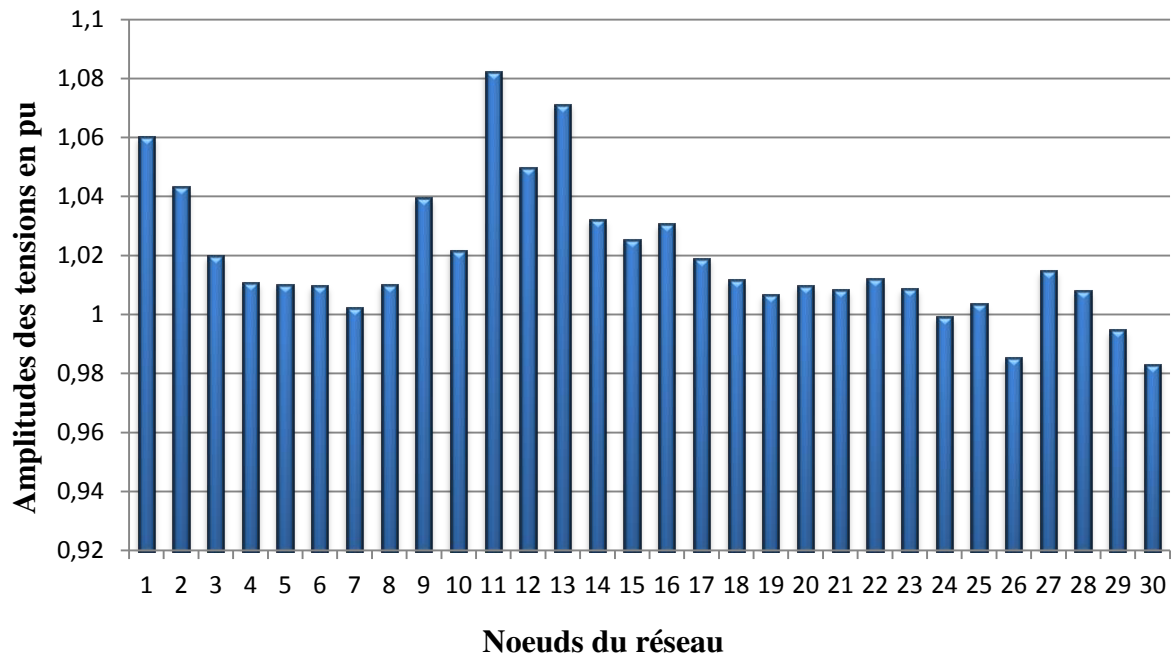
### IV.3.3.2. Cas normal sans compensation et sans surcharge

D'après les données du réseau IEEE standard à 30 nœuds, nous avons utilisé la programmation sur MATLAB pour résoudre les équations de l'écoulement de puissance précédemment décrites au chapitre III. Le résultat de l'écoulement de puissance et du transit de puissance dans les lignes obtenus par la méthode de Newton-Raphson sont portés successivement sur le tableau (IV.18) et le tableau (IV.19).

**Tableau IV.14 :** Résultats de l'écoulement de puissance dans le réseau IEEE à 30 nœuds.

N° Nœud	Méthode de Newton-Raphson après 03 itérations					
	Tension		Générateur		Charge	
	Amplitude (pu)	Phase (degré)	P (MW)	Q (Mvar)	P (MW)	Q (Mvar)
01	1,0600	0,0000	261.159	-15,902	0,000	0,000
02	1,0430	-5,3543	40.000	50,741	21,700	12,700

<b>03</b>	1,0196	-7,5308	0,000	0,000	2,400	1,200
<b>04</b>	1,0104	-9,2840	0,000	0,000	7,600	1,600
<b>05</b>	1,0100	-14,1738	0,000	37,279	94,200	19,000
<b>06</b>	1,0096	-11,0581	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>07</b>	1,0020	-12,8649	0,000	0,000	22,800	10,900
<b>08</b>	1,0100	-11,8193	0,000	38,297	30,000	30,000
<b>09</b>	1,0392	-14,0644	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>10</b>	1,0215	-15,6706	0,000	0,000	5,800	2,000
<b>11</b>	1,0820	-14,0644	0,000	22,240	0,000	0,000
<b>12</b>	1,0496	-15,1245	0,000	0,000	11,200	7,500
<b>13</b>	1,0710	-15,1245	0,000	16,382	0,000	0,000
<b>14</b>	1,0320	-16,0018	0,000	0,000	6,200	1,600
<b>15</b>	1,0251	-16,0084	0,000	0,000	8,200	2,500
<b>16</b>	1,0304	-15,6251	0,000	0,000	3,500	1,800
<b>17</b>	1,0188	-15,8687	0,000	0,000	9,000	5,800
<b>18</b>	1,0114	-16,6067	0,000	0,000	3,200	0,900
<b>19</b>	1,0066	-16,7658	0,000	0,000	9,500	3,400
<b>20</b>	1,0095	-16,5502	0,000	0,000	2,200	0,700
<b>21</b>	1,0082	-16,2178	0,000	0,000	17,500	11,200
<b>22</b>	1,0120	-15,9811	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>23</b>	1,0085	-16,2294	0,000	0,000	3,200	1,600
<b>24</b>	0,9991	-16,3007	0,000	0,000	8,700	6,700
<b>25</b>	1,0032	-16,0720	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>26</b>	0,9852	-16,5038	0,000	0,000	3,500	2,300
<b>27</b>	1,0145	-15,6559	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>28</b>	1,0078	-11,7163	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>29</b>	0,9944	-16,9077	0,000	0,000	2,400	0,900
<b>30</b>	0,9828	-17,8067	0,000	0,000	10,600	1,900
		<b>Total</b>	301.159	149,037	283,400	126,200

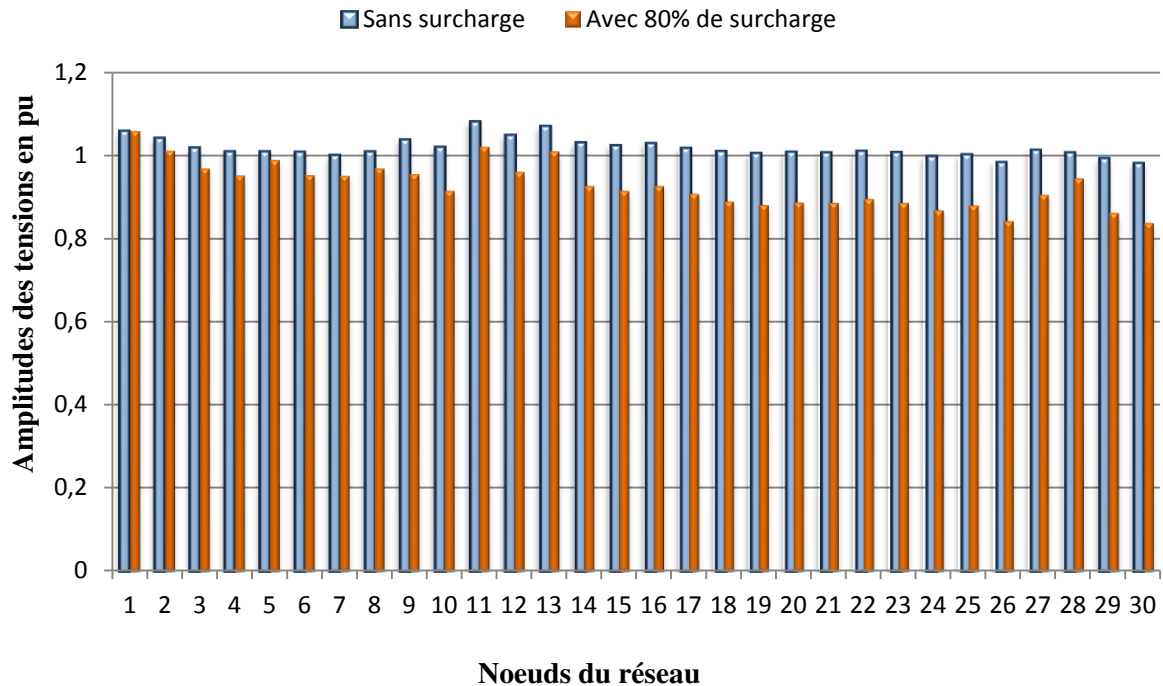


**Figure IV.14 :** Amplitude des tensions dans chaque nœud du réseau.

D'après la figure (IV.13), nous constatons que le réseau IEEE à 30 nœuds est bien en régime équilibré, donc le transit de puissance dans ces branches est aussi bien équilibré avec un minimum de pertes.

### IV.3.3.3. Réseau avec surcharge et sans compensation

Pour voir l'effet de la surcharge sur le plan des tensions et l'écoulement des puissances, nous avons procédé à une surcharge des nœuds de charge du réseau à 80%.



**Figure IV.15 :** Effets de la surcharge sur le plan des tensions.

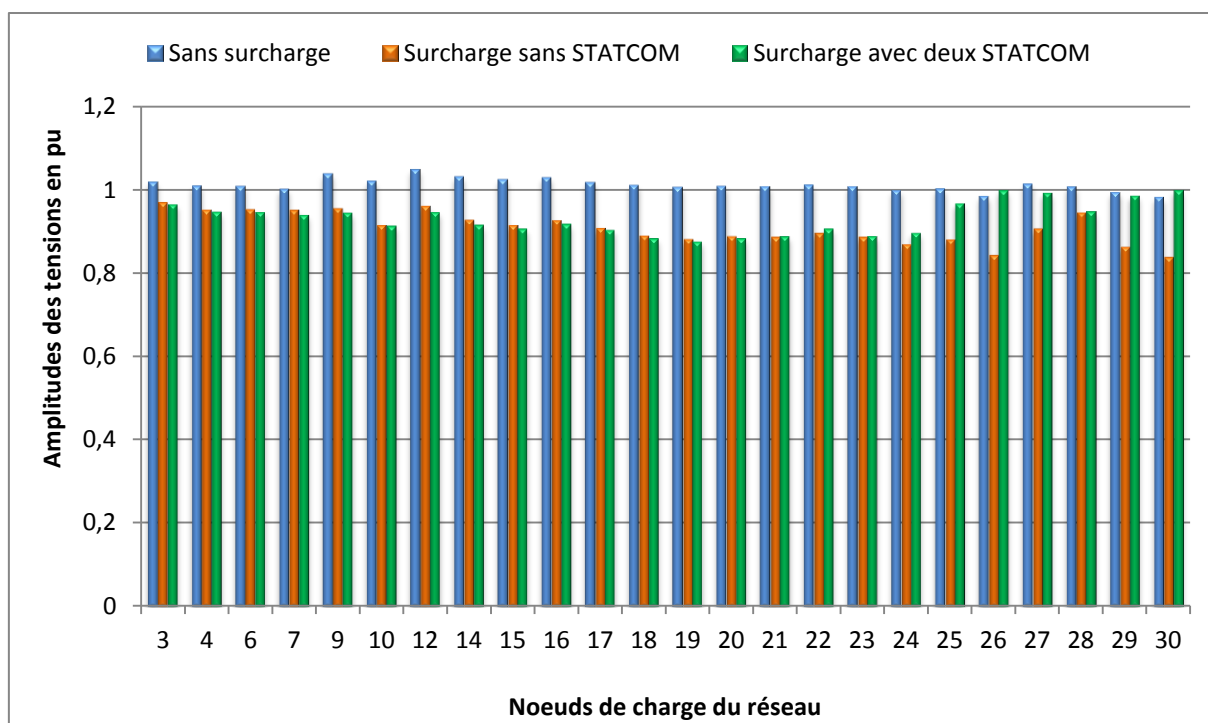
Nous constatons clairement que l'augmentation de la charge influe directement sur les tensions des nœuds du réseau et provoque un déséquilibre de son plan de tensions, et par conséquent une mauvaise circulation de la puissance et une augmentation des pertes dans les lignes.

Depuis les figures (IV.14) et (IV.15), nous remarquons que deux nœuds du réseau étudié IEEE à 30 nœuds sont particulièrement faibles. Il s'agit des deux jeux de barre 26 et 30, et cela revient au fait que ces derniers sont les nœuds les plus loin des sources de puissance.

#### IV.3.3.4. Apport de deux FACTS de type STATCOM

Pour tenter d'atteindre un équilibre du plan de tensions du réseau et une bonne répartition de puissance dans les branches de ce dernier, nous avons maintenu une surcharge de 80% dans l'ensemble des nœuds de charge, et nous avons installé deux STATCOM dans les nœuds supposés les plus fragile du réseau, à savoir le nœud 26 et le nœud 30.

La figure (IV.16) montre l'effet de la compensation via deux dispositifs FACTS sur les tensions aux nœuds de charge du réseau.



**Figure IV.16 :** Influence de deux STATCOM sur les tensions des nœuds du réseau.

Depuis la figure (IV.16), nous remarquons aisément que l'implantation de deux FACTS de type STATCOM aux nœuds 26 et 30 nous a permis d'avoir des tensions atteignant 1,0 pu aux nœuds concernés comme désiré, et contribuent à l'amélioration du niveau de tension les nœuds de charge qui sont proches de leurs emplacement. Ce rétablissement du plan des tensions est une signification de l'amélioration du transit de puissance dans le réseau et de la diminution des pertes réactives dans les lignes.

#### IV.4. Conclusion

D'après nos résultats de simulation et plus particulièrement l'analyse des plans de tension des réseaux étudiés et de leurs écoulements de puissance, nous avons abouti à conclure que l'augmentation de la charge dans un réseau, engendre des chutes de tension dans l'ensemble des nœuds de ce dernier, cela est naturellement normal du fait que l'énergie réactive demandée a fait alourdir le réseau, d'où la nécessité de compenser l'énergie réactive là où elle est demandée afin de limiter sa circulation dans le réseau. Pour faire, nous avons utilisé un compensateur FACTS de type STATCOM, ce dernier a été implanté dans les nœuds les plus faibles du réseau pour les alimenter en énergie réactive demandée et pouvoir rétablir

parallèlement, la tension des nœuds concernés au niveau désiré particulièrement et celle des autres nœuds du réseau généralement.

Aussi, nous avons pu constater que le choix du positionnement des FACTS et de leurs nombres nécessite une étude technique basée essentiellement sur les transits de puissance entre les différents nœuds d'un réseau donné et une analyse de leurs tensions, à laquelle s'ajoute une étude économique en parallèle. C'est donc un problème de caractère technico-économique.



---

# Conclusion générale

---

## **Conclusion générale**

Dans ce travail de mémoire, nous nous sommes intéressés à la compensation de l'énergie réactive d'un réseau de transport par un système FACTS. Ainsi, il était question de résoudre les équations de l'écoulement de puissance dans un réseau électrique donné à fin de voir le transit des puissances plus clairement; pour ce faire, nous avons utilisé de la méthode d'analyse numérique de Newton-Raphson et sa rapidité de calcul à des nombres d'itérations réduits étaient derrière notre choix.

Une surcharge des nœuds de charge des réseaux étudiés, nous a permis de constater l'influence des charges sur le plan de tensions ainsi que la qualité du transit de puissance dans le réseau, et nous a guidé à localiser et constater les zones faibles du réseau et qui ont le plus besoin d'être soutenus. Pour ce faire, nous avons procédé à la compensation de l'énergie réactive dans les points concernés et supposés comme étant les plus fragiles. Pour y aboutir, nous avons fait appel à la compensation shunt via un dispositif FACTS de type STATCOM, qui est réputé par son efficacité et sa rapidité de contrôle de la tension.

L'apport du STATCOM a fait preuve d'une bonne compensation de l'énergie réactive dans les points où elle était appelée, et cela s'est traduit par l'amélioration locale de la tension du nœud concerné au degré souhaité, et a contribué à une amélioration globale du plan des tensions du réseau en général et plus particulièrement les nœuds qui lui sont plus proches.

La variation du nombre et de l'emplacement des dispositifs FACTS incorporés dans un réseau électrique, a prouvé que ces deux choix basiques nécessitent plus d'expertise pour pouvoir proposer une solution qui répond aux contraintes technico-économiques.

Comme perspective de ce travail, nous proposons d'introduire l'optimisation de l'emplacement des FACTS ainsi que le type (série et parallèle) pour avoir le meilleur profil de la tension et le minimum de pertes de puissance tout en respectant toutes les contraintes techniques imposées préalablement, et ce en appliquant des méthodes d'optimisation évolutionnaires. Il serait certainement intéressant d'analyser le réseau en présence d'autres types de perturbations autre que la surcharge.

---

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

---

## Références bibliographiques

---

- [1] R. Benabid, « Optimisation multiobjectif de la synthèse des FACTS par les particules en essaim pour le contrôle de la stabilité de tension des réseaux électriques ». Mémoire de Magistère, Université Amar Telidji, Laghouat, 2007.
- [2] T. Wildi avec la collaboration de Gylbert Cybille, « électrotechnique 3eme édition », partie 47, 1978, 1991, 2000.
- [3] M. Zeroual, « Optimisation et contrôle de l'écoulement des puissances actives par système FACT ». Thèse de doctorat, Université Mohamed Boudiaf, Oran 2015.
- [4] A. Doulet, P. Bornard, « Réseaux électriques- Avant-propos ».Techniques de l'ingénieur, Réf : D4000 v2, 10 mai 2013.
- [5] [www.techno-science.net/glossaire-definition/Reseau-electrique-page-2.html](http://www.techno-science.net/glossaire-definition/Reseau-electrique-page-2.html).
- [6] J.L. Lilien, « Le réseau synchrone de l'UCTE (2300 TWh/an) ». Cours donné à l'Institut d'Electricité Montefiore, Université de Liège, 2006.
- [7] D. Souque, L. Chatonnet, É. Monnot, « Réglage de tension- Rôles, organisation et obligation du producteur pour les besoins du système électrique en France ». Techniques de l'ingénieur, Réf : D4096 v1, 10 novembre 2013.
- [8] Y. He, « Contribution au réglage de la tension sur un réseau HTA avec producteurs. Apport de la flexibilité de la demande ». CentraleSupélec, 2015.
- [9] T. Margotin, P. Juston, M.P. Houry, « Les Services Système : l'expérience de RTE ». Journées de la section électrotechnique du Club EEA, 2006.
- [10] O. Richardot, « Réglage de tension dans les réseaux de distribution à l'aide de la production décentralisée ». Rapport de thèse, Institut Polytechnique de Grenoble, France, 2006.
- [11] H. Persoz, G. Santucci, J.C. Lemoine, P. Sapet, «La planification des réseaux électriques». Editions EYROLLES, 1984.

- [12] R. Haimour, « contrôle des puissances réactives et des tensions par les dispositifs FACTS dans un réseau électrique ».Thèse de magistère, Ecole Nationale Polytechnique d'Oran, 2009.
- [13] J.L. Chanelière, « Réseaux de transport et de répartition - Systèmes et plans de protection ». Techniques de l'ingénieur, Réf : D4804 v1, 10 mai 2010.
- [14] Y. Magnoun, « Placement optimal de dispositifs FACTS dans un réseau de puissance ». Mémoire d'ingénieur, Conservatoire National des Arts et Métiers, centre du Maroc, 2014.
- [15] N. Mancer, « Contribution à l'optimisation de la puissance réactive en présence de dispositifs de compensation dynamique (FACTS) ». Mémoire de Magistère, Université Mohamed Khider, Biskra, 2012.
- [16] S. Gerbex, « Metaheuristique appliquées au placement optimal de dispositifs FACTS dans un réseau électrique ».Thèse de doctorat, Ecole polytechnique de Lausanne, 2003.
- [17] X.P. Zhang, C. Rehtanz, B. Pal, «Flexible AC transmission systems: Modelling and Control ». Springer, 2005.
- [18] H. Belguidoum, « Les systèmes FACTS utilisant les convertisseurs entièrement commandés ». Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas, Sétif, 2012.
- [19] C.A. Canizaires, Z.T. Faur, « Analysis of SVC and TCSC controllers in voltage Ccollapse ». IEEE Transactions on Power Systems 14, 158-165, 1999.
- [20] G.SH. Eskandar,« Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques ». Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy 1, 2003.
- [21] B. Hadji, « Contribution à l'amélioration de l'efficacité des réseaux électriques par l'intégration et le contrôle flexible de l'énergieéolienne et des systèmes FACTS ».Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, 2017.
- [22] E.G. Shahraki, « Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques». Thèse de doctorat, Université de Henri Poincaré Nancy 1, 2003.
- [23] A. Talbi, A. Benoudjit, « Les systèmes FACTS ».ResearchGate, 2014.

- [24] A.Oudalov, «Coordinated control of multiple FACTS devices in an electric power system ».These de doctorat, Ecole polytechnique de Lausanne, 2003.
- [25] E.Acha, V.G. Agelidis, O. Anaya-Lara, T.J.E. Miller, «Power electronic control in electrical systems».Newnes, 2002.
- [26] F.Z. Zendagui, « Analyse de la stabilité transitoire dans les réseaux électriques ». Mémoire de Master, Université Mohamed Khider, Biskra, 2013.
- [27] A. Beaudry, « Simulateur d'écoulement de puissance en régime triphasé ». Ecole de technologie supérieur, Université du Québec, Montréal, 2016.
- [28] P. Bornard, M. Pavard, « Réseaux d'interconnexion et de transport : réglage et fonctionnement ». Technique de l'ingénieur traité génie électrique D 4090.
- [29] J. C. Sabonnadière, N. Hadjaïd, « Lignes et réseaux électriques ». Lavoisier 11, rue Lavoisier 7500 Paris, 2008.
- [30] A. Bencheikh, A. Derouiche, « Etude de l'écoulement de puissance sur un réseau électrique en présence des systèmes FACTS ». Mémoire de Master, Université Kasdi MERBAH, Ouargla, 2016.
- [31] G.W. Stagg, A.H. El-Abiad, « Computer methode in Power System Analysis ». McGraw Hill, 1968.

---

# **ANNEXES**

---

# Annexes

---

## ➤ Données des nœuds du réseau standard IEEE 30 nœuds

```
%
busdata = [ 1   1   1.06   0   0   0   0   0
            2   2   1.043  0  40  50.0 21.7 12.7
            3   3   1.0    0   0   0   2.4  1.2
            4   3   1.0    0   0   0   7.6  1.6
            5   2   1.01   0   0  37.0 94.2 19.0
            6   3   1.0    0   0   0   0.0  0.0
            7   3   1.0    0   0   0  22.8 10.9
            8   2   1.01   0   0  37.3 30.0 30.0
            9   3   1.0    0   0   0   0.0  0.0
           10   3   1.0    0   0   0   5.8  2.0
           11   2   1.082  0   0  16.2  0.0  0.0
           12   3   1.0    0   0   0  11.2  7.5
           13   2   1.071  0   0  10.6  0.0  0.0
           14   3   1.0    0   0   0   6.2  1.6
           15   3   1.0    0   0   0   8.2  2.5
           16   3   1.0    0   0   0   3.5  1.8
           17   3   1.0    0   0   0   9.0  5.8
           18   3   1.0    0   0   0   3.2  0.9
           19   3   1.0    0   0   0   9.5  3.4
           20   3   1.0    0   0   0   2.2  0.7
           21   3   1.0    0   0   0  17.5 11.2
           22   3   1.0    0   0   0   0.0  0.0
           23   3   1.0    0   0   0   3.2  1.6
           24   3   1.0    0   0   0   8.7  6.7
           25   3   1.0    0   0   0   0.0  0.0
           26   3   1.0    0   0   0   3.5  2.3
           27   3   1.0    0   0   0   0.0  0.0
           28   3   1.0    0   0   0   0.0  0.0
           29   3   1.0    0   0   0   2.4  0.9
           30   3   1.0    0   0   0  10.6  1.9
```



➤ Données des lignes du réseau standard IEEE 30 nœuds

%	From	To	R	X	B/2	X'mer
%	Bus	Bus	pu	pu	pu	TAP (a)
linedata = [	1	2	0.0192	0.0575	0.0264	1
	1	3	0.0452	0.1652	0.0204	1
	2	4	0.0570	0.1737	0.0184	1
	3	4	0.0132	0.0379	0.0042	1
	2	5	0.0472	0.1983	0.0209	1
	2	6	0.0581	0.1763	0.0187	1
	4	6	0.0119	0.0414	0.0045	1
	5	7	0.0460	0.1160	0.0102	1
	6	7	0.0267	0.0820	0.0085	1
	6	8	0.0120	0.0420	0.0045	1
	6	9	0.0	0.2080	0.0	0.978
	6	10	0.0	0.5560	0.0	0.969
	9	11	0.0	0.2080	0.0	1
	9	10	0.0	0.1100	0.0	1
	4	12	0.0	0.2560	0.0	0.932
	12	13	0.0	0.1400	0.0	1
	12	14	0.1231	0.2559	0.0	1
	12	15	0.0662	0.1304	0.0	1
	12	16	0.0945	0.1987	0.0	1
	14	15	0.2210	0.1997	0.0	1
	16	17	0.0824	0.1923	0.0	1
	15	18	0.1073	0.2185	0.0	1
	18	19	0.0639	0.1292	0.0	1
	19	20	0.0340	0.0680	0.0	1
	10	20	0.0936	0.2090	0.0	1
	10	17	0.0324	0.0845	0.0	1
	16	17	0.0824	0.1923	0.0	1
	15	18	0.1073	0.2185	0.0	1
	18	19	0.0639	0.1292	0.0	1
	19	20	0.0340	0.0680	0.0	1
	10	20	0.0936	0.2090	0.0	1
	10	17	0.0324	0.0845	0.0	1
	10	21	0.0348	0.0749	0.0	1
	10	22	0.0727	0.1499	0.0	1
	21	23	0.0116	0.0236	0.0	1
	15	23	0.1000	0.2020	0.0	1
	22	24	0.1150	0.1790	0.0	1
	23	24	0.1320	0.2700	0.0	1
	24	25	0.1885	0.3292	0.0	1
	25	26	0.2544	0.3800	0.0	1
	25	27	0.1093	0.2087	0.0	1
	28	27	0.0000	0.3960	0.0	0.968
	27	29	0.2198	0.4153	0.0	1
	27	30	0.3202	0.6027	0.0	1
	29	30	0.2399	0.4533	0.0	1
	8	28	0.0636	0.2000	0.0214	1
	6	28	0.0169	0.0599	0.065	1 ];