

N° d'ordre : .....  
N° de série : .....

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'enseignement Supérieur**  
**et de la Recherche scientifique**



**Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued**  
**Faculté de Technologie**

**Mémoire de Fin d'Étude**  
**En vue de l'obtention du diplôme de**

**MASTER ACADEMIQUE**

**Domaine : Technologie**  
**Filière : Génie Électrique**  
**Spécialité : Réseaux Électriques**

**Thème**

**Utilisation des Particules en Essaim par  
L'optimisation de la Puissance Réactive  
en Présence de Compensateurs FACTS .**

Présentée par :  
Guemmou Badreddine  
Manaoui Adel  
Betta Aymen

Soutenue publiquement le 17/06/2019

Devant le jury composé de :

Pr. BENATTOUS Djilani	Professeur	Président	Université d'El-Oued
Dr.Gacem Abdelmalek	Maitre de conférences	Rapporteur	Université d'El-Oued
Dr. BOUGOUFA Lazhar	Maitre de conférences	Examineur	Université d'El-Oued

**Année Universitaire : 2018/2019**

---

# SOMMAIRE

Sommaire.....	I
Remerciements.....	IV
Dédicaces.....	V
Notation et symboles.....	VI
Résumé.....	VIII
Liste des figures.....	IX
Liste des tableaux.....	XII
Introduction générale.....	1

## Chapitre I

### Écoulement de puissance et la compensation de la puissance réactive

I.1. Introduction.....	4
I.2. Objectifs de l'étude de l'écoulement de puissance.....	4
I.3. Modélisation des éléments du réseau électrique.....	4
I.3.1. Modèle du générateur.....	5
I.3.2. Modèle de la ligne de transport.....	6
I.3.3. Modèle de la charge électrique.....	6
I.3.4. Modèle de l'élément shunt.....	7
I.3.5. Modélisation d'un transformateur.....	7
I.4. Analyse de l'écoulement de puissance.....	8
I.5. Classification des variables de l'écoulement de puissance.....	8
I.5.1. Les variables incontrôlables.....	8
I.5.2. Les variables dépendantes ou d'état.....	9
I.5.3. Les variables indépendantes ou de contrôle.....	9
I.6. Classification des jeux de barres.....	9
I.7. Les équations de l'écoulement de puissance.....	11
I.7.1. Les équations aux J.d.B de charge.....	11
I.7.2. Exemple d'un système à deux J.d.B.....	12
I.7.3. Calcul de la puissance au niveau de J.d.B.....	14
I.7.4. Les équations d'écoulement dans les lignes.....	15
I.7.5. Les pertes de puissance dans lignes.....	15
I.8. Résolution des équations de l'écoulement de puissance.....	16
I.8.1. Méthodes de Newton-Raphson.....	16
I.8.2. Détermination des sous-matrices de Jacobienne $J_i$ .....	19
I.8.3. Les étapes de calcul.....	20
I.9. La puissance réactive.....	20
I.9.1. Influence de l'énergie réactive.....	21
I.9.2. Chute de tension sur une ligne.....	21
I.9.3. Transport de l'énergie réactive.....	22
I.9.4. Relation entre la stabilité et la compensation d'énergie réactive.....	23
I.9.5. Moyens de compensation de la puissance réactive.....	25

I.9.5.1. Les condensateurs .....	25
I.9.5.2. Les inductance.....	25
I.9.5.3. Les compensateurs synchrones .....	25
I.9.5.4. Les compensateurs statiques .....	26
I.9.5.5. Transformateurs avec prises réglables en charge .....	26
I.9.5.6. Les groupes de production (générateurs) .....	26
I.9.5.7. Les PSS (Power System Stabilizer) .....	26
I.9.5.8 les dispositifs système FACTS.....	27
I.10.Conclusion.....	27

## Chapitre II

### Les dispositifs Système FACTS

II.1. Introduction .....	28
II.2. Définition de l'acronyme « FACTS ».....	28
II.3. Classification des dispositifs FACTS .....	29
II.4.Différentes catégories des FACTS .....	30
II.5.Les principaux dispositifs FACTS .....	30
II.5.1.Dispositifs séries.....	30
II.5.2.Dispositifs shunts (parallèles) .....	33
II.5.3. Dispositifs hybrides (série-shunt) .....	35
II.6 Modélisation du SVC .....	36
II.7 Modélisation de TCSC .....	37
II.8.Synthèse .....	39
II.9.Apports et avantages des dispositifs FACTS.....	40
II.10.Application des dispositifs FACTS dans les réseaux électriques.....	41
II.11. Coût des dispositifs FACTS .....	41
II.12. Conclusion .....	42

## Chapitre III

### Optimisation par Essaim de Particules

III.1. Introduction.....	43
III.2. L'optimisation par Essaim de particules (PSO).....	44
III.2.1. Origines.....	45
III.2.2. Terminologie.....	46
III.2.3. Description informelle.....	47
III.2.4. Le voisinage.....	48
III.2.5. Principales caractéristiques.....	49
III.2.6. Equation de mouvement.....	50
III.3. Algorithme d'essaims de particules.....	52
III.3.1. Algorithme de PSO avec le coefficient d'inertie (PSO-CI).....	52
III.3.2. Algorithme de PSO avec le facteur de constriction k (PSO-FC).....	53
III.3.3. Algorithme de PSO avec Coefficients d'Accélération variable PSO-TVAC.....	53
III.4.Conclusion.....	54

---

---

## Chapitre IV

### Application et résultats de simulation

IV.1 Introduction.....	55
IV.2 Réseau d'application IEEE 30-bus.....	56
IV.2.1 Augmentation progressive de la charge.....	56
IV.2.2 Emplacement optimal des FACTS.....	59
IV.2.2.1 Optimisation avec considération de SVC.....	60
IV.2.2.2 Optimisation avec considération de TCSC.....	71
IV.2.2.3 Optimisation avec considération de coordination.....	76
IV.3. Conclusion.....	77
Conclusion Générale.....	78
Annexe.....	79
Bibliographie.....	81

---

# Dédicaces

*Nous dédies ce travail à:  
Ma très chère mère et mon père qui se sont  
sacrifiés tout au long de mes  
études.*

*Ma femme*

*Mes frères et mes soeurs.*

*Toute la famille GOMMOU , BETTA ET  
MANAOUI*

*Tous mes amis.*

*Et, tous ceux qui me sont chers.*

*G. Badreddine*

*B. Aymen*

*M. Adel*

---



## *Remerciement*

*NOUS tiens à remercier tout premièrement Dieu le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il m'a donné durant toutes ces longues années.*

*Ainsi, je remercie tout particulièrement Monsieur Gacem Abdelmalek , Professeur à l'Université d'El Oued pour m'avoir encadré, ainsi que leurs nombreux conseils, suggestions et encouragements.*

*Merci également à tous les membres de jury de thèse et tous les participants.*

*Enfin, je tiens à remercier ma famille pour son soutien constant tout au long de mes études.*

NOTATION ET SYMBOLES

**FACTS:** Flexible alternatif curant transmission systèmes.

**SVC:** Static Var Compensator.

**TCSC:** Thyristor Controlled Series Capacitor.

**SSSC :** Static Synchronous Series Compensator

**STATCOM :** Static Synchronous Compensator.

**UPFC :** Unified Power Flow Controller.

**IPFC :** Interline Power Flow Controller.

**TSC :** Thyristor Switched Capacitor.

**TCSR:** Thyristor Controlled Series Reactor.

**TSSC:** Thyristor Switched Series Capacitor.

**TCR :**Thyristor Controlled Reactor.

**TSR :** Thyristor Switched Reactor.

**Z:** Impédance série par phase

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

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

**$V_i$ :** Module de la tension au noeud  $i$ .

**$\theta_i$ :** Angle de phase au noeud  $i$ .

**$P$  :** Puissance active.

**$Q$  :** Puissance réactive.

**$|V|$  :** Module de la tension.

**$\delta$  :** Angle de la tension.

**$y_{ik}$  :** L'admittance de la ligne entre les deux jeux de barres  $i$  et  $k$ .

**$V_i Y_{ik}/2$ :** La contribution shunt du courant au jeu de barres  $i$ .

**$y_{ik}$ :** L'admittance shunt au jeu de barres.  $i = 1$ : Représente le nœud de référence

**$n$  :** Nombre de nœuds.

**$i$  :** Numéro du nœud.

**$W_{min}$  et  $W_{max}$  :** Coefficient d'inertie.

**$C1$  et  $C2$  :** Coefficient de confiance

**$V_i^{k+1}$ :** la vitesse de l'agent  $i$ , à l'itération  $k$

**$w$  :** Le poids inertiel,

**$C_j$ :** paramètre d'accélération (facteur de pondération),

**rand**: numéro aléatoire entre 0 et 1,

$x_i^k$ : la position de l'agent  $i$ , à l'itération  $k$ ,

**Pbest<sub>1</sub>**: meilleur personnel de l'agent  $i$ ,

**Gbest<sub>1</sub>**: meilleur global dans le group.

$V_i^{k+1}$ : la vitesse de l'agent  $i$ , à l'itération  $k$

**w** : Le poids inertiel,

**C<sub>j</sub>**: paramètre d'accélération (facteur de pondération),

**rand**: numéro aléatoire entre 0 et 1,

$x_i^k$ : la position de l'agent  $i$ , à l'itération  $k$ ,

**Pbest<sub>1</sub>**: meilleur personnel de l'agent  $i$ ,

**Gbest<sub>1</sub>**: meilleur global dans le group.

**PSO-CI** : particle swarm optimization avec le coefficient d'inertie.

**PSO-FC** : particle swarm optimization avec le facteur de constriction.

**PSO-TVAC** : particle swarm optimization avec coefficients d'accélération variable.

## Résumé

Dans ce travail nous proposons l'amélioration de la stabilité de tension et l'optimisation de la puissance réactive aux réseaux électriques par l'intégration des dispositifs FACTS. Ces dispositifs récents ont ouvert des nouvelles perspectives pour une exploitation plus efficace des réseaux électriques par action continue et rapide sur les différents paramètres du réseau (déphasage, tension, impédance...etc.), qui permet d'améliorer la stabilité de tension du réseau. Cependant, avec un mal conçu ou un mauvais contrôle de ces dispositifs, on risque de ne pas bénéficier leurs avantages. Donc, le choix du type de FACTS à utiliser, Et le nombre approprié, ses valeurs de consigne et son emplacement est la plus importante opération lors du dimensionnement des FACTS dans les grands réseaux électriques. L'objectif principal de ce mémoire est le contrôle de tension et l'utilisation des FACTS d'une manière optimale par les méthode d'optimisation par Essaim de particules (PSO) , dans le but d'améliorer la stabilité de tension et l'optimisation de la puissance réactive aux réseaux électriques

**Mots clés :** Optimisation de la puissance réactive, Méthodes PSO, Fonctions objectives et Dispositifs des FACTS, SVC et TCSC. Déviation de la Tension.

## ملخص

من خلال هذا العمل نقترح تحسين استقرار التوتر للبحث عن الإستطاعة الردية (الإرتكاسية) المثلى في الشبكات الكهربائية بإستعمال أجهزة التعويض المرنة (FACTS) هذه الأخيرة فتحت تطلعات من إستغلال أكثر نجاعة للشبكات الكهربائية بتأثير مستمر وسريع على مختلف قيم ( التوتر ، فرق الطور، الممانعة.....الخ) الذي يمكن من تحسين استقرار توتر الشبكة إلا أنه مع تصميم وتحكم سيئين في هذه الاجهزة ينتج عنه خطر عدم الاستفادة من إيجابيتهم إذن اختيار نوع (FACTS) المراد استعماله مع مراعاة العدد التقريبي والقيم المرجعية وموضعها هي العملية الأكثر فعالية لاختيار الابعاد لهذه الاجهزة في الشبكات الكهربائية الكبرى

الهدف الاساسي لهذه المذكرة هو التحكم في التوتر و استعمال الاجهزة المرنة بطريقة مثلى باستعمال طرق جزيئات السرب لتحسين في استقرار التوتر وتحسين الاستطاعة الردية للشبكة الكهربائية

**الكلمات المفتاحية :** تحسين الاستطاعة الردية ، طرق جزيئات السرب ، دالة الهدف ، أجهزة التعويض المرنة على التوازي والتسلسل.

## *LISTE DES FIGURES*

<b>Chapitre I</b>		
<b>Figure I.1</b>	Modèle d'une génératrice	5
<b>Figure I.2</b>	Source de tension.	5
<b>Figure I.3</b>	Schéma équivalent en $\pi$ d'une ligne	6
<b>Figure I.4</b>	Modèle de la charge électrique	6
<b>Figure I.5</b>	Modèle de l'élément shunt.	7
<b>Figure I.6</b>	Modèle des transformateurs.	7
<b>Figure I.7</b>	Système à deux J.d.B.	12
<b>Figure I.8</b>	Circuit équivalent du réseau électrique	21
<b>Figure I.9</b>	Deux nœuds connectés par une impédance	23
<b>Chapitre II</b>		
<b>Figure II.1</b>	Schéma simplifié de Classification des dispositifs FACTS.	30
<b>Figure II.2</b>	Compensation série.	31
<b>Figure II.3</b>	Ligne de transport avec un TCSC	31
<b>Figure II.4</b>	Structure du TCSC.	32
<b>Figure II.5</b>	Structure du TCSR.	32
<b>Figure II.6</b>	Compensateur Shunt.	33
<b>Figure II.7</b>	Structure du TCR (TSR).	34
<b>Figure II.8</b>	Structure du TSC.	34
<b>Figure II.9</b>	Structure du SVC.	34
<b>Figure II.10</b>	Structure de l'UPFC.	35
<b>Figure II.11</b>	Modélisation d'un SVC placé en un Noeud j	36
<b>Figure II.12</b>	Modélisation d'un TSCS	38
<b>Figure II.13</b>	Diagramme schématique pour l'application des FACTS	41

<b>Chapitre III</b>		
<b>Figure III.1</b>	Le cercle virtuel pour un essaim de sept particules.	47
<b>Figure III.2</b>	Schéma de principe du déplacement d'une particule.	48
<b>Figure III.3</b>	Trois topologies du voisinage différentes	49
<b>Figure III.4</b>	Mise à jour d'une particule avec l'algorithme PSO	51
<b>Figure III.5</b>	Organigramme de l'algorithme de PSO	52
<b>Chapitre IV</b>		
<b>Figure IV.1</b>	Amplitude de tensions des jeux de barres (Cas 1 et 2).	57
<b>Figure IV.2</b>	Déviations de tensions DV des jeux de barres (Cas 1 et 2).	57
<b>Figure IV.3</b>	Pertes actives DP de transmission (Cas 1 et 2).	57
<b>Figure IV.4</b>	Caractéristique de convergence de la déviation de tension par PSO-CI avec SVC.	61
<b>Figure IV.5</b>	Caractéristique de convergence de la déviation de tension par PSO-FC avec SVC.	61
<b>Figure IV.6</b>	Caractéristique de convergence de la déviation de tension par PSO-TVAC avec SVC.	61
<b>Figure IV.7</b>	Amplitude de tensions des JDB trouvés par PSO-CI avec SVC.	62
<b>Figure IV.8</b>	Amplitude de tensions des JDB trouvés par PSO-FC avec SVC.	62
<b>Figure IV.9</b>	Amplitude de tensions des JDB trouvés par PSO-TVAC avec SVC.	63
<b>Figure IV.10</b>	Caractéristique de convergence des pertes lignes par PSO-CI avec SVC.	63
<b>Figure IV.11</b>	Caractéristique de convergence des pertes lignes par PSO-FC avec SVC.	63
<b>Figure IV.12</b>	Caractéristique de convergence des pertes lignes par PSO-TVAC avec SVC.	64
<b>Figure IV.13</b>	Pertes Actives de lignes trouvés par PSO-CI avec SVC.	65
<b>Figure IV.14</b>	Pertes Actives de lignes trouvés par PSO-FC avec SVC.	65
<b>Figure IV.15</b>	Pertes Actives de lignes trouvés par PSO-TVAC avec SVC.	65
<b>Figure IV.16</b>	Convergence de la déviation de la tension par PSO-CI avec SVC de dix essais.	66
<b>Figure IV.17</b>	Convergence de la déviation de la tension par PSO-FC avec SVC de dix essais.	66

<b>Figure IV.18</b>	Convergence de la déviation de la tension par PSO-TVAC avec SVC de dix essais.	66
<b>Figure IV.19</b>	Convergence de DV et IC Multi-Objectifs par PSO-TVAC avec SVC.	69
<b>Figure IV.20</b>	Convergence de DP et IC Multi-Objectifs par PSO-TVAC avec SVC.	69
<b>Figure IV.21</b>	Amplitude de tensions des JDB trouvé par PSO-TVAC et SVC avec FMO	70
<b>Figure IV.22</b>	Coût d'investissement de SVC trouvé par PSO-TVAC avec FMO.	70
<b>Figure IV.23</b>	Pertes actives de branches trouvé par PSO-TVAC et SVC avec FMO.	70
<b>Figure IV.24</b>	Coût d'investissement de SVC trouvé par PSO-TVAC avec FMO.	70
<b>Figure IV.25</b>	Convergence de DV trouvé par PSO-TVAC avec TCSC .	71
<b>Figure IV.26</b>	Convergence de DP trouvé par PSO-TVAC avec TCSC .	71
<b>Figure IV.27</b>	Amplitude de tensions des JDB trouvé par PSO-TVAC avec TCSC.	72
<b>Figure IV.28</b>	Pertes Actives de lignes trouvé par PSO-TVAC avec TCSC.	72
<b>Figure IV.29</b>	Convergence DV et IC Multi-Objectifs par PSO avec TCSC.	74
<b>Figure IV.30</b>	Convergence de DP et IC Multi-Objectifs par PSO avec TCSC.	74
<b>Figure IV.31</b>	Amplitude de tensions des JDB trouvé par PSO-TVAC et TCSC avec FMO.	75
<b>Figure IV.32</b>	Coût d'investissement de TCSC trouvé par PSO-TVAC avec FMO.	75
<b>Figure IV.33</b>	Pertes actives de lignes trouvé par PSO-TVAC et TCSC avec FMO.	75
<b>Figure IV.34</b>	Coût d'investissement de TCSC trouvé par PSO-TVAC avec FMO.	75
<b>Figure IV.35</b>	Convergence de la Fonction Multi-Objectifs par PSO-TVAC avec coordination.	76
<b>Figure IV.36</b>	Amplitude de tensions des trouvé par PSO-TVAC et coordination avec FMO.	77
<b>Figure IV.37</b>	Pertes actives de lignes trouvé par PSO-TVAC et coordination avec FMO.	77

---

## *LISTE DES TABLEAUX*

<b>Chapitre II</b>		
<b>Tableau II.1</b>	Application des FACTS à la résolution des problèmes dans le réseau	39
<b>Chapitre IV</b>		
<b>Tableau IV.1</b>	Amplitude de tensions du réseau électrique IEEE à 30-bus (Cas 1 et 2).	58
<b>Tableau IV.2</b>	Pertes actives de lignes du réseau électrique IEEE 30-bus (Cas 1 et 2).	59
<b>Tableau IV.3</b>	Les paramètres des algorithmes PSO-IC, PSO-FC et PSOTVAC.	60
<b>Tableau IV.4</b>	Optimisation DV par les trois approches proposées avec SVC.	62
<b>Tableau IV.5</b>	Optimisation DP par les quatre approches proposées avec SVC.	64
<b>Tableau IV.6</b>	Comparaison au niveau d'optimalité entre les trois approches proposées	67
<b>Tableau IV.7</b>	Comparaison au niveau d'itération entre les trois approches proposées.	67
<b>Tableau IV.8</b>	Optimisation simultanément DV-IC et DP-IC par l'approche PSO-TVAC avec SVC.	69
<b>Tableau IV.9</b>	Optimisation individuellement de DV et DP par l'approche PSO-TVAC avec TCSC.	72
<b>Tableau IV.10</b>	Optimisation simultanément DV-IC et DP-IC par l'approche PSO-TVAC avec TCSC.	74
<b>Tableau IV.11</b>	Optimisation simultanément DV et DP par l'approche PSO-TVAC avec coordination.	74

## *Introduction Générale*

Les réseaux électriques jusqu'à ces dernières années sont contrôlés avec des dispositifs mécaniques ayant un temps de réponse plus au moins long et avec lesquels l'action d'amorçage et de réamorçage ne peut être répétitivement exécutée à une fréquence élevée. Pour assurer un meilleur contrôle du réseau, des dispositifs connus sous le nom des FACTS «Flexible Alternatif Current Transmission System » sont de nos jours utilisés. Ces derniers font en général appel à de l'électronique de puissance, des microprocesseurs, de l'automatique, des télécommunications et des logiciels pour parvenir à contrôler les systèmes de puissance. Ce sont des éléments de réponse rapide. Ils donnent en principe un contrôle plus souple de l'écoulement de puissance. Ils donnent aussi la possibilité de charger les lignes de transit à des valeurs près de leur limite thermique, et d'augmenter ainsi la capacité de transfert de valeurs près de leur limite thermique, et d'augmenter ainsi la capacité de transfert de puissance d'une région à une autre. Ils limitent aussi les effets des défauts et de défaillances de l'équipement, et stabilisent le comportement du réseau électrique [1].

La demande de puissance a une croissance constante mais géographiquement irrégulière. Les centrales qui génèrent l'énergie sont souvent éloignées des charges importantes et la localisation des nouvelles centrales dépend essentiellement des autorisations administratives et du respect de l'environnement, comme nous l'avons vu ci-dessus.

Pour satisfaire la demande d'énergie sous ces conditions contradictoires, les services publics font de plus en plus appel, pour des problèmes économiques et d'amélioration de la sécurité, aux échanges internationaux de puissance, ce qui demande une interconnexion entre des systèmes prévus indépendants au départ. L'augmentation du maillage associé au mode de transit libre de puissance à travers les réseaux développe des boucles de puissance et des lignes en parallèle, ce qui surcharge certaines lignes, de détériorer le profil de tension et de diminuer la stabilité du réseau.

La motivation principale de ce travail de recherche est la situation actuelle dans beaucoup de pays au monde est caractérisée par les tendances suivantes :

1-Augmentation de la consommation d'électricité

2-Contraintes écologiques et administratives

3-Contraintes opérationnelles

4-Depuis la création des grands réseaux électriques au 20ième siècle, de grandes pannes d'électricité (blackouts), phénomènes désastreux, se sont produites régulièrement au monde.. À partir des données disponibles, certains incidents graves dans 10 blackouts de 1965 à 2005 ont été analysés dans cette se référant que, l'écroulement de tension du réseau est 6/10 et les cascades de surcharges est 7/10 se sont produits avec une fréquence plus élevée par rapport des autres phénomènes désastreux qui conduisent à blackouts.

Cela montre que l'écroulement de la tension et la cascade de surcharge sont les incidents principaux qui mènent aux l'instabilité des réseaux électriques.

### **Objectifs du ce mémoire**

L'objectif principal de cette thèse est consiste à l'amélioration de l'efficacité des réseaux électriques face aux différentes conditions sévères, tout en utilisant les méthodes métaheuristiques pour le choix des emplacements optimales des dispositifs FACTS. La méthodologie à suivre pour atteindre l'objectif principal de notre travail se résume dans les étapes suivantes :

1- En premier lieu, nous avons commencé par la résolution des problèmes d'écoulement de puissance en présence des dispositifs FACTS.

2- L'optimisation, individuellement, de la déviation de la tension et les pertes actives de transmission, et cela par l'utilisation des méthodes métaheuristiques pour le choix optimal de la taille, du nombre et ainsi de l'emplacement des dispositifs FACTS. Donc cette étape est formulée comme un problème d'optimisation mono-objectif.

3- L'optimisation, simultanément, de la déviation de tension, les pertes actives de transmission et ainsi que le cout d'investissement des dispositifs FACTS, c'est la notion de l'optimisation

### **Présentation du mémoire**

Ce mémoire est constitué de quatre chapitres comme suit :

1- Dans le premier chapitre Nous avons analyse sur l'écoulement de puissance des réseaux standards IEEE en utilisant les algorithmes de Newton-Raphson.

- 2- Dans le deuxième chapitre on montre la Généralité et Modélisation sur les systèmes FACTS
- 3- Dans le troisième chapitre on montre la méthode d'optimisation par Essaim de particules.
- 4- Dans le quatrième chapitre on présente le résultat de ce programme.

En fin une conclusion générale est donnée pour conclure le travail accompli.

# *Chapitre I*

*Ecoulement de puissance  
et la compensation  
de la puissance  
réactive*



## Chapitre I

### Ecoulement de puissance et la compensation de la puissance réactive

#### I.1. Introduction :

L'écoulement de puissance (power flow) s'intéresse à l'étude des grandeurs électriques au niveau des jeux de barres, il nous montre l'état des réseaux électriques (bonne ou mauvais), on va utiliser les méthodes numériques par exemple Newton-Raphson et Gauss Seidel pour résoudre le problème de l'écoulement de puissance.

#### I.2. Objectifs de l'étude de l'écoulement de puissance :

L'étude de la répartition de charge permet :

- L'équilibre entre la production et la demande de l'énergie électrique.
- Le maintien des tensions aux jeux de barres entre les limites tolérées ( $V_{min} \leq V \leq V_{max}$ ).
- Pour éviter l'excès des pertes de puissance dans les lignes et les transformateurs ...etc.
- Le contrôle de la puissance réactive, c'est-à-dire le maintien de celle-ci entre deux limites ( $Q_{min} \leq Q \leq Q_{max}$ ), pour éviter l'excès des coûts d'utilisation de la puissance réactive.
- L'interconnexion entre les centrales et les réseaux a pour but d'accroître la sécurité d'alimentation des usagers.
- D'éviter les défauts sur les réseaux, c'est à dire les risques de surcharge des lignes, des transformateurs, et les risques de court-circuit... [2].

#### I.3. Modélisation des éléments du réseau électrique :

Un réseau d'énergie électrique comprend des génératrices, des lignes de transport et distribution, et un ensemble de consommateurs, qui constituent la charge de réseau, en outre le réseau comporte également des transformateurs et des appareils de protection. L'ensemble des systèmes électrique comporte en gros trois sous-systèmes :

- ✓ Production (génératrices).
- ✓ Transport, répartition et distribution (lignes).
- ✓ Utilisation (consommateurs).

Pour étudier un réseau d'énergie électrique complexe, des modèles ou schémas équivalents de ces principaux composants (générateurs, différents types de transformateurs, lignes et charges) sont établis.

### I.3.1. Modèle du générateur :

Une machine synchrone est une machine à courant alternatif, dans laquelle la fréquence de la tension induite engendrée et la vitesse sont en rapport constant. Elle est composée : d'un induit fixe, un inducteur tournant. On appelle une machine synchrone toutes les machines qui tournent exactement à la vitesse correspondant à la fréquence des courants et des tensions à ses bornes.

Les machines de faible vitesse angulaire. Pour les grandes machines à grande vitesse (3000 tr/min, dans les centrales à fuel ou charbon), (1500 tr/min dans les centrales nucléaires), on utilise des rotors lisses à entrefer constant.

Le schéma équivalent est représenté par la figure (I.1) [3].

$E_0$ : La fem à vide

$E_a$ : la fem en charge

$V$ : Tension de sortie.

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

$X_a$ : Réactance de fuite

$X_s = X_a + X_{ar}$  Réactance synchrone

$R_e$ : Résistance d'enroulement

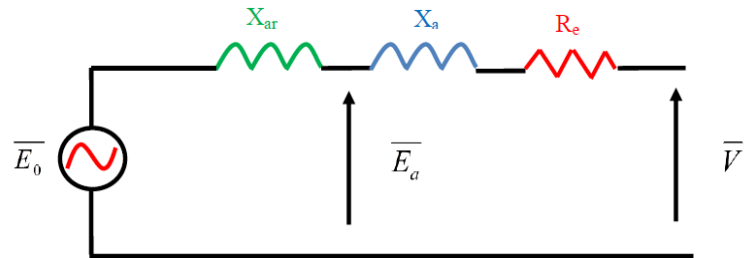


Figure I. 1: Modèle d'une génératrice

Dans le calcul d'écoulement de puissance, il est représenté par une source de tension

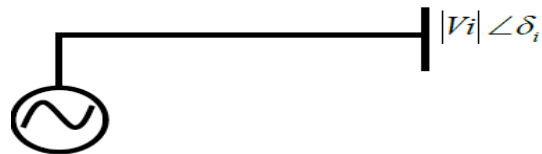


Figure I.2 : Source de tension.

$S_i = P_i + jQ_i$  : La puissance apparente délivré par le générateur.

$V_i = |V_i|e^{-j\delta_i}$ : La tension simple.

### I.3.2. Modèle de la ligne de transport :

Une ligne électrique entre les nœuds  $i$  et  $j$  sera donc représentée par le schéma en  $\pi$  comme indiqué sur la Figure (I-3) comprenant une impédance série ou longitudinale  $Z_{ij} = R_{ij} + jX_{ij}$  (avec  $R_{ij}$  et  $X_{ij}$  respectivement résistance totale et inductance totale de la ligne) et une admittance en parallèle  $y_{10} = y_{20} = (G + jB)/2$ , avec ( $G$  et  $B$  étant respectivement la conductance totale et la susceptance totale d'ordre direct de la ligne).

Les pertes transversales par effet couronne dans le cas des lignes de transport sont négligeables. Il n'y a donc pas de courant résistif dérivé et on admet que la conductance transversale  $G$  est nulle [4].

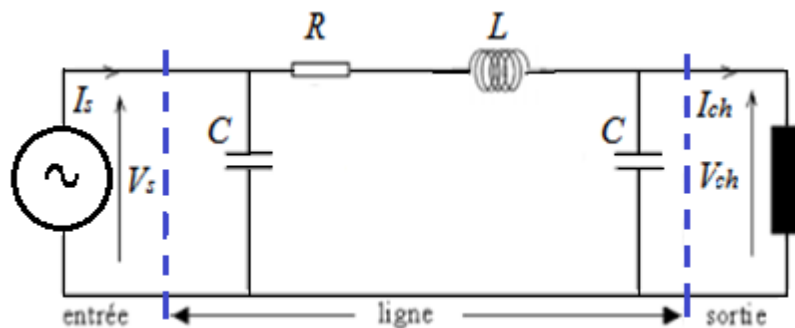


Figure I. 3: Modèle en  $\pi$  d'une ligne électrique.

### I.3.3. Modèle de la charge électrique :

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 :  $S_{Li} = P_{Li} + jQ_{Li}$

où  $S_{Li}$  est la puissance complexe de la charge,  $P_{Li}$  la puissance active et  $Q_{Li}$  la puissance réactive. La puissance réactive  $Q_{Li}$  peut être positive ou négative selon que la charge est de nature inductive respectivement capacitive[5].

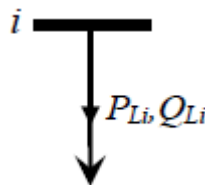


Figure I. 4: Modèle de la charge électrique

### I.3.4. Modèle de l'élément shunt :

Dans la plupart des cas, les éléments shunt sont des dispositifs destinés à la compensation de l'énergie réactive et la tenue de la tension, Chaque élément connecté au réseau sera modélisé, suivant le cas, par une admittance équivalente  $y$  de la forme [5]:

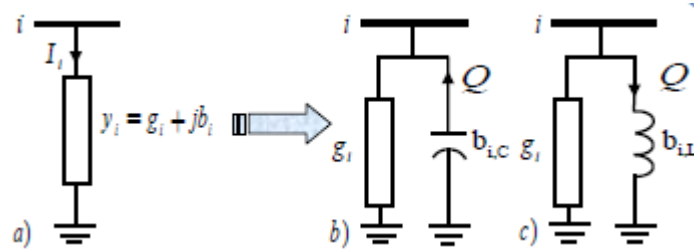


Figure I. 5: Modèle de l'élément shunt.

Le symbole général représentant un élément shunt est donné à la figure. 2.3 (a) La susceptance  $b_{i0}$  peut être inductive ou capacitive. Dans le premier cas, l'élément consomme de la puissance réactive figure. 2.3 (b), alors qu'il en fournit au système dans le second figure. 2.3 (c).

### I. 3.5 Modélisation d'un transformateur :

Un transformateur de l'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 (I -5) [4].

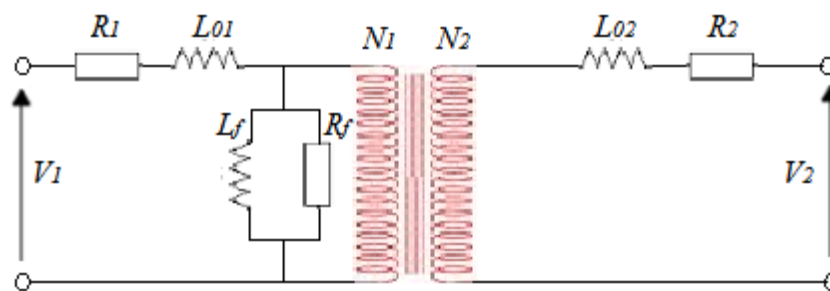


Figure I.6 : Modèle des transformateurs.

#### I.4. Analyse de l'écoulement de puissance :

L'étude de l'écoulement de puissance est une étape primordiale de toute analyse sérieuse d'un réseau électrique. En effet, elle nous permet de calculer les grandeurs d'un réseau en régime permanent équilibré à savoir les modules et phases des tensions en tout point du réseau. A partir de ces dernières, on peut calculer les courants dans les lignes de transport, les puissances actives et réactives transitées et les pertes de puissances provoquées lors du transport d'énergie électrique. Cette analyse est très importante pour les études, la planification et l'exploitation d'un réseau électrique [2].

#### I.5. Classification des variables de l'écoulement de puissance :

Les grandeurs électriques nécessaires pour l'analyser de LE.P sont : le module de tension  $|V|$  et l'angle de tension ' $\delta$ '; la puissance active (P); la puissance réactive (Q).

Généralement, le fonctionnement du système électrique peut être décrit en fonction de six variables pour chaque noeud considéré [6]:

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

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

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

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

Ces variables sont généralement divisées en trois groupes :

##### I.5.1. Les variables incontrôlables :

Ce sont les puissances active et réactive liées à la consommation  $P_D$ ,  $Q_D$ . Ses variables sont représentées par un vecteur P [6].

$$P = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ - \\ - \\ P_n \\ P_{n+1} \\ P_{n+1} \\ - \\ - \\ P_{2n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} PD_1 \\ PD_2 \\ - \\ - \\ PD_n \\ QD_1 \\ QD_2 \\ - \\ - \\ QD_n \end{bmatrix} \quad (I-1)$$

### I.5.2. Les variables dépendantes ou d'état :

Les tensions en module et en phase représentant l'état du système. Ses variables sont représentées par un vecteur X. [6].

$$X = \begin{bmatrix} X1 \\ X2 \\ - \\ - \\ Xn \\ Xn + 1 \\ Xn + 1 \\ - \\ - \\ X2n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta1 \\ \delta2 \\ - \\ - \\ \delta n \\ |V1| \\ |V2| \\ - \\ - \\ |Vn| \end{bmatrix} \quad (I-2)$$

### I.5.3. Les variables indépendantes ou de contrôle :

Ce sont généralement les puissances actives et réactive générées. On peut aussi, selon des cas, considérer des tensions aux nœuds de génération ou les rapports de transformation des transformateurs avec régleur en charge, comme variable de contrôle. Ses variables sont représentés par un vecteur U [7].

$$U = \begin{bmatrix} U1 \\ U2 \\ - \\ - \\ Un \\ Un + 1 \\ Un + 1 \\ - \\ - \\ U2n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} PG1 \\ PG2 \\ - \\ - \\ PGn \\ QG1 \\ QG2 \\ - \\ - \\ QGn \end{bmatrix} \quad (I-3)$$

## I.6. Classification des jeux de barres

Il y a quatre grandeurs fondamentales associées à chaque jeu de barres  $i$  du réseau, à savoir le module de tension  $V_i$ , la phase de tension  $\delta_i$ , la puissance active injectée  $P_i$  et la puissance réactive injectée  $Q_i$ . Pour chaque jeu de barres, deux variables doivent être spécifiées au préalable et les deux autres sont à calculer [8].

Dans l'analyse de l'écoulement de puissance, les jeux de barres du système sont classés en trois catégories :

#### **Jeu de barres de référence ( $|V|, \delta$ )**

Le jeu de barres de référence est choisi parmi ceux où un générateur est connecté. Le rôle de ce jeu de barres est de fournir la puissance supplémentaire nécessaire pour compenser les pertes de transmission, car celles-ci ne sont pas connues d'avance. En plus, ce jeu de barres sert de référence pour les phases des tensions. Par convention, ce jeu de barres est identifié par le jeu de barres N°1, dont le module et la phase de tension sont toujours spécifiés ( $V_1 = 1$  pu et  $\delta_1 = 0^\circ$ ). Par conséquent, les puissances  $P_1$  et  $Q_1$  sont inconnues, du fait que  $P_{G1}$  et  $Q_{G1}$  ne sont pas spécifiées d'avance [9].

#### **Jeu de barres de contrôle (PV bus)**

Chaque jeu de barres du système dont le module de tension est maintenu constant est considéré comme un jeu de barres à tension contrôlée ou jeu de barres générateur. Ce type de jeux de barres est connecté avec un générateur. Au niveau de ce jeu de barres,  $\delta_i$  et  $V_i$  sont des grandeurs spécifiées (connues). Donc,  $Q_i$  n'est pas connue à l'avance étant donné que  $Q_{Gi}$  est inconnue. Il en est de même pour  $\delta_i$  [9].

#### **Jeu de barres de charge (PQ bus)**

Tous les jeux de barres du réseau dont l'injection des puissances actives et réactives est donnée, sont considérés comme des jeux de barres de charge. Pour ce type de noeud, les puissances active  $P_i$  et réactive  $Q_i$  sont connues et la procédure de l'écoulement de puissance donne les valeurs de  $V_i$  et  $\delta_i$  auparavant inconnues [9].

## I.7. Les équations de l'écoulement de puissance :

La formulation mathématique (modélisation) résulte en un groupe d'équations non linéaires reliant les variables aux éléments d'une matrice caractérisant la physique du système. Ces équations sont établies en utilisant les relations de noeud ou de boucle. Leurs coefficients dépendent de la sélection du courant ou de la tension comme variable de base, alors une matrice d'admittances ou d'impédances est utilisée.

### I.7.1 Les équations aux J.d.B de charge :

Les puissances active et réactive à chaque J.d.B « i » sont :

$$P_i - j Q_i = V_i^* \cdot I_i \quad (\text{I-4})$$

$$\text{Avec: } I_i = \frac{P_i - j Q_i}{V_i^*} \quad (\text{I-5})$$

Dans la formulation de l'équation du réseau, si les éléments shunts de mise à la terre sont inclus dans la matrice des paramètres l'équation (I-5) donne le courant total au J.d.B. D'un autre côté, si les éléments shunts du réseau ne sont pas inclus.

Le courant total au J.d.B « i » est:

$$I_i = \frac{P_i - j Q_i}{V_i^*} - Y_i \cdot V_i \quad (\text{I-6})$$

$Y_i$ : Admittance totale shunt au J.d.B « i ».

$Y_i \cdot V_i$ : Courant de shunt circulant du J.d.B « i » vers la terre.

### I.7.2. Exemple d'un système à deux J.d.B :

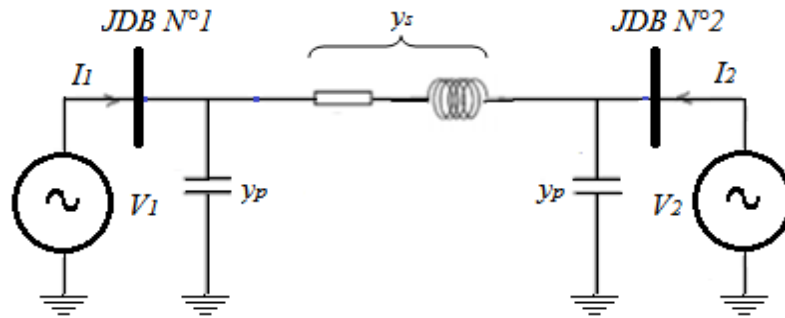


Figure I.7 : Système à deux J.d.B.

On note que:

$$\begin{cases} S_1 = S_{G1} - S_{D1} \\ S_2 = S_{G2} - S_{D2} \end{cases} \quad (\text{I-7})$$

Et en générale:

$$S_i = S_{Gi} - S_{Di} \quad (\text{I-8})$$

$$\begin{cases} S_i = P_i - j Q_i = (P_{Gi} + j Q_{Gi}) - (P_{Di} + j Q_{Di}) \\ S_i = (P_{Gi} - P_{Di}) + j(Q_{Gi} - Q_{Di}) \end{cases} \quad (\text{I-9})$$

Au niveau de J.d.B «1 »

$$I_1 = y_p \cdot V_1 + y_s (V_1 - V_2) = (y_p + y_s) V_1 - y_s \cdot V_2 \quad (\text{I-10})$$

On sait que:

$$S_1 = V_1 \cdot I_1^* \Rightarrow I_1 = \frac{S_1^*}{V_1} \quad (\text{I-11})$$

Au niveau de J.d.B « 2 »

$$I_2 = y_p \cdot V_2 + y_s (V_2 - V_1) = (y_p + y_s) V_2 - y_s \cdot V_1 \quad (\text{I-12})$$

Avec:

$$S_2 = V_2 \cdot I_2^* \Rightarrow I_2 = \frac{S_2^*}{V_2^*} \quad (\text{I-13})$$

Alors on peut écrire (III-7) (III-9) sous la forme :

$$\begin{cases} I_1 = Y_{11} \cdot V_1 - Y_{12} \cdot V_2 \\ I_2 = Y_{21} \cdot V_1 - Y_{22} \cdot V_2 \end{cases} \quad (\text{I-14})$$

Avec:

$$Y_{11} = y_p + y_s \quad , \quad Y_{22} = y_p + y_s$$

$$Y_{12} = -y_s \quad , \quad Y_{21} = -y_s$$

$$Y_{\text{Bus}} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \quad (\text{I-15})$$

En utilisant les équations (I-10) et (I-12) on obtient:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (\text{I-16})$$

Et ainsi de suite. On peut généraliser la méthode de formulation comme suit pour le système à « n » J.d.B connectés entre eux

$$\begin{aligned} I_1 &= \left( \sum_{i=1, i \neq n}^m Y_{1i} \right) V_1 + (-y_{12}) V_2 + \dots + (-y_{1n}) V_n \\ &\cdot \\ &\cdot \\ &\cdot \\ &\cdot \\ I_n &= (-y_{n1}) V_1 + (-y_{n2}) V_2 + \dots + \left( \sum_{i=1, i \neq n}^m Y_{ni} \right) V_n \end{aligned} \quad (\text{I-17})$$

La matrice admittance est donc :

$$Y_{\text{Bus}} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1, i \neq n}^m Y_{1i} & \cdots & -Y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ -Y_{n1} & \cdots & \sum_{i=1, i \neq n}^m Y_{ni} \end{bmatrix} \quad (\text{I-18})$$

$$I_{\text{Bus}} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (\text{I-19})$$

$$V_{\text{Bus}} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (\text{I-20})$$

### I.7.3 Calcul de la puissance au niveau de J.d.B :

On a:

$$S_i = (P_{Gi} - P_{Di}) + j(Q_{Gi} - Q_{Di}) = P_i + j Q_i$$

Alors:

$$S_i^* = P_i - jQ_i = V_i^* \cdot I_i$$

$$S_i^* = V_i^* \cdot \sum_{j=1}^n Y_{ij} \cdot V_j \quad (\text{I-21})$$

En coordonnées polaires:

$$V_i = |V_i| \angle \delta_i \quad (\text{I-22})$$

$$Y_i = |Y_i| \angle \gamma_i \quad (\text{I-23})$$

$$S_i^* = P_i - jQ_i = V_i^* \cdot \sum_{j=1}^n Y_{ij} \cdot V_j = |V_i| \cdot |Y_{ij}| \cdot |V_j| \cdot e^{j(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij})} \quad (\text{I-24})$$

Donc

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| \cdot |Y_{ij}| \cdot |V_j| \cdot \cos(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) \quad (\text{I-25})$$

$$Q_i = - \sum_{j=1}^n |V_i| \cdot |Y_{ij}| \cdot |V_j| \cdot \sin(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) \quad (\text{I-26})$$

### I.7. 4 Les équations d'écoulement dans les lignes :

La détermination des valeurs des puissances réparties dans les lignes de transport est indispensable afin de localiser les lignes électriques surchargées et de calculer la valeur des pertes de puissance.

Le courant circulant entre les deux jeux de barres  $i$  et  $K$  est considéré positif lorsqu'il est dirigé de  $i$  vers  $K$  et son expression est la suivante [10] :

$$I_{ik} = y_{ik}(V_i - V_k) + V_i y_{ik}/2 \quad (\text{I-27})$$

$y_{ik}$ : L'admittance de la ligne entre les deux jeux de barres  $i$  et  $K$  ;

$V_i y_{ik}/2$ : La contribution shunt du courant au jeu de barres  $i$  ;

$y_{ik}$ : L'admittance shunt au jeu de barres.

La puissance écoule, active et réactive, est :

$$P_{ik} - jQ_{ik} = V_i^* I_{ik} \quad (\text{I-28})$$

$$P_{ik} - jQ_{ik} = V_i^*(V_i - V_k) y_{ik} + V_i^* V_i y_{ik} / 2 \quad (\text{I-29})$$

Soient  $P_{ki}$  et  $Q_{ki}$  les puissances active et réactive réparties du J.d.B «  $k$  » vers le J.d.B «  $i$  ».

$$I_{ki} = y_{ki}(V_k - V_i) + V_k y_{ki} / 2 \quad (\text{I-30})$$

$$P_{ki} - jQ_{ki} = V_i^*(V_k - V_i) y_{ki} + V_k^* V_k y_{ki} / 2 \quad (\text{I-31})$$

La valeur des pertes de puissance dans la ligne entre les deux jeux de barres  $i$  et  $K$  est la somme algébrique de répartition des puissances déterminées à partir des équations (I.29) et (I.31).

### I.7. 5 Les pertes de puissance dans lignes :

Au niveau de J.d.B la puissance apparente écoule est la différence entre la puissance générée et la puissance demandée. Pour un J.d.B «  $i$  » :

On a:

$$S_i = Q_{Gi} - Q_{Di} \quad (\text{I-32})$$

Avec:

$$P_i = (P_{Gi} - P_{Di}) = F_{ip}$$

$$Q_i = (Q_{Gi} - Q_{Di}) = F_{iq}$$

$$\sum P_i = \sum F_{ip} = \sum (P_{Gi} - P_{Di}) \quad (I-33)$$

$$\sum Q_i = \sum F_{iq} = \sum (Q_{Gi} - Q_{Di}) \quad (I-34)$$

Le système d'équations (I-33) (I-34) exprime l'expression des pertes.

Ou bien on peut calculer les pertes par une autre méthode, on calcule les pertes au niveau des lignes puis la somme algébrique donne l'expression des pertes.

$$P_{Lij} = P_{ij} + P_{ji} \quad (I-35)$$

$$Q_{Lij} = Q_{ij} + Q_{ji} \quad (I-36)$$

## **I.8. Résolution des équations de l'écoulement de puissance :**

La solution du système d'équations décrivant le modèle est basée sur une méthode numérique itérative à cause de leurs non linéarités. Elle doit satisfaire les lois de Kirchhoff dont l'une ou l'autre est utilisée comme test de convergence. Les contraintes introduites dans la solution sont les limites physiques des génératrices et les tolérances permises sur les amplitudes et les phases des tensions de barre du réseau.

Différentes techniques de solution sont développées afin de faire ressortir la particularité de la formulation. Ce sont [4]:

1. La méthode de Newton-Raphson
2. La méthode de Gauss.
3. La méthode de Gauss-Seidel
4. La méthode des résidus

### **I. 8.1 Méthodes de Newton-Raphson :**

Cette méthode nécessite plus de temps par itération que celle de Gauss-Seidel, alors qu'elle ne demande que quelques itérations même pour les grands réseaux. Par conséquent, cette méthode permet de réduire fortement le temps d'exécution du calcul de l'écoulement de puissance surtout pour les grands réseaux. Par contre, elle nécessite une très grande mémoire de stockage[11].

Les expressions des puissances actives et réactives de chaque nœud  $i$  du réseau peuvent se mettre sous la forme ci-dessous :

$$\left. \begin{aligned} P_i &= \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j + \gamma_{ij}) = F_{ip} \\ Q_i &= - \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j + \gamma_{ij}) = F_{iq} \end{aligned} \right\} i = 1, 2 \dots n \quad (\text{I-37})$$

Avec :

$i = 1$ : Représente le nœud de référence

$n$ : Nombre de nœuds

$i$ : Numéro du nœud

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

$$\left. \begin{aligned} P_i &= P_i^{(0)} + \dots \left( \frac{\partial P_i}{\partial \delta_n} \right)^{(0)} \Delta \delta_n^{(0)} + \left( \frac{\partial P_i}{\partial |V|_2} \right)^{(0)} \Delta |V|_2^{(0)} + \dots \left( \frac{\partial P_i}{\partial |V|_2} \right)^{(0)} \Delta |V|_2^{(0)} \left( \frac{\partial P_i}{\partial \delta_2} \right)^{(0)} \Delta \delta_2^{(0)} \\ Q_i &= Q_i^{(0)} + \dots \left( \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_n} \right)^{(0)} \Delta \delta_n^{(0)} + \left( \frac{\partial Q_i}{\partial |V|_2} \right)^{(0)} \Delta |V|_2^{(0)} + \dots \left( \frac{\partial Q_i}{\partial |V|_2} \right)^{(0)} \Delta |V|_2^{(0)} \left( \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_2} \right)^{(0)} \Delta \delta_2^{(0)} \end{aligned} \right\} (\text{I.38})$$

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

Avec

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_i^{(0)} &= P_i - (P_i)^{(0)} \\ \Delta Q_i^{(0)} &= Q_i - (Q_i)^{(0)} \end{aligned} \right\} (\text{I-39})$$

Les deux systèmes d'équation (I.38) et (I.39) donnent :

$$\begin{bmatrix} P_i^{(0)} \\ \vdots \\ \left( \frac{\Delta P_n}{\Delta Q_2} \right)^{(0)} \\ \vdots \\ Q_n^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left( \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} \right)^{(0)} & \dots & \left( \frac{\partial P_2}{\partial \delta_n} \right)^{(0)} & \left( \frac{\partial P_2}{\partial |V|_2} \right)^{(0)} & \dots & \left( \frac{\partial P_2}{\partial |V|_n} \right)^{(0)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left( \frac{\partial P_n}{\partial \delta_2} \right)^{(0)} & \dots & \left( \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} \right)^{(0)} & \left( \frac{\partial P_n}{\partial |V|_2} \right)^{(0)} & \dots & \left( \frac{\partial P_n}{\partial |V|_n} \right)^{(0)} \\ \left( \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} \right)^{(0)} & \dots & \left( \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n} \right)^{(0)} & \left( \frac{\partial Q_2}{\partial |V|_2} \right)^{(0)} & \dots & \left( \frac{\partial Q_2}{\partial |V|_n} \right)^{(0)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left( \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2} \right)^{(0)} & \dots & \left( \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} \right)^{(0)} & \left( \frac{\partial Q_n}{\partial |V|_2} \right)^{(0)} & \dots & \left( \frac{\partial Q_n}{\partial |V|_n} \right)^{(0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_n^{(0)} \\ \vdots \\ \frac{(\Delta \delta_n)^{(0)}}{\Delta V_2^{(0)}} \\ \vdots \\ \Delta V_n^{(0)} \end{bmatrix} \quad (\text{I-40})$$

Donc on peut écrire le système comme suit :

$$\begin{bmatrix} \Delta P^{(0)} \\ \Delta Q^{(0)} \end{bmatrix} = [J^{(0)}] \begin{bmatrix} \Delta \delta^{(0)} \\ \Delta |V|^{(0)} \end{bmatrix} \quad (\text{I -41})$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta^{(0)} \\ \Delta |V|^{(0)} \end{bmatrix} = [J^{(0)}]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P^{(0)} \\ \Delta Q^{(0)} \end{bmatrix} \quad (\text{I -42})$$

On rappelle que

$$\Delta \delta_i^{(k)} = \delta_i^{(k+1)} - \delta_i^{(k)} \quad (\text{I -43})$$

$$\Delta |V_i|^{(k)} = |V_i|^{(k+1)} - |V_i|^{(k)} \quad (\text{I -44})$$

L'adaptation (I.43) avec (I.44) donne :

$$\begin{bmatrix} \delta_i^{(k+1)} \\ |V|^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta^{(k)} \\ |V|^{(k)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (\text{I -45})$$

$$\begin{bmatrix} \delta_i^{(k+1)} \\ |V|^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta^{(k)} \\ |V|^{(k)} \end{bmatrix} + [J^{(k)}]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P^{(k)} \\ \Delta Q^{(k)} \end{bmatrix} \quad (\text{I -46})$$

En remplaçant l'expression de l'équation (I.42) dans l'équation ci-dessus on aura :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (\text{I -47})$$

Avec :

$$J = \begin{bmatrix} J1 & J2 \\ J3 & J4 \end{bmatrix} \quad (\text{I -48})$$

J1 , J2, J3 et J4 : sont les sous-matrices de Jacobienne

### I .8.2 Détermination des sous-matrices de Jacobienne Ji

En dérivant les équations de puissance active et réactive par rapport à  $\delta$  et  $|V|$  , on aura :

#### Sous matrice J1 :

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -|Y_{ij}||V_i||V_j| \sin(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}), \quad i \neq j \quad (\text{I -49})$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n |Y_{ij}||V_i||V_j| \sin(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}), \quad i \neq j \quad (\text{I -50})$$

#### Sous matrice J2 :

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = |Y_{ij}||V_j| \cos(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) \quad i \neq j \quad (\text{I -51})$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|Y_{ij}||V_j| \cos(\gamma_{ij}) + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n |Y_{ij}||V_j| \cos(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}), \quad i \neq j \quad (\text{I -52})$$

#### Sous matrice J3 :

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = -|Y_{ij}||V_i||V_j| \cos(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}), \quad i \neq j \quad (\text{I -53})$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n |Y_{ij}||V_i||V_j| \cos(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}), \quad i \neq j \quad (\text{I -54})$$

#### Sous matrice J4:

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = |Y_{ij}||V_j| \sin(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) \quad i \neq j \quad (\text{I -55})$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n |Y_{ij}||V_i||V_j| \sin(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) - 2|Y_{ij}||V_i| \sin(\gamma_{ij}), \quad i \neq j \quad (\text{I -56})$$

### I.8.3. 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 noeuds de charge et  $\delta_i^{(0)}$  pour les noeuds de contrôle.
- 3- On calcule  $P_i, Q_i$  qui nous donne  $\Delta P, \Delta Q$ .
- 4- Formation de la matrice Jacobienne J.
- 5- On trouve l'inverse de Jacobienne.
- 6- On calcule :

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (I-57)$$

On obtient:

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i^{(k)} \quad (I-58)$$

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + |\Delta V_i^{(k)}| \quad (I-59)$$

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

$$\max |\Delta P_i^k| \leq \varepsilon \quad (I-60)$$

$$\max |\Delta Q_i^k| \leq \varepsilon \quad (I-61)$$

8- On prend les résultats obtenus.

### I.9. La puissance réactive :

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

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

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

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

### I.9.1. Influence de l'énergie réactive

L'énergie réactive est un facteur très important qui influe sur la stabilité et l'équilibre du réseau électrique, ainsi que son fonctionnement. Les effets secondaires de ce facteur se résument dans les points suivants [13] :

- 1) La chute de tension dans les lignes et les postes de transformation.
- 2) Les pertes supplémentaires actives dans les lignes, les transformateurs et les générateurs.
- 3) Les variations de tension du réseau sont étroitement liées à la fluctuation de la puissance réactive dans le système de production.
- 4) l'échauffement des câbles d'alimentation.

### I.9.2. Chute de tension sur une ligne

Selon [16], la cause de la chute de tension à travers une impédance est due principalement au courant réactif passant dans cette impédance, ou en d'autres termes elle est due à la variation de la puissance réactive. Pour maintenir  $U_2$  constante si le courant  $I$  change, il faut varier la puissance réactive au point de raccordement de la charge.

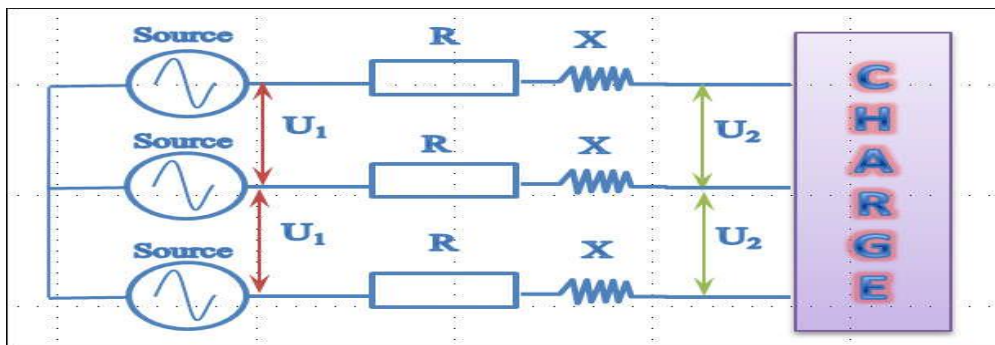


Figure I.8 : Circuit équivalent du réseau électrique

La chute de tension sur un élément de réseau s'exprime par :

$$\Delta U = \frac{R.P - X.Q}{U_2} \quad (\text{I-62})$$

Avec :

**R** : résistance de la ligne.

**X** : réactance de la ligne.

**P** : puissance active de la charge.

**Q** : puissance réactive de la charge.

L'examen de cette équation montre que pour maintenir  $U_2$  constante au niveau du consommateur.

On dispose de plusieurs solutions à savoir :

- Augmentation de la tension de départ  $U_1$ .
- Diminution de la réactance de la ligne par insertion de réactance capacitive.
- Fourniture de la puissance réactive au niveau des usagers (compensation de la puissance réactive).

Cette compensation peut être obtenue soit par :

- La connexion de capacité shunts.
- La connexion de compensateur synchrone.
- La connexion de réactance shunt (pour les faibles charges, ou charges capacitives).

### **I.9.3. Transport de l'énergie réactive :**

Le transport de l'énergie réactive par les lignes électriques cause des pertes, une diminution de la stabilité du réseau et une chute de tension à son extrémité. Afin d'éviter cela, la compensation de la puissance réactive est utilisée pour limiter ce transport de puissance réactive.

Différents appareils électriques peuvent servir à réaliser cette compensation : machines synchrones, batteries de condensateurs, inductance ou les FACTS. On distingue les compensations passives, qui fonctionnent en tout ou rien et celles actives qui sont graduelles [14].

### I.9.4 Relation entre la stabilité et la compensation d'énergie réactive :

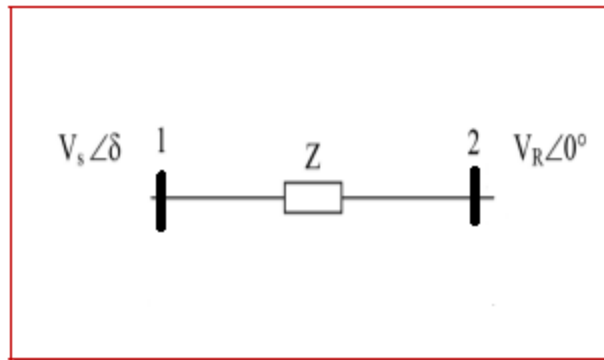
Dans un réseau à courant alternatif, la puissance a deux composants : la puissance active  $P$  et la puissance réactive  $Q$  liées par le déphasage  $\theta$  entre le courant et la tension :

$$S = P + jQ = V \cdot I(\cos \theta + j \sin \theta) \quad (\text{I-63})$$

Seule la puissance active reçue par la charge peut être transformée en énergie mécanique, thermique et électrique.

Quant à la puissance réactive, elle sert à l'aimantation des circuits magnétiques des machines électriques (transformateurs, moteurs) et de certains dispositifs tels que les lampes fluorescentes.

On considère deux nœuds connectés par une impédance  $Z$  ( $X \gg R$ ), l'un comme générateur d'une tension  $V_s$  et un angle de phase  $\delta$  et l'autre comme un nœud de puissance infinie d'une tension  $V_R$  et un angle de phase fixé à  $0^\circ$ .



**Figure I.9 :** Deux nœuds connectés par une impédance

Les expressions de puissances active et réactive sont données par :

$$P = \frac{|V_S| \cdot |V_R|}{X} \sin \delta . \quad (\text{I.64})$$

$$Q = \frac{|V_S| \cdot |V_R|}{X} \cos \delta - \frac{V^2}{X} \quad (\text{I.65})$$

Les paramètres sur lesquels il est possible d'agir pour contrôler l'écoulement de puissance sont :

- Les amplitudes de tensions aux extrémités de la ligne,
- L'angle de phase entre ces deux tensions,
- La réactance de la ligne de transmission.

Le transit des puissances active et réactive à travers cet élément produit des chutes de tension dans la ligne de transmission données par l'expression :

$$\Delta V = \frac{R \cdot P - X \cdot Q}{V} \quad (\text{I.66})$$

En pratique un système de transmission n'est jamais autorisé à fonctionner près de sa limite de régime permanent, une certaine marge doit être prévue dans la réserve de puissance afin que le système supporte les perturbations telles que les variations de charge, les défauts et les manœuvres de coupure.

Les expressions (I.65) et (I.64) montrent qu'il est souhaitable d'avoir un plan de tension  $V$  (tension à chaque point du réseau) aussi élevé que possible et de réduire le transport de la puissance réactive en la produisant le plus près possible des lieux de consommation.

Les critères justifiant la compensation des lignes sont essentiellement des critères de régime permanent : maintien de la tension en régime permanent à une valeur acceptable et augmentation de la puissance transportable de façon stable. Cependant, l'utilisation simultanée de la compensation série et de la compensation shunt inductive est très importante pour avoir une qualité d'énergie transportée le long de la ligne.

### **I.9.5. Moyens de compensation de la puissance réactive :**

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

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

#### **I.9.5.1. Les condensateurs :**

Ils ont pour rôle de fournir une partie de l'énergie réactive consommée par les charges dans le réseau. On distingue deux types :

- ✚ Des batteries de condensateurs HT, raccordées aux jeux de barres HT des postes THT/HT. Elles sont essentiellement destinées à compenser les pertes réactives sur les réseaux HT et THT.
  
- ✚ Des batteries de condensateurs MT, raccordées aux jeux de barres MT des postes HT/MT ou THT/MT. Ces batteries servent à compenser l'appel global de l'énergie réactive des réseaux de distribution aux réseaux de transport. Elles sont localisées et dimensionnées individuellement en fonction du réglage de tension.

#### **I.9.5.2. Les inductances :**

Elles sont utilisées pour compenser l'énergie réactive fournie en heures creuses par les lignes à très haute tension ou par les câbles. Elles sont soit directement raccordées au réseau, soit branchées sur les tertiaires des transformateurs. Par conséquent, elles permettent une limitation des surtensions dans le réseau.

#### **I.9.5.3. Les compensateurs synchrones :**

Les compensateurs synchrones sont des machines tournantes qui ne fournissent aucune puissance active, mais qui peuvent suivant qu'elles soient sous ou surexcitées, fournir ou absorber de la puissance réactive.

**I.9.5.4. Les compensateurs statiques :**

Ils sont constitués par l'ensemble de condensateurs et d'inductances commandées par thyristors, montés en tête-bêche dans chaque phase. Chacun d'entre eux étant ainsi conducteur pendant une demi-période. La puissance réactive absorbée par l'inductance varie en contrôlant la valeur efficace du courant qui la traverse par action sur l'angle d'amorçage des thyristors.

**I.9.5.5. Transformateurs avec prises réglables en charge**

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

Il faut prendre garde de ne pas interrompre le courant ni mettre des spires en court-circuit lors de la commutation. Cela est réalisé par l'insertion temporaire d'une inductance ou d'une résistance. La plage de réglage est typiquement de  $\pm 15\%$  avec une vingtaine de prises (échelon entre 1 et 2%). Par rapport au réglage nominal, un changement de prises correspond à une injection d'une tension additionnelle au point d'insertion du transformateur, ce qui implique une modification de la répartition de la puissance réactive dans la zone concernée.

**I.9.5.6. Les groupes de production (générateurs) :**

Les groupes de production sont bien situés pour satisfaire les besoins en énergie réactive. D'autant plus, leurs performances dynamiques leur permettent de faire face aux fluctuations brusques de la demande. En revanche, ils ne peuvent compenser que partiellement les charges réactives, en raison des chutes de tension importantes que créent les transits d'énergie réactive sur les réseaux.

**I.9.5.7. Les PSS (Power System Stabilizer):**

La structure du stabilisateur de puissance est une structure classique qui consiste en un gain, un filtre passe-haut et un ou plusieurs blocs de compensation de phase. Ces Stabilisateurs de puissance sont un moyen efficace et économique d'amélioration de la stabilité dynamique d'un système électrique].

Un choix adéquat des paramètres des PSS engendre un bon amortissement des oscillations induites par les perturbations et améliore la stabilité de l'ensemble du système.

**I.9.5.8 les dispositifs système FACTS :**

Selon l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), la définition du terme FACTS est la suivante: Systèmes de Transmission en Courant Alternatif comprenant des dispositifs basés sur l'électronique de puissance et d'autres dispositifs statiques utilisés pour accroître la contrôlabilité et augmenter la capacité de transfert de puissance du réseau. Avec leurs aptitudes à 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[15].

**I.10.Conclusion :**

Dans ce chapitre, Nous avons vu l'objectif de l'analyse de l'écoulement de puissance ainsi que les méthodes de résolution de ce problème puis on a vu l'importance de la compensation de puissance réactive ainsi que leurs dispositifs. Nous avons aussi présenté un aperçu global sur les nouveaux dispositifs de contrôle et de commande des réseaux électriques appelés FACTS comme le SVC, STATCOM, TCSC, SSSC, UPFC. Ces systèmes améliorent le transit de puissance dans les lignes et la stabilité du réseau. Grâce à la grande rapidité de réaction des contrôler d'électronique constituants les FACTS, ces dernier sont caractérisés par une grande fiabilité.

# *Chapitre II*

*Les dispositifs  
Système FACTS*



## Chapitre II

### Les dispositifs Système FACTS

#### II.1. Introduction :

Avec le développement technologique et industriel que vit le monde entier la demande d'énergie électrique est en augmentation continue et sans cesse. Pour satisfaire ces besoins et acheminer cette énergie aux points de consommation dispersés sur un large espace géographique ; les réseaux électriques, ayant des capacités de transit limitées à cause des limites thermiques des lignes, doivent s'élargir et de nouvelles lignes d'extension seront ajoutées [16].

Les problèmes des réseaux énoncés précédemment devenant plus présents d'année en année, l'**EPRI** (Electric Power Research Institute), qui représente un consortium de recherche sur les réseaux électriques et regroupant plusieurs compagnies d'électricité des Etats Unis et d'ailleurs, a lancé en 1988 le concept **FACTS** (Flexible AC Transmission System). C'est un projet à long terme qui vise à rendre l'exploitation des réseaux plus "flexibles"[17].

Aussi ces réseaux électriques de taille importantes seront confrontés par divers problèmes de fonctionnement à cause du contrôle traditionnel utilisant des systèmes de commande électromécaniques de temps de réponse lent par rapport à ces nouveaux systèmes FACTS à base d'interrupteurs statiques et de court temps de réponse (moins d'une seconde).

Aujourd'hui cette technologie FACTS s'impose pour les systèmes énergétiques en augmentant leurs capacités de transport, en améliorant le contrôle des paramètres de ces derniers donc leur assurer une flexibilité du transfert de l'énergie et améliorer sa stabilité[18].

#### II.2. Définition de l'acronyme « FACTS » :

Les FACTS peuvent être utilisés pour contrôler l'écoulement de puissance et améliorer la stabilité du système. Les systèmes de dispositifs FACTS sont employés pour le contrôle dynamique de tension, impédance et angle de phase de tension afin d'améliorer le comportement dynamique des réseaux ainsi que la répartition et l'écoulement des puissances dans les réseaux [19].

### II.3. Classification des dispositifs FACTS [20],[21]:

Depuis les premiers compensateurs, trois générations de dispositifs FACTS ont vu le jour. Elles se distinguent par la technologie des semi-conducteurs et des éléments de puissance utilisés :

1- La première génération est basée sur les thyristors classiques. Ceux-ci sont généralement utilisés pour enclencher ou déclencher les composants afin de fournir ou absorber de la puissance réactive dans les transformateurs de réglage.

2- La deuxième génération, dite avancée, est née avec l'avènement des semi-conducteurs de puissance commandables à la fermeture et à l'ouverture, comme le thyristor **GTO**. Ces éléments sont assemblés pour former les convertisseurs de tension ou de courant afin d'injecter des tensions contrôlables dans le réseau.

3- Une troisième génération de FACTS utilisant des composants hybrides et qui est adaptée à chaque cas. Contrairement aux deux premières générations, celle-ci n'utilise pas de dispositifs auxiliaires encombrants tels que les transformateurs pour le couplage avec le réseau.

Dans notre proposition, une autre classification des contrôleurs FATCS basée sur les cinq caractéristiques indépendantes :

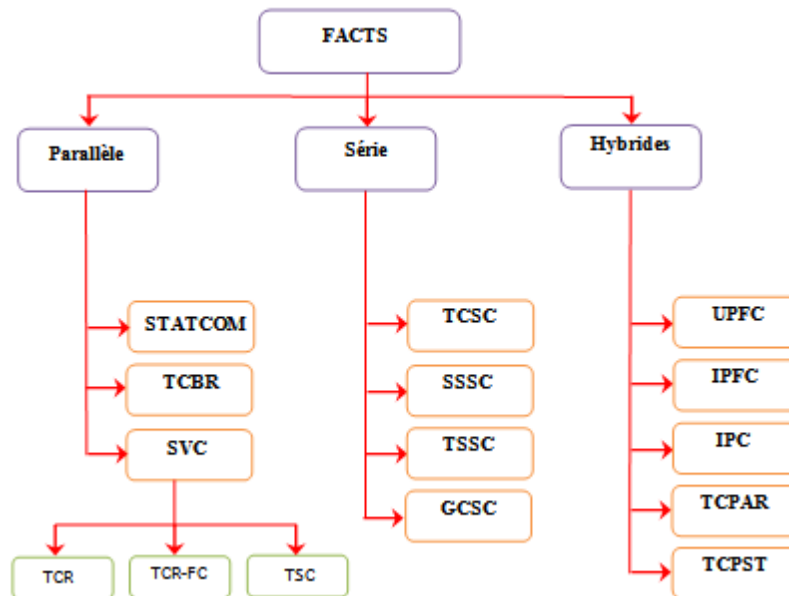
1. Selon le type de Raccordement sur le réseau (Connexion) ;
2. Selon le mode de Commutation ;
3. Selon la Fréquences de Commutation ;
4. Selon le mode de Stockage d'énergie ;
5. Selon le mode de Connexion au Port DC.

Selon ces critères, trois familles de dispositifs FACTS peuvent être mises en évidence :

- ❖ Les dispositifs shunt connectés en parallèle dans les postes du réseau.
- ❖ Les dispositifs séries insérés en série avec les lignes de transport.
- ❖ Les dispositifs combinés série-parallèle qui recourent simultanément aux deux couplages.

## II.4. Différentes catégories des FACTS :

Les dispositifs FACTS se divisent en trois importantes catégories des dispositifs shunt, série, et dispositifs combinés (shunts et séries avec le système) selon leur façon de se connecter au réseau comme représenté sur la Figure (II -1).



**Figure II.1 :** Schéma simplifié de Classification des dispositifs FACTS.

Ces catégories peuvent aussi être décomposées en deux générations selon la technologie utilisée. La première génération est à base de thyristors et la deuxième génération à base de GTO thyristors [4].

## II.5. Les principaux dispositifs FACTS :

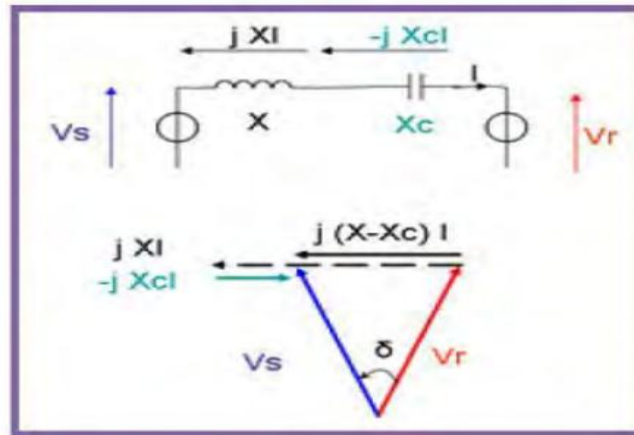
La famille des dispositifs FACTS est grande. Parmi ceux-ci, on peut distinguer :

- Compensateurs séries.
- Compensateurs shunts.
- Compensateurs hybrides (série-shunt).

### II.5.1. Dispositifs 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.

Les FACTS dans la compensation série modifient l'impédance de la ligne : la réactance ( $X$ ) de la ligne est diminuée, donc augmenter la puissance active transmissible. Cependant la puissance réactive doit être plus fournie[1].



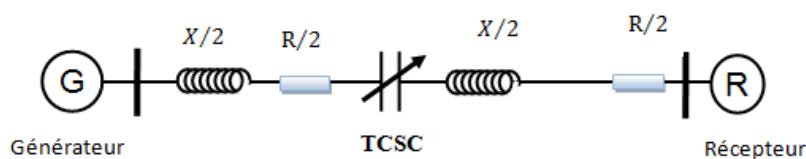
**Figure II.2 :**Compensation série.

Parmi ces compensateurs, en trouve :

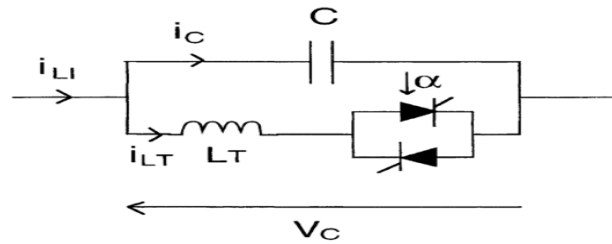
❖ **TCSC (Thyristor controlled series capacitor):**

La capacité série commandée par thyristor (TCSC : Thyristors Controlled Série Compensator) est un dispositif de compensation série, elle utilise l'électronique de puissance comme élément de base [19].

L'idée de base d'un tel modèle est simple, il s'agit d'une impédance variable placée en série sur la ligne à compenser comme la montre dans la figure(II.3) [22] :



**Figure II.3:** Ligne de transport avec un TCSC



**Figure II.4 :**Structure du TCSC.

Les principales applications des condensateurs séries commandé par thyristors sont [23]:

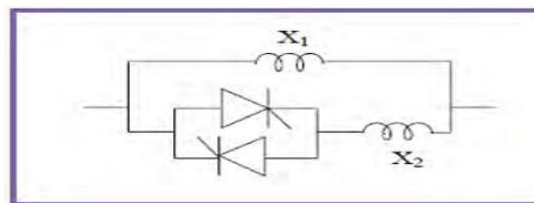
- L'augmentation du transit de la puissance dans les lignes ;
- La compensation du déséquilibre des courants de charge ;
- L'amélioration de la stabilité dynamique ;
- L'amortissement des oscillations de puissance ;
- L'interconnexion des réseaux ;
- La stabilisation de la tension .

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

Le compensateur série commuté par thyristor TSSC est le premier qui apparaît dans la famille des compensateurs série[21]. La différence entre le (TSSC) et le TCSC est que l'angle d'amorçage est soit de "90" soit de "180"[24].

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

Le TCSR est un compensateur inductif qui se compose d'une inductance en parallèle avec une autre inductance commandée par thyristors afin de fournir une réactance inductive série variable [24].



**Figure II.5 :**Structure du TCSR.

### II.5.2. Dispositifs shunts (parallèles) :

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 de tension des nœuds. Le courant réactif est injecté dans la ligne pour maintenir la magnitude du voltage. La puissance active transmissible est augmentée mais la puissance réactive sera plus fournie.

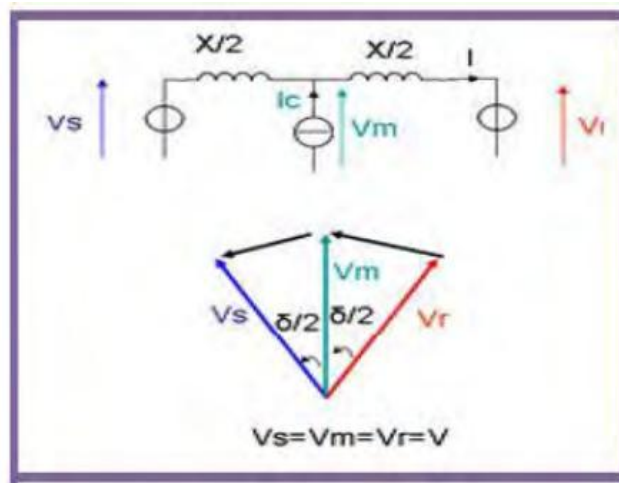


Figure II.6: Compensateur Shunt.

- Il s'agit de:

#### ❖ TCR ( Thyristor Controlled Reactor) ou TSR ( Thyristor Switched Reactor)

Dans le TCR(RCT: Réactance Commandées par Thyristors), le circuit est composé d'une réactance placé en série avec deux thyristors montés en antiparallèle. La valeur de l'inductance est continuellement changée par l'amorçage des thyristors.

Un thyristor se met à conduire quand un signal de gâchette lui est envoyé. Et la tension à ses bornes est positive, il s'arrête de conduire lorsque le courant qui le traverse s'annule. Un dispositif TCR seul n'est pas suffisant pour pouvoir compenser la puissance dans un réseau, car il ne dispose pas de source de puissance réactive. Généralement on dispose avec un TCR des bancs de condensateurs comme source de puissance réactive, et le TCR contrôle cette source de puissance [1].

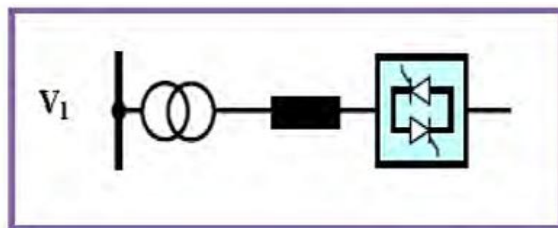


Figure II.7 :Structure du TCR (TSR).

❖ **TSC (Thyristor Switched Capacitor )**

Dans le TSC (CCT: Condensateurs Commandés par Thyristor), le circuit est composé d'un condensateur placée en série avec deux thyristors montés en antiparallèle. Les thyristors fonctionnent en pleine conduction[25].

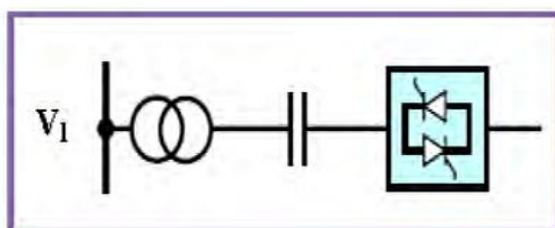


Figure II.8 :Structure du TSC.

❖ **SVC ( Static Var Compensator )**

L'association des dispositifs TCR, TSC, bancs de capacités fixes et filtres d'harmoniques constitue le compensateur plus connu sous le nom de SVC (compensateur statique de puissance réactive) (CSPR).

Pour augmenter ou diminuer la tension d'une ligne de transport, on peut brancher un condensateur ou une inductance shunt qui génère ou absorbe de la puissance réactive. Cette manœuvre peut se faire automatiquement en utilisant un compensateur statique.

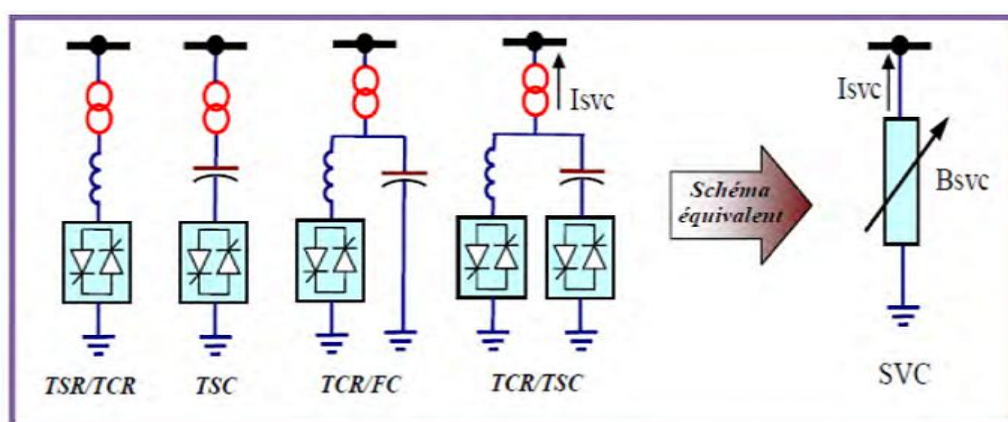


Figure II.9 : Structure du SVC.

- Les principales applications du compensateur statique de puissance réactive sont[23] :
  - ✓ Soutient de la tension en régime permanent ;
  - ✓ Compensation rapide de la puissance réactive ;
  - ✓ Stabilisation statique et transitoire de la tension ;
  - ✓ Equilibrage dynamique des charges .

### II.5.3. Dispositifs hybrides (série-shunt) :

C'est une combinaison des dispositifs séries et shunts commandé d'une manière coordonné 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.

#### ❖ UPFC (Unified Power Flow Controller):

L'UPFC (Unified Power Flow Controller), appelé aussi Déphaseur Régulateur universel (DRU) , est l'un des plus performants des composants FACTS [18] .La structure de l'UPFC est représentée dans la figure (II.10), où les connexions des deux convertisseurs peuvent être observées: un des convertisseurs (celui de gauche) est branché en parallèle dans le point i (dispositif STATCOM), l'autre convertisseur (celui de droite) est connecté en série avec la ligne entre le point i et le point j (dispositif SSSC). L'UPFC est capable d'assurer un contrôle de la tension, impédance et l'angle de ligne ainsi qu'assurer une compensation en énergie réactive [26].

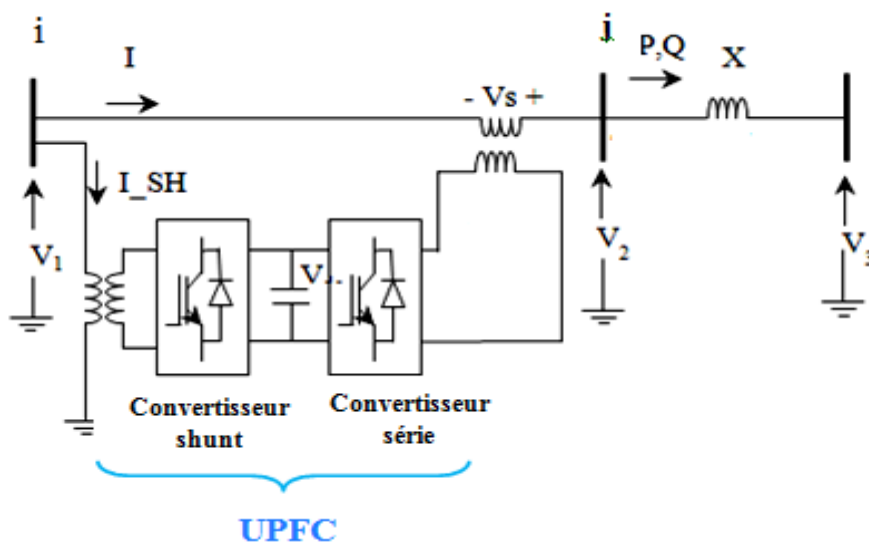
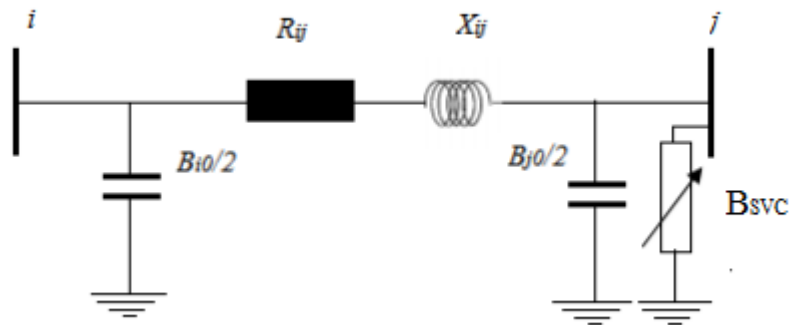


Figure II.10 : Structure de l'UPFC.

## II.6 Modélisation du SVC :

Le compensateur statique de puissance réactive est modélisé par une admittance shunt variable Figure (II -11). Le SVC étant supposé sans pertes, l'admittance est donc purement imaginaire de nature capacitive ou inductive afin de fournir, respectivement d'absorber, de la puissance réactive.



**Figure II .11 :** Modélisation d'un SVC placé en un Noeud j

La modélisation du SVC est basée sur deux modèles :

**1er modèle :** on considère le SVC comme une susceptance shunt variable.

**2eme modèle :** on considère le SVC comme une susceptance shunt variable et angle d'amorçage variable.

Le courant absorbé par le SVC est donné par l'équation :

$$I_{SVC} = jB_{SVC}V_i \quad (\text{II -1})$$

La puissance réactive absorbée par le SVC et aussi injecté dans le noeud i est donnée par l'équation

$$Q_{SVC} = -V_i^2 B_{SVC} \quad (\text{II -2})$$

La linéarisation de l'équation est donnée par

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix}^{(k)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & Q_i \end{bmatrix}^{(k)} \begin{bmatrix} \Delta \theta_i \\ \Delta B_{SVC} / B_{SVC} \end{bmatrix}^{(k)} \quad (\text{II -3})$$

Le calcul itératif de la nouvelle variable du shunt Susceptance est calculé par :

$$B_{SVC}^{(k)} = B_{SVC}^{(k-1)} + \left( \frac{\Delta B_{SVC}}{B_{SVC}} \right)^{(k)} B_{SVC}^{(k-1)} \quad (\text{II -4})$$

Cette valeur représente la valeur totale nécessaire pour maintenir les tensions dans tous les noeuds du réseau à une valeur spécifiée.

**2<sup>eme</sup> modèle :** on considère le SVC comme une susceptance shunt variable et angle d'amorçage variable.

$$Q_i = \frac{-V_i^2}{X_c X_l} \left( X_l - \frac{X_c}{\pi} (2\pi - \alpha_{SVC}) + \sin(2\alpha_{SVC}) \right) \quad (\text{II -5})$$

De l'équation précédente, la linéarisation du SVC est donnée par :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix}^{(k)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{2V_i^2}{\pi X_l} (\cos(2\alpha_{SVC}) - 1) \end{bmatrix}^{(k)} \begin{bmatrix} \Delta \theta_i \\ \Delta \alpha_{SVC} \end{bmatrix}^{(k)} \quad (\text{II -6})$$

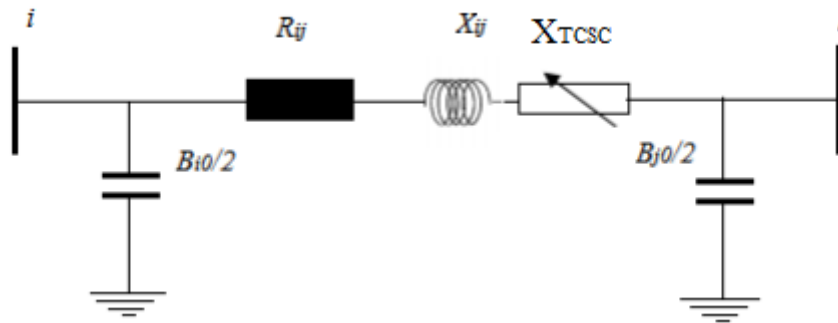
La nouvelle valeur de l'angle d'amorçage est déterminée par

$$\alpha_{SVC}^{(k)} = \alpha_{SVC}^{(k-1)} + \Delta \alpha_{SVC}^{(k)} \quad (\text{II -7})$$

## II.7 Modélisation de TCSC :

Le TCSC est composé d'une réactance couplée à un variateur de courant à thyristors composant un TCR qui est mis en parallèle avec un condensateur à capacité fixe. Ce dispositif permet un contrôle continu de la réactance offerte par le TCSC. Avec l'introduction de cette réactance la réactance globale de la ligne est modifiée est donc la puissance transitée dans la ligne sera modifiée [27].

Pour éviter les phénomènes de résonance, les branches sont enclenchées de manière exclusive à l'aide d'un interrupteur. Le modèle mathématique de TCSC est dans le schéma de la Figure (II -12).



**Figure II .12 :** Modélisation d'un TCSC

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

$$X_{TCSC} = X_C + K_1(2\sigma + \sin(2\sigma) - K_2 (\cos \sigma)^2 (\overline{W} \tan(\overline{W} \sigma) - \tan(\sigma))) \quad (\text{II -8})$$

$$\text{Avec: } \sigma = \pi - \alpha \quad , \quad X_{LC} = \frac{X_L X_C}{X_C - X_L} \quad , \quad K_1 = \frac{X_C - X_{LC}}{\pi} \quad \text{et} \quad K_2 = \frac{4(X_{LC})^2}{\pi X_L}$$

Les réactances capacitive et inductive sont respectivement:

$$X_C = \frac{1}{C\overline{W}} \quad , \quad X_L = \frac{1}{C\overline{W}} \quad \overline{W} = \frac{W_0}{\overline{W}} \quad , \quad W_0 = \frac{1}{(LC)^{\frac{1}{2}}} \quad \text{et} \quad W = 2\pi f$$

Le courant transité entre les noeuds k et m est donné l'équation matricielle suivant :

$$\begin{bmatrix} I_i \\ I_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} jB_{ii} & jB_{ij} \\ jB_{ji} & jB_{jj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_K \\ V_M \end{bmatrix} \quad (\text{II -9})$$

Avec:

$$B_{ii} = B_{jj} = -\frac{1}{X_{TCSC}} \quad \text{et} \quad B_{ji} = B_{ij} = \frac{1}{X_{TCSC}}$$

Pour le compensateur inductive série et en inverse le signe pour le compensateur capacitive.

La puissance active et réactive au noeud k est donné par :

$$\begin{cases} P_i = V_i V_j B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) \\ Q_i = V_i^2 B_{ii} - V_i V_j B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) \end{cases} \quad (\text{II -10})$$

## II.8.Synthèse :

De manière générale l'effet de ces nouveaux équipements de FACTS de grande puissance et de vitesse rapide grâce à le développement de la technologie d'électronique de puissance montre un très grand potentiel pour améliorer la performance de fonctionnement et la stabilité des réseaux électriques en fortifiant la contrôlabilité des réseaux électriques et la capacité de transmission de puissance sur les lignes de transmission d'énergie électrique. Les différents types de FACTS présentés dans cette section possèdent tous leurs propres caractéristiques tant en régime permanent qu'en régime transitoire. Chaque type de dispositif FACTS sera donc utilisé pour répondre à des objectifs bien définis. Le Tableau (II -1) synthétise les domaines d'utilisation et d'applications des différentes technologies de dispositifs FACTS pour l'amélioration la performance de contrôle, de l'exploitation et de la flexibilité des systèmes de puissance [4].

**Tableau II.1** :Application des FACTS à la résolution des problèmes dans le réseau[4].

FACTS	Contributions de la commande
STATCOM	Commande de la tension, compensation de la puissance réactive, amortissement de l'oscillation, stabilité de la tension, stabilité transitoire et dynamique.
SVC	Commande de la tension, compensation, amortissement de l'oscillation, stabilité de la tension, stabilité transitoire et dynamique.
SSSC	Commande du courant, amortissement de l'oscillation, stabilité transitoire et dynamique, stabilité de tension, restriction du courant d'incident.
TCSC	Commande du courant, amortissement de l'oscillation, stabilité transitoire et dynamique, stabilité de tension, restriction du courant d'incident.
UPFC	Commande de la puissance active et de la puissance réactive, commande de la tension, compensation de la puissance réactive, amortissement de l'oscillation, stabilité transitoire et dynamique, stabilité de tension, restriction du courant d'incident.
IPFC	Commande de la puissance réactive, commande de la tension, amortissement de l'oscillation, stabilité transitoire et dynamique, stabilité de tension.

Le Tableau (II -1) donne les contributions de la commande des divers dispositifs des FACTS pour aider à les choisir pour des applications particulières. On peut remarquer que comme la tension, le courant, l'impédance, la puissance réactive et la puissance active sont réciproquement en relation, chaque type FACTS a des contributions multiples en commandant la tension, le courant, la puissance etc.

Ce pendant, le degré de contrôlabilité, particulièrement, la commande de la stabilité et de la puissance, varie d'un FACTS à l'autre. En fait, on peut choisir le régulateur de FACTS selon l'objectif particulier de commande et selon les facteurs économiques.

## **II.9. Apports et avantages des dispositifs FACTS :**

Les FACTS sont utilisés principalement dans les deux contextes suivants [28]:

- 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 voire supprimé les surcharges dans les lignes ou les transformateurs. Ils agissent alors en contrôlant la réactance des lignes et en ajustant les déphasages.

Par cette action les contrôleurs FACTS permettent dans un système énergétique d'obtenir un sinon plusieurs des bénéfices suivants [26]:

- Contrôle du flux de puissance qui est la principale fonction des dispositifs FACTS.

Ce contrôle doit être réalisé selon un cahier de charge prédéfini pour satisfaire les besoins des consommateurs.

- Améliorer la stabilité dynamique du système : entre autre des fonctions des FACTS l'amélioration de la stabilité transitoire, atténuation des oscillations et le contrôle de la stabilité des tensions.
- Contrôle des tensions dans les nœuds.
- Augmenter les capacités de charge des lignes vers leurs limites thermiques.
- Contrôle de la puissance réactive : Réduction de l'écoulement de la puissance réactive, donc permettre aux lignes de transmettre plus d'énergies active et par conséquence réduire les pertes de transmission.
- Amélioration de la qualité d'énergie.
- Augmenter la capacité de transport de la puissance active.

## II.10 Application des dispositifs FACTS dans les réseaux électriques :

Les possibilités du contrôle grâce à l'application des dispositifs FACTS dans les réseaux électriques sont résumées dans la figure (II.13).

L'équation de la figure (II.13) définit la puissance transmise entre les deux systèmes.  $V_s$  et  $V_R$  sont les tensions aux extrémités de la ligne,  $X$  représente l'impédance série de la ligne,  $(\delta_s - \delta_R)$  est l'angle de phase entre les deux systèmes. Il est clair que les trois paramètres tension, impédance, et angle de phase influencent la puissance transmise entre les deux systèmes. Comme il est illustré sur la figure (II.13). Chaque dispositif FACTS peut influencer un des trois paramètres, et par conséquent le contrôle de l'écoulement de puissance [29].

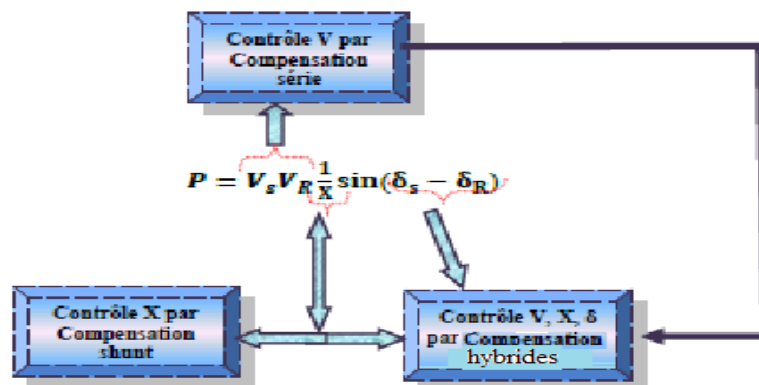


Figure II.13 : Diagramme schématisé pour l'application des FACTS

## II.11. Coût des dispositifs FACTS :

Mis à part les avantages techniques apportés par les FACTS, d'autres critères liés au coût doivent être pris en considération dans la décision d'installer un dispositif. Sur le plan économique, le critère généralement adopté dans l'évaluation des bénéfices obtenus par un FACTS est que l'accroissement des revenus doit excéder les coûts d'exploitations, de maintenance et d'amortissement de l'installation.

- Le coût d'une installation FACTS dépend principalement des facteurs tels que [28]:
  - ✓ Les performances requises.
  - ✓ La puissance de l'installation.
  - ✓ Le niveau de tension du système.
  - ✓ La technologie du semi-conducteur utilisé.

**II.12. Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons présenté une vue globale (overview) sur les dispositifs FACTS (leurs classification et différentes catégories) avec des schémas qui structurent chaque dispositifs de plus nous avons présenté quelques installations FACTS en exploitation dans le monde tel que le SVC, le STATCOM, le TCSC, etc. , et à la fin une petite discussion sur le plan économique des installations FACTS.

Dans notre étude nous avons choisi d'utilisé le SVC (Static Var Compensator) et TCSC (Thyristor controlled series capacitor) comme dispositif FACTS pour contrôler la tension et optimiser la puissance réactive dans un réseau de transport de l'énergie électrique.

# *Chapitre III*

*Optimisation par*

*Essaim de Particules*



## Chapitre III

### Optimisation par Essaim de Particules

#### III.1. Introduction:

Progressivement l'homme s'inspire de la nature qui l'entoure pour exécuter des algorithmes qui simulent le comportement des animaux.

Les Méta-heuristiques permettent de trouver rapidement et facilement la solution la plus proche de l'optimum si ce dernier existe.

On va faire la connaissance avec une de ces méthodes, celle-ci est dite « Optimisation par Essaims de Particule » dont l'idée principale est de simuler le comportement commun des oiseaux à l'intérieur d'une nuée, et étudier la possibilité de son application.

Le problème à résoudre peut souvent s'exprimer comme un problème d'optimisation : on définit une fonction objectif, ou fonction de coût, que l'on cherche à minimiser ou à maximiser par rapport à tous les paramètres concernés.

La définition du problème d'optimisation est souvent complétée par la donnée de contraintes. On distingue les contraintes impératives (ou « dures ») et les contraintes indicatives (ou « molles »).

Tous les paramètres des solutions retenues doivent respecter les contraintes du premier type, qui peuvent aussi être vues comme définissant l'espace de recherche, faute de quoi ces solutions ne sont pas réalisables.

Les contraintes indicatives doivent simplement être respectées aussi bien que possible. De nouvelles méthodes, dénommées méta-heuristiques, comprenant notamment la méthode du recuit simulé, les algorithmes évolutionnaires, la méthode de recherche tabou, les algorithmes de colonies de fourmis... sont apparues, à partir des années 1980, avec une ambition commune: résoudre au mieux les problèmes dits d'optimisation difficile.

Revenons sur la définition de l'optimisation difficile. Deux sortes de problèmes reçoivent, dans la littérature, cette appellation, non définie strictement (et liée, en fait, à l'état de l'art en matière d'optimisation) :

- Certains problèmes d'optimisation discrète, pour lesquels on ne connaît pas d'algorithme exact polynomial (c'est-à-dire dont le temps de calcul est proportionnel à  $N_n$ , où  $N$  désigne le nombre de paramètres inconnus du problème, et  $n$  est une constante entière).

- certains problèmes d'optimisation à variables continues, pour lesquels on ne connaît pas d'algorithme permettant de repérer un optimum global (c'est-à-dire la meilleure solution possible) à coup sûr et en un nombre fini de calculs.

Des efforts ont long temps été menés, séparément, pour résoudre ces deux types de problèmes. Dans le domaine de l'optimisation continue, il existe ainsi un arsenal important de méthodes classiques dites d'optimisation globale, mais ces techniques sont souvent inefficaces si la fonction objectif ne possède pas une propriété structurelle particulière, telle que la convexité. Dans le domaine de l'optimisation discrète, un grand nombre d'heuristiques, qui produisent des solutions proches de l'optimum, ont été développées ; mais la plupart d'entre elles ont été conçues spécifiquement pour un problème donné [30].

### **III.2. L'optimisation par Essaim de particules (PSO) :**

Le méta heuristique basée sur la méthode des essaims particulaires ("Particle Swarm Optimization", PSO) a été développée par Kennedy et Eberhart en 1995. Le principe de la méthode provient analogiquement avec les comportements collectifs d'animaux.

L'optimisation par essaims particulaires (PSO) est classée dans les techniques d'optimisation stochastiques à population. Une brève description de l'algorithme PSO est présentée dans les paragraphes suivants.

Observez un champ en train d'être labouré en automne, lorsque le soc de la charrue pénètre le sol pour la première fois le champ est vide de tout goéland et quelques minutes après une nuée accompagne le tracteur. Au début du labour un oiseau découvre la source de nourriture et très rapidement un autre arrive et ainsi de suite.

Que s'est-il passé ? L'information concernant un festin potentiel s'est largement diffusée au sein du groupe de goéland. Les goélands volaient à la recherche de nourriture de façon plus ou moins ordonnée et le rassemblement s'est effectué par un échange (volontaire ou non) social d'informations entre individus de la même espèce.

L'un d'entre-eux à trouver une solution et les autres se sont adaptés en copiant sa solution, ceci offre un caractère adaptatif à la méthode.

Au départ J. Kennedy et R. Eberhart cherchaient à simuler la capacité des oiseaux à voler de façon synchrone et leur aptitude à changer brusquement de direction tout en restant en une formation optimale. Le modèle qu'ils ont proposé à ensuite été étendu en un algorithme simple et efficace d'optimisation.

Les particules sont les individus et elles se déplacent dans l'hyperespace de recherche.

Le processus de recherche est basé sur deux règles :

1. Chaque particule est dotée d'une mémoire qui lui permet de mémoriser le meilleur point par lequel elle est déjà passée et elle a tendance à retourner vers ce point.
2. Chaque particule est informée du meilleur point connu au sein de son voisinage et elle va tendre à aller vers ce point[30].

### **III.2.1. Origines :**

Ces deux concepteurs, Russel Eberhart et James Kennedy, cherchaient à modéliser des interactions sociales entre des « agents » devant atteindre un objectif donné dans un espace de recherche commun, chaque agent ayant une certaine capacité de mémorisation et de traitement de l'information. La règle de base était qu'il ne devait y avoir aucun chef d'orchestre, ni même aucune connaissance par les agents de l'ensemble des informations, seulement des connaissances locales. Un modèle simple fut alors élaboré.

Dès les premières simulations, le comportement collectif de ces agents évoquait celui d'un essaim d'êtres vivants convergeant parfois en plusieurs sous essaims vers des sites intéressants.

Ce comportement se retrouve dans bien d'autres modèles, explicitement inspirés des systèmes naturels. Ici, la métaphore la plus pertinente est probablement celle de l'essaim d'abeilles, particulièrement du fait qu'une abeille ayant trouvé un site prometteur sait en informer certaines de ses consœurs et que celles-ci vont tenir compte de cette information pour leur prochain déplacement.

Finalement, le modèle s'est révélé être trop simple pour vraiment simuler un comportement social, mais par contre très efficace en tant qu'outil d'optimisation.

Comme nous allons le voir, le fonctionnement de la PSO fait qu'elle peut être rangée dans les méthodes itératives (on approche peu à peu de la solution) et stochastiques (on fait appel au hasard). Sous ce terme un peu technique, on retrouve un comportement qui est aussi vieux que la vie elle-même : améliorer sa situation en se déplaçant partiellement au hasard et partiellement selon des règles prédéfinies.

### III.2.2. Terminologie :

La terminologie de l'optimisation par essaim de particules est empruntée aux études sociales du comportement animal dues à l'existante analogie.

#### . Particule :

Dans la terminologie de PSO, un vecteur de paramètre s'appelle la particule. Toutes les particules dans l'essaim agissent individuellement sous le même principe : accélèrent vers le meilleur endroit global et le meilleur endroit personnel tout en constant vérification de la valeur de son endroit courant.

#### . Position :

La position du vecteur de paramètre dans l'espace de recherche est la position de particule.

#### . Fonction coût (fitness) :

Comme dans toutes les techniques évolutionnaires de calcul il doit y avoir une certaine fonction ou méthode pour évaluer la qualité d'une position.

La fonction coût doit prendre la position dans l'espace de recherche et renvoyer un nombre simple représentant la valeur de cette position. La fonction coût fournit l'interface entre le problème physique et l'algorithme d'optimisation.

#### . Meilleur personnel (Pbest) :

L'endroit avec la valeur d'aptitude la plus élevée individuellement découverte par une particule est connu en tant que meilleur personnel. Chaque particule a son propre meilleur personnel déterminé par le chemin qu'il a pris.

#### . Meilleur global (Gbest) :

L'emplacement de la plus haute valeur d'aptitude rencontrée par toutes les particules jusqu'à un certain moment dans le temps (itération) est connu sous le nom de la Global Best. Pour l'ensemble de l'essaim il y a un seul Global Best. Chaque particule a le moyen de connaître la Global Best découvert par l'ensemble de l'essaim. À chaque point du temps chaque particule compare l'aptitude de son emplacement actuel à celui des Global Best. Si une particule est atteinte à un endroit de plus d'aptitude, Global Best est remplacé par celui des particules position actuelle[30].

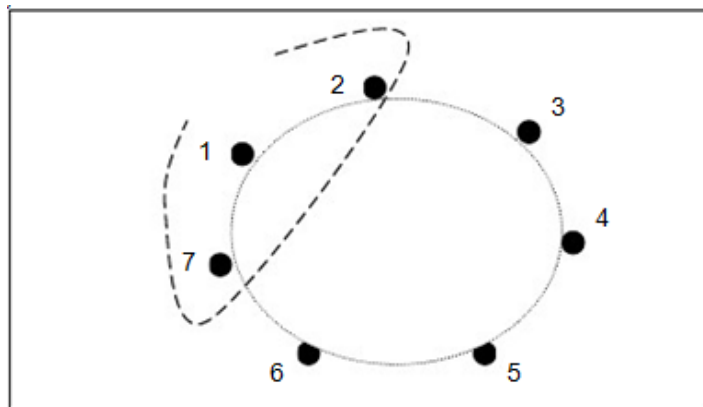
### III.2.3. Description informelle :

La version historique peut facilement être décrite en se plaçant du point de vue d'une particule. Au départ de l'algorithme, un essaim est réparti au hasard dans l'espace de recherche, chaque particule ayant également une vitesse aléatoire. Ensuite, à chaque pas de temps :

- ✚ chaque particule est capable d'évaluer la qualité de sa position et de garder en mémoire sa meilleure performance, c'est-à-dire la meilleure position qu'elle a atteinte jusqu'ici (qui peut en fait être parfois la position courante) et sa qualité (la valeur en cette position de la fonction à optimiser).
- ✚ Chaque particule est capable d'interroger un certain nombre de ses congénères (ses informatrices, dont elle-même) et d'obtenir de chacune d'entre elles sa propre meilleure performance (et la qualité afférente).
- ✚ À chaque pas de temps, chaque particule choisit la meilleure des meilleures performances dont elle a connaissance, modifie sa vitesse en fonction de cette information et de ses propres données et se déplace en conséquence.

Le premier point se comprend facilement, mais les deux autres nécessitent quelques précisions.

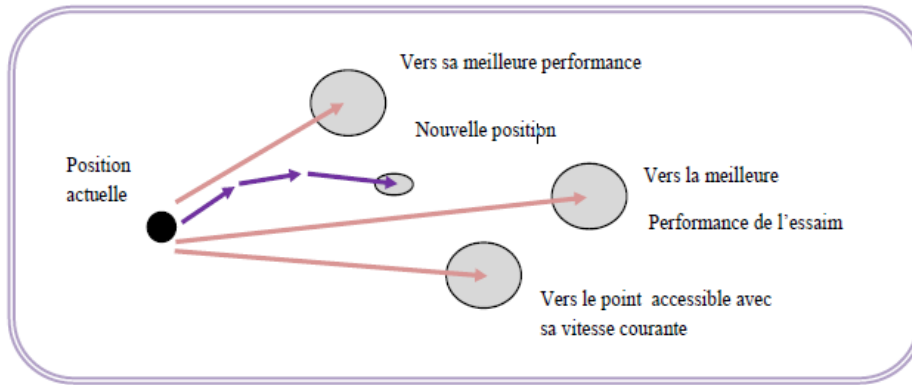
Les informatrices sont définies une fois pour toute de la manière suivante (Figure III.1) :



**Figure III. 1:** Cercle virtuel pour un essaim de sept particules.

Le groupe d'information de taille trois de la particule 1 est composé des particules 1, 2 et 7.

On suppose que toutes les particules soient disposées (symboliquement) en cercle et, pour la particule étudiée, on inclut progressivement dans ses informatrices, d'abord elle-même, puis les plus proches à sa droite et à sa gauche, de façon à atteindre le total requis. Il y a bien sûr de nombreuses variantes, y compris celle consistant à choisir les informatrices au hasard, mais celle-ci est à la fois simple et efficace[15].



**Figure III.2 :** Schéma de principe du déplacement d'une particule.

Pour réaliser son prochain mouvement, chaque particule combine trois tendances : suivre sa vitesse propre, revenir vers sa meilleure performance, aller vers la meilleure performance de ses informatrices.

Une fois la meilleure informatrice détectée, la modification de la vitesse est une simple combinaison linéaire de trois tendances, à l'aide de coefficients de confiance :

- ✚ La tendance « aventureuse », consistant à continuer selon la vitesse actuelle,
- ✚ La tendance « conservatrice », ramenant plus ou moins vers la meilleure position déjà trouvée,
- ✚ la tendance « panurgienne », orientant approximativement vers la meilleure informatrice.

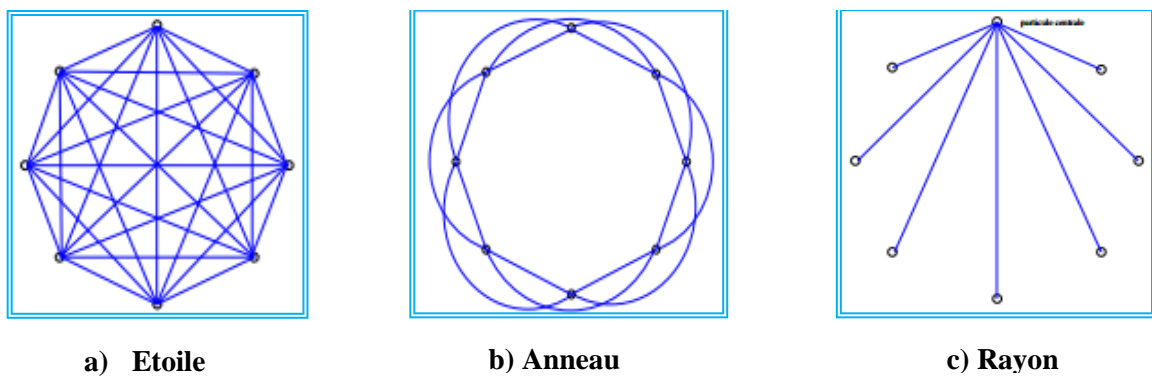
Les termes « plus ou moins » ou « approximativement » font référence au fait que le hasard joue un rôle, grâce à une modification aléatoire limitée des coefficients de confiance, ce qui favorise l'exploration de l'espace de recherche.

Naturellement, pour pouvoir être programmé, tout ceci est formalisé dans des équations de mouvement. Un point intéressant est que, contrairement à bien d'autres heuristiques qui restent purement expérimentales, il existe une analyse mathématique précisant les conditions de convergence et le choix des paramètres.

#### **III.2.4. Le voisinage :**

Le voisinage constitue la structure du réseau social. Les particules à l'intérieur d'un voisinage communiquent entre-elles. Différents voisinages ont été étudiés et sont considérés en fonction des identificateurs des particules et non des informations topologiques comme les distances euclidiennes dans l'espace de recherche [15]:

- ✚ Topologie en étoile (figure III.3(a)) : le réseau social est complet, chaque particule est attirée vers la meilleure particule notée Gbest et communique avec les autres.
- ✚ Topologie en anneau (figure III.3 (b)): chaque particule communique avec n (n = 3) voisins immédiates. Chaque particule tend à se déplacer vers la meilleure dans son voisinage local notée lbest.
- ✚ Topologie en rayon (figure III.3(c)): une particule "centrale" est connectée à tous les autres. Seule cette particule centrale ajuste sa position vers la meilleure, si cela provoque une amélioration l'information est propagée aux autres.



**Figure III. 3** : Trois topologies du voisinage différentes

### III.2.5. Principales caractéristiques :

Ce modèle présente quelques propriétés intéressantes, qui en font un bon outil pour de nombreux problèmes d'optimisation, particulièrement les problèmes fortement non linéaires, continus ou mixtes (certaines variables étant réelles et d'autres entières) :

- ✚ il est facile à programmer, quelques lignes de code suffisent dans n'importe quel langage évolué,
- ✚ il est robuste (de mauvais choix de paramètres dégradent les performances, mais n'empêchent pas d'obtenir une solution).

Signalons, de plus, qu'il existe des versions adaptatives qui évitent même à l'utilisateur la peine de définir les paramètres (taille de l'essaim, taille des groupes d'informatrices, coefficients de confiance).

Par ailleurs, on notera que cette heuristique se démarque des autres méthodes évolutionnaires (typiquement, les algorithmes génétiques) sur deux points essentiels : elle met l'accent sur la coopération plutôt que sur la compétition et il n'y a pas de sélection (au moins dans les versions de base), l'idée étant qu'une particule même actuellement médiocre mérite d'être conservée, car c'est peut-être justement elle qui permettra le succès futur, précisément du fait qu'elle sort des sentiers battus[30].

### III.2.6. Equation de mouvement :

PSO est essentiellement développé grâce à la simulation d'oiseaux affluents dans les deux dimensions spatiales. La position de chaque agent est représentée par la position sur les axes XY et la vitesse est exprimée par  $v_x$  (la vitesse de l'axe X) et  $v_y$  (la vitesse de l'axe Y).

La modification de la position d'un agent indiquée est définie par la position et l'information de vitesse.

Chaque agent connaît la valeur de son mieux à ce jour ( $P_{best}$ ) et sa position (XY). Cette information est l'analogie de l'expérience personnelle de chaque agent. En outre, chaque agent connaît la meilleure valeur à ce jour dans le groupe ( $G_{best}$ ) entre  $P_{best}$ s.

Cette information est analogie de la connaissance de la façon dont les autres agents qui les entourent ont accompli. À savoir, pour que chaque agent peut modifier sa position il faut utiliser les informations suivantes:

- sa position actuelle (x, y),
- sa vitesse actuelle ( $v_x$ ,  $v_y$ ),
- la distance entre sa position actuelle et  $P_{best}$ .
- la distance entre sa position actuelle et  $G_{best}$ .

Cette modification peut être représentée par le concept de vitesse. La vitesse de chaque agent peut être modifiée par l'équation suivante :

$$V_i^{k+1} = w * V_i^k + C_1 * rand_1 * (P_{best}_i - x_i^k) + C_2 * rand_2 * (G_{best} - x_i^k) \quad (\text{III -1})$$

$V_i^{k+1}$ : la vitesse de l'agent i, à l'itération k

$w$  : Le poids inertiel,

$C_j$ : paramètre d'accélération (facteur de pondération),

**rand**: numéro aléatoire entre 0 et 1,

$x_i^k$ : la position de l'agent i, à l'itération k,

**$Pbest_1$** : meilleur personnel de l'agent  $i$ ,

**$Gbest_1$** : meilleur global dans le group.

Le poids inertiel décroît d'une valeur max à une valeur min :

$$W = W_{max} \frac{W_{max} - W_{min}}{iter_{max}} \times iter \quad (\text{III -2})$$

Où:

**$W_{max}$** : poids initial,

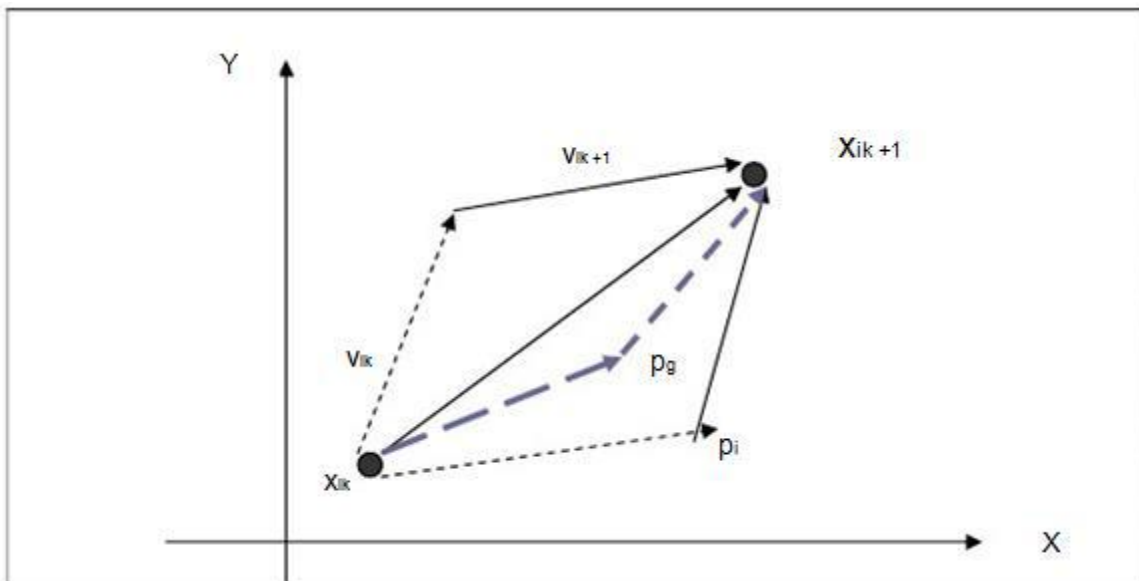
**$W_{min}$** : poids final,

**$iter_{max}$** : le nombre d'itération maximal,

**$iter$** : l'itération en cours.

En utilisant l'équation ci-dessus, dans le calcul de la vitesse, ce qui est peu à peu près de  $Pbest$  et  $Gbest$  peut être calculé. La position actuelle (recherche dans l'espace de recherche) est donnée par l'équation suivante:

$$x_i^{k+1} = x_i^k + V_i^{k+1} \quad (\text{III -3})$$



**FigureIII. 4:** Mise à jour d'une particule avec l'algorithme PSO

### III.3. Algorithme d'essaims de particules :

Dans cette partie nous avons utilisés l'algorithme standard de PSO ainsi que trois variantes pour optimiser la puissance réactive avec considération des systèmes FACTS. L'organigramme de PSO standard est présenté dans la figure(III.5).

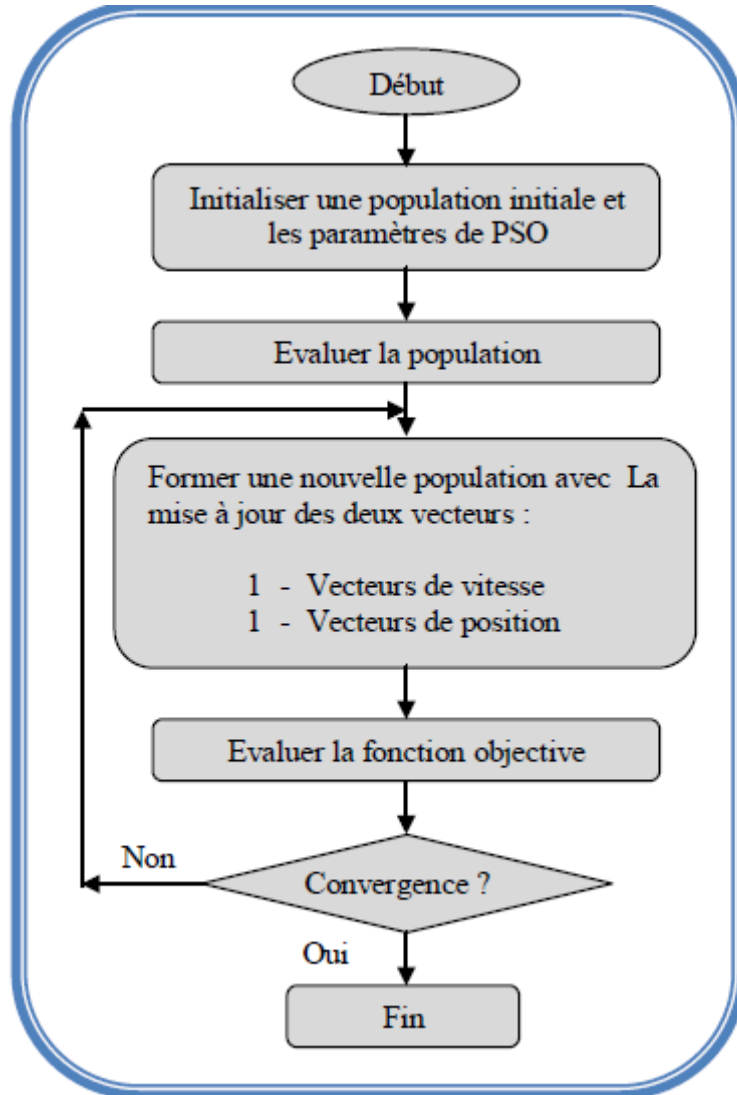


Figure III. 5: Organigramme de l'algorithme de PSO

#### III.3.1. Algorithme de PSO avec le coefficient d'inertie (PSO-CI) :

L'algorithme PSO classique peut être décrit sous forme vectorielle de la façon suivante :

$$V(t + 1) = W \times V(t) + C_1 rand_1 \times (Pbest_1 - x(t)) + C_2 rand_2 \times (gbest_2 - x(t)) \quad (IV-4)$$

La combinaison des paramètres du coefficient d'inertie ( $w$ ) et l'intensité d'attraction ( $C_1$  et  $C_2$ ) permet de régler l'équilibre entre les phases de diversification et d'intensification du processus

de recherche. ont démontré qu'une bonne convergence peut être obtenue en rendant dépendants ces paramètres.

$$W = (W_{max} - W_{min}) \frac{iter_{max} - iter}{iter_{max}} + W_{min} \quad (\text{III -5})$$

Avec

$W$  : sont coefficient d'inertie, sont la valeur initiale de coefficient d'inertie  $W_{min}$  et  $W_{max}$  sont la valeur finale de ce coefficient. Avec  $iter$  représente l'itération courant et  $iter_{max}$  sont le nombre maximal des itérations.

### III.3.2. Algorithme de PSO avec le facteur de constriction $k$ (PSO-FC) :

La deuxième variante basé sure le facteur de constriction  $K$ . Dans l'application de cette algorithme d'essaim de particule avec l'approche de facteur de constriction  $K$  (PSO-FC), la vitesse est modifiée par un facteur connu  $K$ . L'utilisation d'un facteur de constriction  $K$  permet de prévenir l'explosion de l'essaim, d'assurer la convergence. L'équation 3.4 devient alors :

$$\begin{cases} V(t+1) = k \times V(t) + C_1 rand_1 \times (Pbest_1 - x(t)) + C_2 rand_2 \times (gbest_2 - x(t)) \\ x(t+1) = x(t) + V(t+1) \end{cases} \quad (\text{III -6})$$

$$\text{Avec} \quad K = \frac{2}{|2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 + 4\varphi}|} \quad (\text{III -7})$$

Avec  $4,1 \leq \varphi \leq 4,2$

Dans [32], de nombreux tests sont menés pour déterminer les valeurs optimales de  $C_1$  et  $C_2$ . Dans la majorité des cas, on utilise  $\varphi = 4.1$  et  $C_1=C_2=2.05$ ; ce qui donne un coefficient  $K$  approximativement égal à  $K= 0.729$ .

### III.3.3. Algorithme de PSO avec Coefficients d'Accélération variable PSO-TVAC :

Dans ce cas, les coefficients cognitif et social  $C_1$ ,  $C_2$  ne sont plus constants mais variables en fonction de génération (itération), autrement dit dans le temps dont le but est de guider l'exploration tantôt vers la direction de l'expérience de l'individu (coefficient cognitif dominant) tantôt vers la direction de l'expérience de groupe (coefficient social dominant) Enfin l'interaction de ces deux facteurs dirige l'exploration vers la solution voulue.

$$\begin{cases} V(t+1) = W \times V(t) + C_1 rand_1 \times (Pbest_1 - x(t)) + C_2 rand_2 \times (gbest_2 - x(t)) \\ x(t+1) = x(t) + V(t+1) \end{cases} \quad (\text{III -8})$$

C'est réalisé en changeant les coefficients d'accélération et avec le temps de telle sorte que le composant cognitif soit réduit tandis que le composant social est augmenté comme les revenus de recherche. Les coefficients d'accélération sont exprimés par l'équation suivante :

$$\begin{cases} C_1 = (C_{1f} - C_{1i}) \frac{iter}{iter_{max}} + C_{1i} \\ C_2 = (C_{2f} - C_{2i}) \frac{iter}{iter_{max}} + C_{2i} \end{cases} \quad (\text{III -9})$$

Avec  $C_{1f}$  ,  $C_{1i}$  ,  $C_{2f}$  et  $C_{2i}$  sont les coefficients sociale cognitive respectivement d'accélération initial et final. Pour le coefficient d'inertie sont donné par l'équation (III -9) .[5].

### III.4.Conclusion :

Dans ce chapitre on a présenté les différents algorithmes d'optimisation par essaim de particules qui ont rencontré un succès remarquable depuis leur création, grâce à leur simplicité et facilité d'implémentation des différents traitements sans que l'utilisateur ait à modifier la structure de base de l'algorithme.

On a remarqué que l'algorithme PSO présente un problème majeur, qui est le problème de la convergence rapide, ce dernier permet de trouver un optimum local et dans ce sens on a présenté plusieurs améliorations sur cette technique pour améliorer les performances et éviter ce cas de problèmes.

Dans cette chapitre suivant on va utiliser trois algorithmes qui sont PSO-CI, PSO-FC et PSO-TVAC pour optimiser les paramètres de déviation de la tension et pertes actives.

# *Chapitre IV*

*Application et résultats  
de simulation*



## **Chapitre IV**

### **Application et résultats de simulation**

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

Ce chapitre est consacré à l'analyse de la stabilité de tension d'un réseau électrique. Le but de ce chapitre est procédé à l'optimisation individuellement et simultanément les critères de la déviation de la tension, les pertes actives ainsi que le critère économique du coût d'investissement aux systèmes FACTS, et ce par le choix optimal de la taille, du nombre ainsi les sites d'emplacement des FACTS.

Donc le problème chute de tension, est formulé dans notre cas, comme un problème d'optimisation mono et multi-objectif. Plusieurs méthodes on été appliquées, les méthodes approchées semblent être les plus appropriées. Cela est dû à la simplicité de leurs mécanismes, la facilité de leur mise en application et leur efficacité même pour les problèmes complexes. Parmi ces dernières, les métaheuristiques sont des méthodes d'optimisation générales qui utilisent des règles intelligentes pour parcourir l'espace des solutions, elles produisent des solutions de bonne qualité. Pour cette raison, nous allons appliquer ces techniques à l'optimisation à savoir:

1. L'algorithme d'optimisation par Essaim Particules PSO-CI.
2. L'algorithme d'optimisation par Essaim Particules PSO-FC.
3. L'algorithme d'optimisation par Essaim Particules PSO-TVAC.

Dans un premier temps, nous présentons les résultats de l'optimisation et l'analyse statique de la stabilité de la tension avec le dispositif SVC dans le cas d'augmentation des charges, ensuite, à laide d'un dispositif TCSC on détermine l'emplacement optimal. Enfin, nous présenterons les résultats de l'optimisation de la déviation de la tension et les pertes de transmission après la coordination de dispositif SVC avec TCSC.

Les résultats obtenus avec les quatre techniques proposées sont suffisants, et ensuite sont comparés entre elles en termes d'optimalité et le dispositif FACTS pour résoudre le problème d'optimisation. Les tests seront effectués sur des réseaux électriques de moyennes et grandes échelles IEEE 30-Bus. Ces algorithmes ont été développés dans l'environnement MATLAB.

## IV.2 Réseau d'application IEEE 30-bus

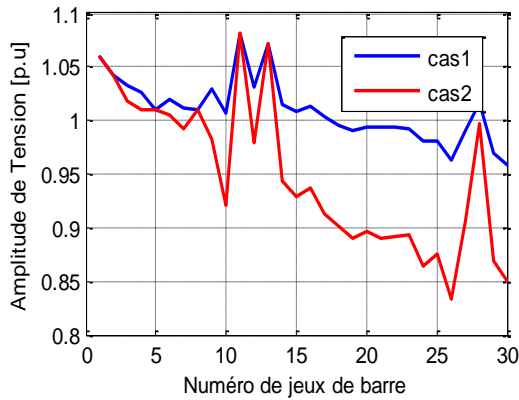
Le réseau d'application IEEE 30-bus dans cette partie est un réseau standard qui représente une portion du système de puissance électrique Américain. Ce réseau est constitué de 30 jeux de barres, il comprend 24 de charges PQ alimentant à partir cinq noeuds de générateurs PV aux jeux de barres N°=2, 5, 8, 11 et 13 et un nœud bilan au jeu de barre N°=1 à travers 41 lignes de transport. Le noeud bilan constitue le noeud de référence (tension fixée et phase de référence fixée à 0°) et il assure l'équilibre production consommation du réseau en fournissant l'écart de puissance active et réactive calculé à partir des puissances des générateurs et des charge.

Les limites inférieures et supérieures sur les modules de la tension de tous les jeux de barres de charge (PQ-bus) sont respectivement 0.90 (pu) et 1.1 (pu). La puissance active et réactive demandées totale sont respectivement 283.4 MW et 126 MVAR. Les détails de données de ce système test sont reportés en annexe A.

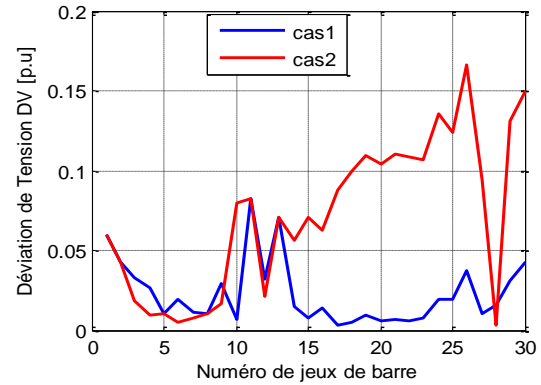
### IV.2.1 Augmentation progressive de la charge

La charge de réseau test IEEE 30-bus est augmentée progressivement jusqu'à l'instabilité de la tension. En pratique, lorsqu'une ligne est très surchargée et qu'elle atteint sa limite thermique maximale, elle s'ouvre sous l'action de ses protections. Nous ne tiendrons pas compte des limites thermiques des lignes pour toutes les simulations de ce chapitre. Nous considérerons donc que la puissance maximum transmissible par chaque ligne du réseau n'est limitée que par les paramètres de la ligne considérée. L'augmentation de la charge est introduite au niveau de puissance réactive demandée, Cela s'explique par le fort couplage qui existe entre les amplitudes des tensions et les puissances réactives du réseau électrique.

- **Cas 1:** La charge nominale du réseau test IEEE-30-Bus.
- **Cas 2:** Augmentation de la puissance réactive de l'ordre de 3 fois sur la totalité de JDB de charge du réseau test IEEE-30-Bus.

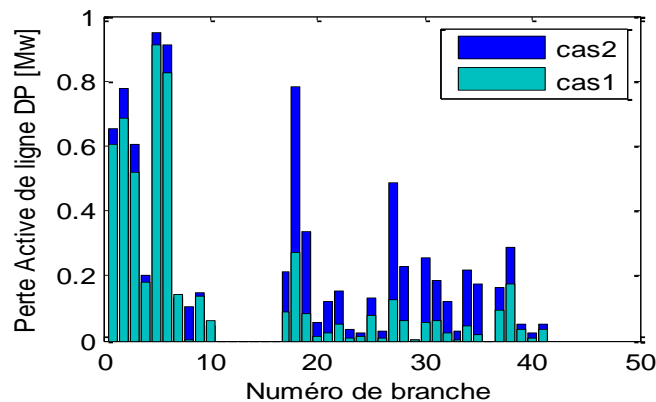


**Figure IV.1 :** Amplitude de tensions des jeux de barres (Cas 1 et 2).



**Figure IV.2 :** Déviation de tensions DV des jeux de barres (Cas 1 et 2).

D'après les Figures (IV-1) et (IV-2) on constate que les tensions de certains jeux de barres sensibles sont dépassés leurs limites inferieures dans l'état d'augmentation de charge cas 2. Ainsi, D'après la Figure (IV-3) En remarque une augmentation notable des pertes de transmission de l'ordre de 8.6914 Mw.



**Figure IV-3 :** Pertes actives DP de transmission (Cas 1 et 2).

Les tensions achevées par les deux cas sont présentées dans le Tableau (IV-1). Les tensions obtenues dans le cas 1 sont dans leurs limites admissibles, tandis que les tensions obtenues dans le cas 2 ne sont pas toutes dans leurs limites admissibles.

**Tableau IV.1** : Amplitude de tensions du réseau électrique IEEE à 30-bus (Cas 1 et 2).

Le Tableau (IV-2) montre l'évolution des pertes actives de transmissions après l'augmentation de la puissance réactive demandée par la charge du réseau jusqu'à trois fois **cas 2**. Il est clair que les pertes réactives de transmissions augmentent d'une façon très rapide aux points d'augmentations de la déviation de la tension. Cette situation, provoque un phénomène d'écroulement de tension sur les réseaux électriques.

N° JDB	Tension en PU		N° JDB	Tension en PU		N° JDB	Tension en PU	
	Cas 1	Cas 2		Cas 1	Cas 2		Cas 1	Cas 2
<b>1</b>	1.0600	1.0600	<b>11</b>	1.0820	1.0820	<b>21</b>	0.9936	0.8898
<b>2</b>	1.0430	1.0430	<b>12</b>	1.0317	0.9787	<b>22</b>	0.9940	0.8912
<b>3</b>	1.0330	1.0186	<b>13</b>	1.0710	1.0710	<b>23</b>	0.9923	0.8931
<b>4</b>	1.0263	1.0098	<b>14</b>	1.0145	0.9435	<b>24</b>	0.9803	0.8643
<b>5</b>	1.0100	1.0100	<b>15</b>	1.0078	0.9292	<b>25</b>	0.9806	0.8761
<b>6</b>	1.0198	1.0048	<b>16</b>	1.0138	0.9373	<b>26</b>	0.9622	0.8339
<b>7</b>	1.0116	0.9919	<b>17</b>	1.0034	0.9122	<b>27</b>	0.9898	0.9054
<b>8</b>	1.0100	1.0100	<b>18</b>	0.9949	0.9009	<b>28</b>	1.0161	0.9967
<b>9</b>	1.0289	0.9831	<b>19</b>	0.9905	0.8903	<b>29</b>	0.9692	0.8687
<b>10</b>	1.0068	0.9207	<b>20</b>	0.9938	0.8961	<b>30</b>	0.9573	0.8497

Les processus d'écroulement de tension sur les réseaux électriques résultent de phénomènes complexes très graves. Ces phénomènes sévères trouvent souvent leur origine dans les cascades inopinées d'événements qui conduisent à une accélération de la dégradation du plan de la tension au niveau des charges qu'elle entraîne des interruptions de service et peut aller jusqu'à des déclenchements en cascade de lignes, de groupes ou unité de production et un effondrement général du réseau électrique.

Ces phénomènes constituent actuellement l'une des préoccupations majeures des planificateurs et des exploitants des réseaux électriques des transports et d'interconnexion.

**Tableau IV.2** : Pertes actives de lignes du réseau électrique IEEE 30-bus (Cas 1 et 2).

Branches			Pertes en Mw		Branches			Pertes en Mw	
N°	Au	Du	Cas 1	Cas 2	N°	Au	Du	Cas 1	Cas 2
<b>1</b>	1	2	0.605	0.654	<b>22</b>	15	18	0.051	0.153
<b>2</b>	1	3	0.686	0.777	<b>23</b>	18	19	0.008	0.035
<b>3</b>	2	4	0.520	0.603	<b>24</b>	19	20	0.015	0.024
<b>4</b>	3	4	0.179	0.200	<b>25</b>	10	20	0.076	0.131
<b>5</b>	2	5	0.910	0.950	<b>26</b>	10	17	0.009	0.029
<b>6</b>	2	6	0.827	0.909	<b>27</b>	10	21	0.127	0.487
<b>7</b>	4	6	0.144	0.130	<b>28</b>	10	22	0.061	0.229
<b>8</b>	5	7	0.001	0.107	<b>29</b>	21	22	0.000	0.003
<b>9</b>	6	7	0.138	0.149	<b>30</b>	15	23	0.057	0.256
<b>10</b>	6	8	0.064	0.048	<b>31</b>	22	24	0.063	0.183
<b>11</b>	6	9	0.000	0.000	<b>32</b>	23	24	0.022	0.122
<b>12</b>	6	10	0.000	0.000	<b>33</b>	24	25	0.000	0.027
<b>13</b>	9	11	0.000	0.000	<b>34</b>	25	26	0.048	0.219
<b>14</b>	9	10	0.000	0.000	<b>35</b>	25	27	0.020	0.175
<b>15</b>	4	12	0.000	0.000	<b>36</b>	28	27	0.000	0.000
<b>16</b>	12	13	0.000	0.000	<b>37</b>	27	29	0.093	0.166
<b>17</b>	12	14	0.088	0.212	<b>38</b>	27	30	0.174	0.288
<b>18</b>	12	15	0.274	0.784	<b>39</b>	29	30	0.036	0.053
<b>19</b>	12	16	0.081	0.336	<b>40</b>	8	28	0.010	0.025
<b>20</b>	14	15	0.011	0.055	<b>41</b>	6	28	0.037	0.052
<b>21</b>	16	17	0.024	0.119	/	/	/	/	/

La meilleure solution pour éviter ces phénomènes indésirables est l'implantation des dispositifs FACTS d'une façon optimale, parce que un mauvais choix d'emplacement et des paramètres de dispositifs FACTS, on risque de ne pas bénéficier de leurs avantages, donc cette opération est plus importante lors du dimensionnement des FACTS dans les grands réseaux électriques.

#### IV.2.2 Emplacement optimal des FACTS

Dans cette partie, on va appliquer les algorithmes **PSO-CI**, **PSO-FC** et **PSO-TVAC** à l'optimisation individuellement et simultanément des fonctions objectives, et ce par le choix optimal de la taille, Le nombre et du site d'emplacement du FACTS. Ensuite on va procéder à des comparaisons entre ces algorithmes, en termes d'optimalité.

### IV.2.2.1 Optimisation avec considération de SVC

L'optimisation par les algorithmes de PSO fournit des solutions optimales à l'aide des mécanismes de recherche, mais il reste le choix des paramètres des algorithmes comme problème principal. Plusieurs paramètres rentrent en ligne de compte, tel que la dimension du problème à optimiser, la taille de population, le nombre maximale d'itération et les coefficients utilisés. Le Tableau (IV-3) montre les paramètres des algorithmes utilisés pour cette simulation.

**Tableau IV.3** : Les paramètres des algorithmes PSO-IC, PSO-FC et PSOTVAC.

	les variant de PSO		
	PSO-CI	PSO-FC	PSO-TVAC
Nombre maximum de génération	100	100	100
Nombre des particules	40	40	40
Coefficient de confiance $C_1$ et $C_2$ .	1.25 et 1.25	1.25 et 1.25	/
Type de voisinage	étoile	étoile	étoile
Coefficient de constriction K	/	0.729	/
Coefficient de confiance $C_{1f}$ et $C_{2f}$ et $C_{1i}$ et $C_{2i}$	/	/	0.2 et 2.2 et 2.5 et 0.2
Coefficient d'inertie $w$	0.9-0.4		0.9-0.4

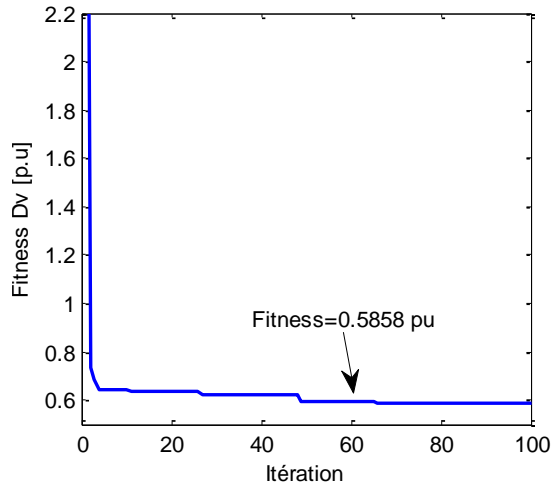
Ainsi le nombre initial et maximal des dispositifs SVC pour le réseau IEEE 30-bus choisi dans cette étude sera égal à cinq dispositifs, qui seront minimisé par les processus des algorithmes PSO-CI, PSO-FC et PSO-TVAC qui mentionnent ci-dessus.

### - Fonction mono objectif de la déviation de tension DV

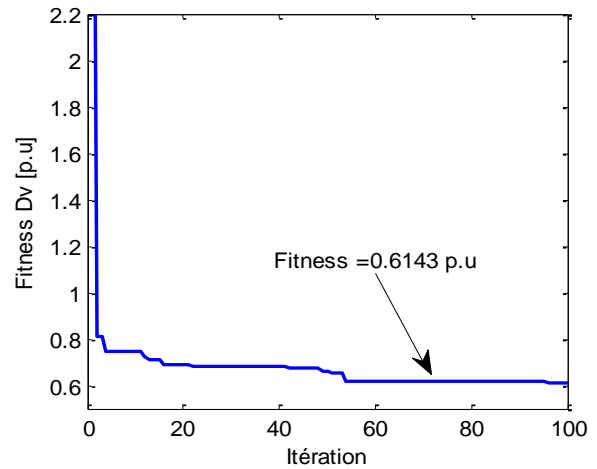
Ce test est consacré d'appliquer des méthodes d'optimisation à la minimisation la déviation de la tension aux jeux de barres de charges et qui peut être formulée comme suit :

$$DV = \sum_{i=1}^{n_j} |V_{ref} - V_i|$$

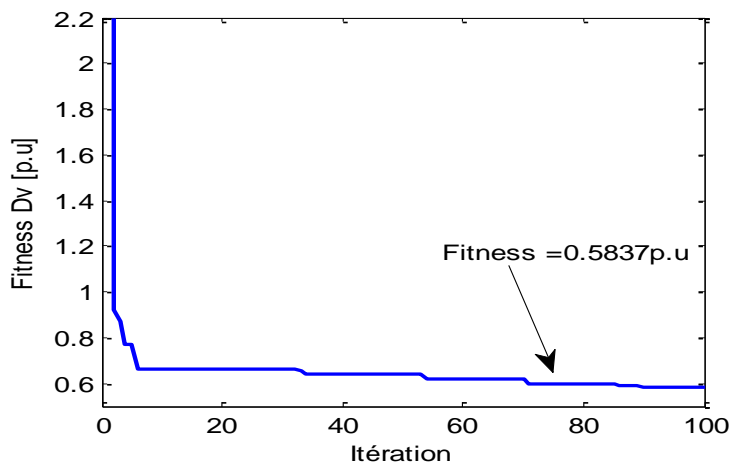
Les Figures IV-4, IV-5et IV-6 montrent la convergence de fonctions objectives par les trois algorithmes.



**Figure IV.4 :** Caractéristique de convergence de la déviation de tension par PSO-CI avec SVC.



**Figure IV.5:** Caractéristique de convergence de la déviation de tension par PSO-FC avec SVC.



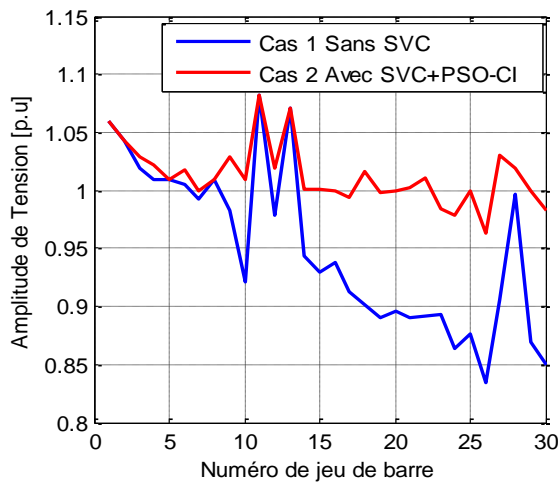
**Figure IV.6 :** Caractéristique de convergence de la déviation de tension par PSO-TVAC avec SVC

Les meilleures solutions calculées par les algorithmes PSO-CI, PSO-FC et PSO-TVAC sont respectivement à l'ordre de 0.5858 p.u, 0.6143 p.u et 0.5837 p.u. D'après les résultats de simulation on remarque clairement que les dispositifs SVC peuvent améliorer la stabilité de la tension du réseau électrique. Le choix optimal de la taille, du nombre et les sites d'emplacement du dispositif SVC récapitulés au Tableau (IV-4).

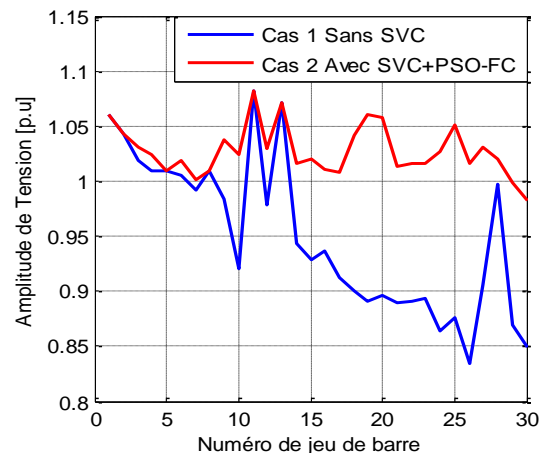
**Tableau IV.4 :** Optimisation DV par les trois approches proposées avec SVC.

	Sans SVC		SVC+ PSO-CI		SVC+ PSO-FC		SVC+ PSO-TVAC	
	JDB	Q [MVAR]	JDB	Q [MVAR]	JDB	Q [MVAR]	JDB	Q [MVAR]
Placement Optimal de SVC	-	-	18	25.2659	9	33.6654	19	24.5744
	-	-	22	51.5520	20	17.0594	22	38.5501
	-	-	27	26.0493	21	16.1844	25	33.1331
	-	-	-	-	24	28.4504	-	-
	-	-	-	-	25	27.0369	-	-
Fitness [p.u]	2.1562		0.5858		0.6143		0.5837	

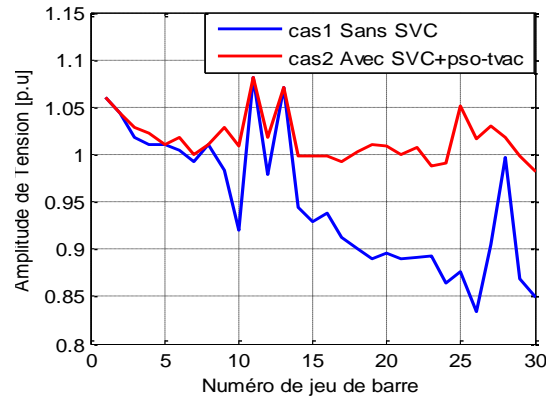
Les profils de la tension pour chaque algorithme sont illustrés dans les Figures IV-7,IV-8et IV-9.



**Figure IV.7 :** Amplitude de tensions des JDB trouvé par PSO-CI avec SVC.



**Figure IV.8 :** Amplitude de tensions des JDB trouvé par PSO-FC avec SVC.



**Figure IV.9 :** Amplitude de tensions des JDB trouvé par PSO-TVAC avec SVC.

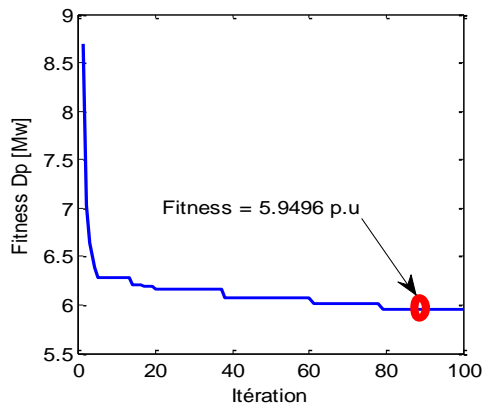
### Fonction mono objectif de pertes actives de transmission DP

Ce test est consacré d'appliquer des méthodes d'optimisation à la minimisation des pertes actives de transmission.

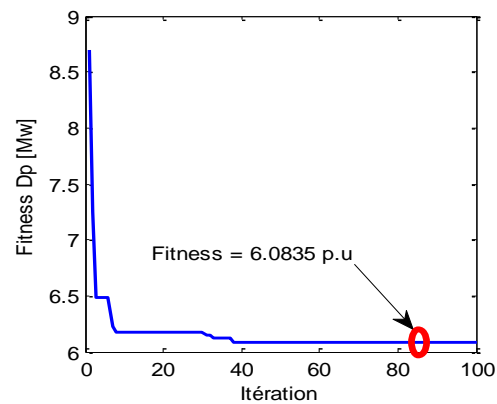
Ces pertes sont représentées par la relation suivante :

$$PL = \sum_{i=1}^{nb} P_{Li} = \sum_{i=1}^{nb} (P_{Gi} - P_D)$$

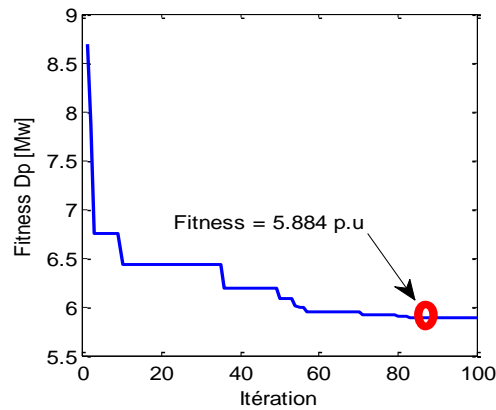
Les Figures IV-10, IV-11 et IV-12 montrent l'évolution de la fonction objective DP durant le processus d'optimisation par les trois approches proposées.



**Figure IV.10 :** Caractéristique de convergence des pertes lignes par PSO-CI avec SVC.



**Figure IV.11:** Caractéristique de convergence des pertes lignes PSO-FC avec SVC.



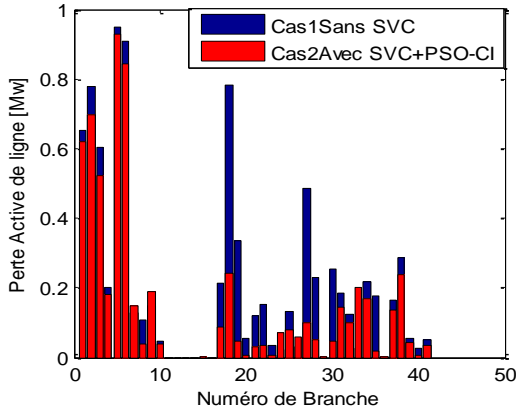
**Figure IV.12 :** Caractéristique de convergence des pertes lignes par PSO-TVAC avec SVC.

Ansi les algorithmes adaptés sont appliqués avec succès pour résoudre le problème d'optimisation des pertes DP. Les meilleures solutions calculées par PSO-CI, PSO-FC et PSO-TVAC sont respectivement 5.9496Mw, 6.0835Mw et 5.8820pu. Le choix optimal de la taille, du nombre et les sites d'emplacement du SVC par les algorithmes adaptés sont récapitulés au Tableau (IV-5).

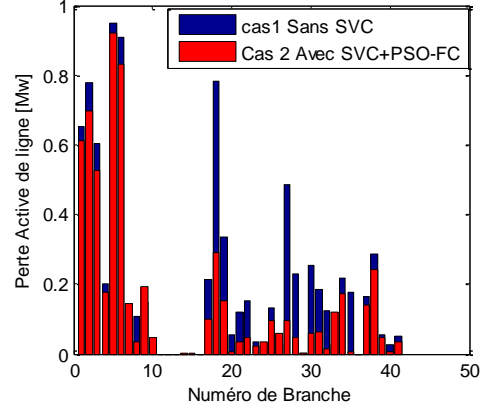
**Tableau IV.5 :** Optimisation DP par les quatre approches proposées avec SVC.

	Sans SVC		SVC+ PSO-CI		SVC+ PSO-FC		SVC+ PSO-TVAC	
	JDB	Q [MVAR]	JDB	Q [MVAR]	JDB	Q [MVAR]	JDB	Q [MVAR]
Placement Optimal de SVC	-	-	16	11.2360	12	40.6231	15	19.6956
	-	-	20	14.9804	19	23.0815	17	24.6500
	-	-	21	31.3109	21	35.1527	21	33.9636
	-	-	24	48.2125	24	27.5768	24	28.1161
	-	-	-	-	-	-	-	-
Fitness [Mw]	8.6962		5.9496		6.0835		5.8820	

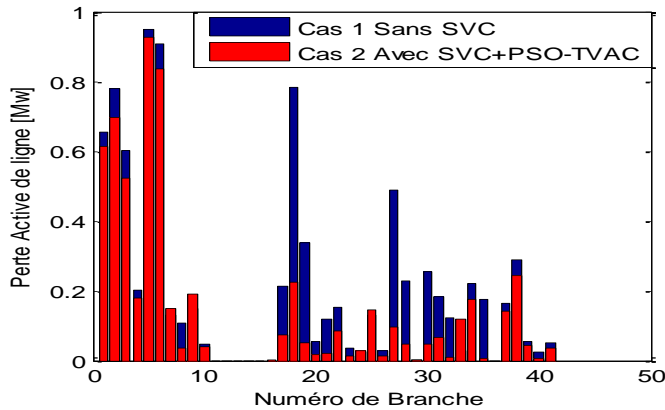
Les pertes actives de transmission pour chaque algorithme sont illustrées dans les Figures IV-13, IV-14 et IV-15.



**Figure IV.13 :** Pertes Actives de lignes trouvé par PSO-CI avec SVC.



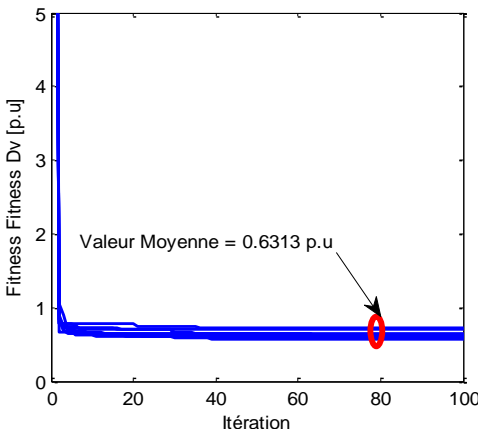
**Figure IV-14 :** Pertes Actives de lignes trouvé par PSO-FC avec SVC



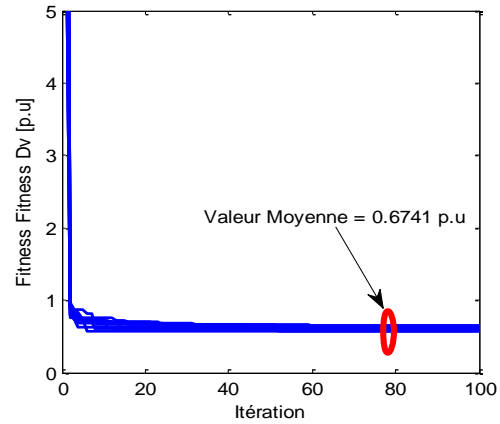
**Figure IV.15 :** Pertes Actives de lignes trouvé par PSO-TVAC avec SVC.

## Etude comparative

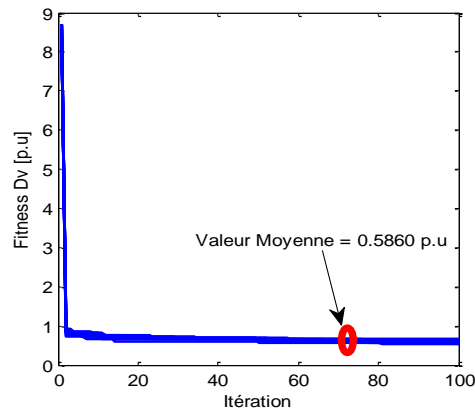
Le but principal de cette partie est la comparaison entre les trois approches adaptées pour vérifier leurs performances. Les Figures IV-16, IV-17 et IV-18 montrent les caractéristiques de convergence de la fonction fitness de la déviation de la tension DV pour dix essais par les quatre approches adaptées, avec considération de SVC.



**Figure IV.16 :** Convergence de la déviation de la tension par PSO-CI avec SVC de dix essais.



**Figure IV.17 :** Convergence de la déviation de la tension par PSO-FC avec SVC de dix essais.



**Figure IV.18 :** Convergence de la déviation de la tension par PSO-TVAC avec SVC de dix essais.

En plus, le Tableau (IV-6) illustre les valeurs minimales, maximales et la valeur moyenne pour dix essais par les quatre approches proposées.

On peut voir que la déviation de la tension minimale obtenue et sa valeur moyenne correspondante à la troisième approche PSO-TVAC génère la meilleure qualité de solution DV= 0.5860p.u. Les résultats de simulation confirment que cette version est capable de chercher la solution globale ou la solution quasi optimale.

**Tableau IV.6 :** Comparaison au niveau d'optimalité entre les trois approches proposées

	Approche de métaheuristique		
	PSO-CI	PSO-FC	PSO-TVAC
Nombre d'itération Max	100	100	100
DV valeur Max [p.u]	0.7281	0.6143	0.6560
DV valeur Moyenne [p.u]	0.6313	0.6741	0.5860
DV valeur Min [p.u]	0.5893	0.5623	0.5425

De même, le Tableau (IV-7) expose les résultats obtenus par rapport le nombre de génération. PSO-TVAC converge vers la solution optimale en comparaison avec les autres méthodes : PSO-CI et PSO-FC.

**Tableau IV.7 :** Comparaison au niveau d'itération entre les trois approches proposées.

	Approche de métaheuristique		
	PSO-CI	PSO-FC	PSO-TVAC
Nombre d'itération Max	100	100	100
Itération Max de convergence	96	99	100
Itération Moyenne de convergence	73	72	98
Itération Min de convergence	49	45	95
DV [p.u]	0.5893	0.5623	0.5425

## Conclusion

Dans cette partie, les résultats obtenus par l'application des algorithmes proposés confirment l'aptitude de l'optimisation par particule d'essaims PSO-TVAC pour la résolution les problèmes liés à la planification de la tension et le bon fonctionnement du réseau électrique d'une manière dynamique avec considération de SVC.

## Fonction multi objectif

Maintenant on va traiter l'optimisation de divers objectifs simultanément par la méthode PSO, il s'agit de minimiser la déviation de la tension avec le critère économique du coût d'investissement du SVC et les pertes actives dans les lignes avec le critère économique du coût d'investissement du SVC c'est la notion de Multi-objectifs.

Les fonctions multi objectifs adaptées sont définies comme suit:

$$Fitness = U \frac{\sum_{i=1}^{n_j} |V_{ref} - V_i|}{V_{base}} + (1 - U) \frac{\sum_{i=1}^{NSVC} IC_{SVC}}{IC_{base}}$$

$$Fitness = U \frac{\sum_{i=1}^{n_b} P_{Li}}{P_{Lbase}} + (1 - U) \frac{\sum_{i=1}^{NSVC} IC_{SVC}}{IC_{base}}$$

Où  $U \in [0, 1]$

Le deuxième terme des fonctions multi objectifs à optimisées correspond au coût d'investissement de compensateur SVC, mathématiquement formulé et donné par l'équation suivante

$$IC_{SVC} = C_{SVC} \cdot S \cdot 1000$$

Où  $C_{SVC}$  le coût des dispositifs SVC [US\$/Mvar].

Le coût d'investissement de dispositif SVC peut être calculée en utilisant la fonction du coût donné par

$$C_{SVC} = 0.0003 \cdot S^2 - 0.3051 \cdot S + 127.38$$

$$S = |Q_2 - Q_1|$$

Où  $S$  est la plage de fonctionnement de SVC d [MVar]

$Q_1$  la puissance réactive avant l'installation de SVC.

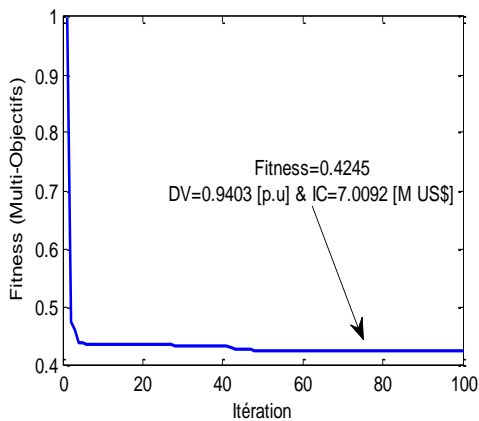
$Q_2$  la puissance réactive après l'installation de SVC.

le coefficient de décision  $U$  est déterminé selon le choix de l'opérateur, qui ont été choisi pour ce test  $U = 0.5$ .

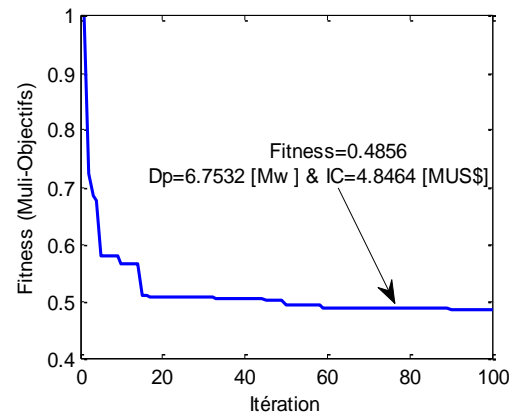
L'application a été faite sur le même réseau électrique IEEE30bus. Donc les Figures (IV-19) et (IV-20) représentent respectivement l'évolution de la fonction multi objectif ( la déviation de

la tension avec le critère économique) et (les pertes actives de transmission avec le critère économique) durant le processus d'optimisation par la méthode PSO-TVAC.

Le critère de la déviation de la tension et le critère économique du coût d'investissement du SVC sont respectivement (0.9403 [p.u], 7.0092 [MUS\$]), ainsi le critère de pertes actives dans les lignes et le critère économique d'investissement du SVC sont respectivement de l'ordre (6.7532 [p.u], 4.8464 [MUS\$]). Le Tableau (IV-8) expose la solution obtenue par l'approche PSO-TVAC.



**Figure IV.19** : Convergence de DV et IC Multi-Objectifs par PSO-TVAC avec SVC



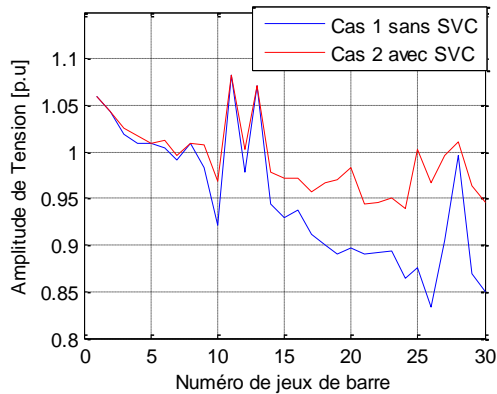
**Figure IV.20** : Convergence de DP et IC Multi-Objectifs par PSO-TVAC avec SVC

**Tableau IV.8** : Optimisation simultanément DV-IC et DP-IC par l'approche PSO-TVAC avec SVC.

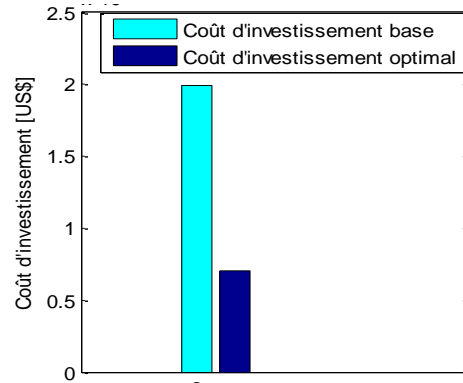
	N° JDB	Q [MVAR]	N° JDB	Q [MVAR]
Placement optimal de SVC	20	27.4579	15	15.9313
	25	31.6499	24	19.6048
	-	-	26	4.0513
	-	-	-	-
Nombre du SVC nécessaire	2		3	
Pertes totales [Mw]	7.3561		<b>6.7532</b>	
Déviaton de Tension [p.u]	<b>0.9403</b>		1.3792	
Investissement [US\$] X10 <sup>6</sup>	7.0092		4.8464	

D'après la convergence des algorithmes d'optimisation PSO-TVAC pour les premiers tests on remarque que les tensions après l'optimisation avec le coefficient de décision  $U = 0.5$  sont dans leurs limites admissibles entre 0.90 p.u et 1.10 p.u Figure (IV-21). Ainsi les coûts

d'investissements de dispositif SVC trouvés par ce teste est de l'ordre de 7.0092 [MUS\$] ont été réduit respectivement à -64.91% après optimisation par l'algorithme PSO-TVAC Figure (IV-22).

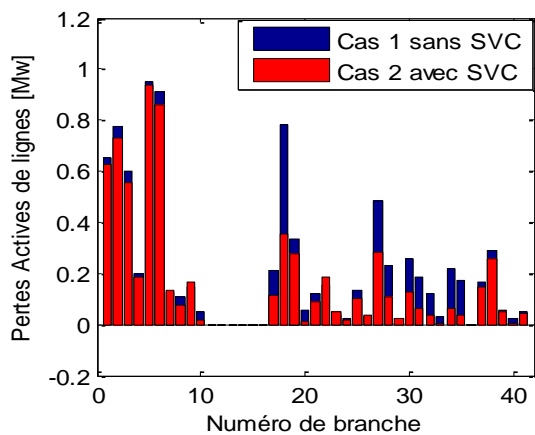


**Figure VII.21 :** Amplitude de tensions des JDB trouvé par PSO-TVAC et SVC avec FMO.

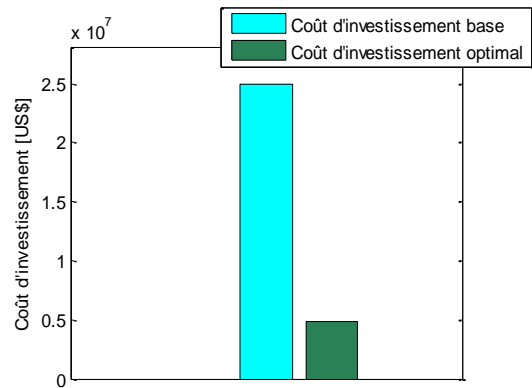


**Figure VII.22 :** Coût d'investissement de SVC trouvé par PSO-TVAC avec FMO.

Ansi le critère de pertes actives et le critère économique d'investissement du SVC pour le deuxième test sont respectivement à l'ordre de (6.7532 [p.u], 4.8464 [MUS\$]), ont été réduit respectivement à -15.27% et -98.06% après optimisation par l'algorithme PSO-TVAC. Figure (IV-23) et (IV-24).



**Figure IV.23 :** Pertes actives de branches trouvé par PSO-TVAC et SVC avec FMO.



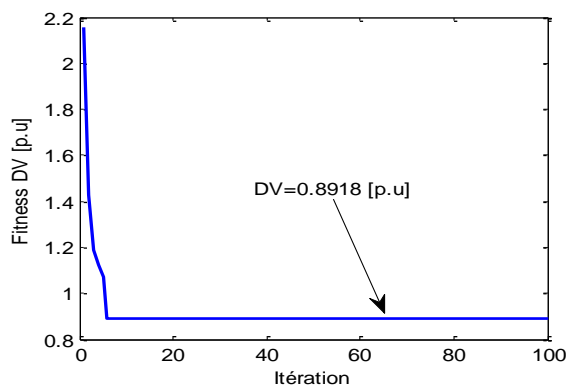
**Figure IV.24 :** Coût d'investissement de SVC trouvé par PSO-TVAC avec FMO.

### IV.2.2.2 Optimisation avec considération de TCSC

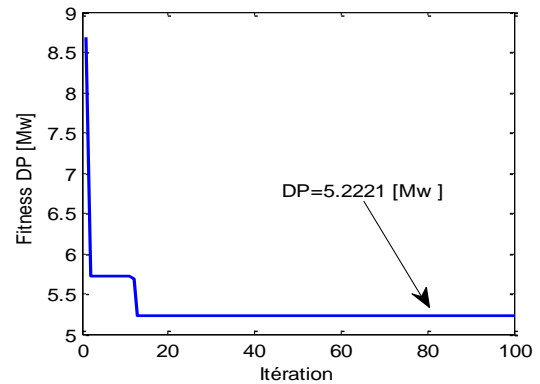
Ce test représente l'utilisation du compensateur série TCSC, comme un moyen de compensation dont le but est de minimiser individuellement la déviation de tensions et les pertes actives dans les lignes (mono-objectif), cela est réalisable par l'ajustement flexible des paramètres et de l'emplacement de TCSC. Dans la suite, on va minimiser la déviation de la tension avec le critère économique en même temps. Et les pertes actives dans les lignes avec le critère économique (multi-objectifs).

#### Fonction mono-objectif

Les Figures (IV-25) et (IV-26) montrent la convergence individuellement de fonctions mono-objectives  $DV$  et  $DP$  par la méthode PSO-TVAC.



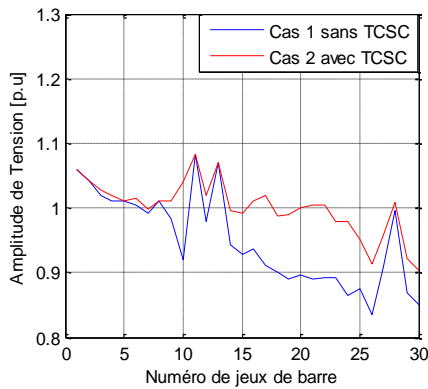
**Figure IV.25 :** Convergence de  $DV$  trouvé par PSO-TVAC avec TCSC



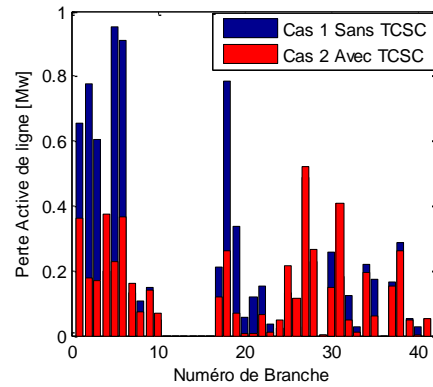
**Figure IV.26 :** Convergence de  $DP$  trouvé par PSO-TVAC avec TCSC

L'algorithme adapté PSO-TVAC est appliqué avec succès pour résoudre le problème d'optimisation de la déviation de la tension  $DV$  et les pertes actives de ligne  $DP$  individuellement avec considération de TCSC.

Les meilleures solutions de la déviation de la tension  $DV$  et les pertes actives de lignes calculées par PSO-TVAC avec considération de TCSC sont respectivement à l'ordre de 0.8918 [p.u], 5.2221 [Mw]. Le profil de tension et les pertes actives sont illustrés dans les Figures (IV-27) et (IV-28).



**Figure IV.27 :** Amplitude de tensions des JDB trouvé par PSO-TVAC avec TCSC.



**Figure IV.28 :** Pertes Actives de lignes trouvé par PSO-TVAC avec TCSC.

D'après les résultats de simulation on remarque clairement que les compensateurs TCSC peuvent améliorer et contrôler la puissance de transmission, ainsi peuvent améliorer la stabilité de la tension du réseau électrique. Le choix optimal de la taille, du nombre et les sites d'emplacement du TCSC récapitulés dans le Tableau (IV-9).

**Tableau IV.9 :** Optimisation individuellement de DV et DP par l'approche PSO-TVAC avec TCSC.

	Branche	X TCSC [p.u]	Branche	X TCSC [p.u]
Placement optimal de TCSC	9-11	-0.1404	6-7	-0.1351
	9-10	-0.1389	6-9	-0.1331
	4-12	-0.1446	22-24	-0.2189
	12-16	-0.1604	24-25	-0.0536
	22-24	-0.1539	27-30	-0.1658
Pertes totales [Mw]	7.6160		<b>5.2221</b>	
Déviations de Tension [p.u]	<b>0.8918</b>		1.2922	
Investissement [US\$] X10 <sup>6</sup>	1.1358		1.0905	

## Fonction multi-objectif

Maintenant on va traiter l'optimisation de divers objectifs simultanément par la méthode PSO-TVAC, il s'agit de minimiser la déviation de la tension avec le critère économique en même temps. Et les pertes actives dans les lignes avec le critère économique

Les fonctions multi objectifs adaptées sont définies par la déviation de la tension avec le critère économique. Et les pertes actives dans les lignes avec le critère économique comme suit:

$$Fitenss = U \frac{\sum_{i=1}^{n_j} |V_{ref} - V_i|}{V_{base}} + (1 - U) \frac{\sum_{i=1}^{NTCSC} IC_{TCSC}}{IC_{base}}$$

$$Fitenss = U \frac{\sum_{i=1}^{nb} P_{Li}}{P_{Lbase}} + (1 - U) \frac{\sum_{i=1}^{NSVC} IC_{TCSC}}{IC_{base}}$$

Où  $U \in [0 \ 1]$

Le deuxième terme de la fonction multi objectifs à optimiser correspond au coût d'investissement de compensateur TCSC, mathématiquement formulé et donné par l'équation suivante

$$IC_{TCSC} = C_{TCSC} \cdot S \cdot 1000$$

Où  $C_{TCSC}$  le coût des dispositifs TCSC [US\$/Mvar].

Le coût d'investissement de dispositif TCSC peut être calculé en utilisant la fonction du coût donné par  $IC_{TCSC} = C_{TCSC} \cdot S \cdot 1000$

Où  $C_{TCSC}$  le coût des dispositifs TCSC [US\$/Mvar].

Le coût d'investissement de dispositif SVC peut être calculé en utilisant la fonction du coût donné par

$$C_{TCSC} = 0.0015 \cdot S^2 - 0.7130 \cdot S + 153.75$$

$$S = |Q_2 - Q_1|$$

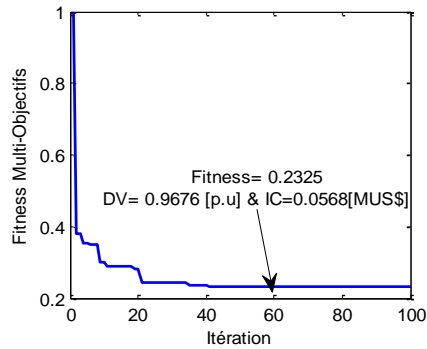
Où  $S$  est la plage de fonctionnement de TCSC [MVar]

$Q_1$  la puissance réactive de branche avant l'installation de TCSC.

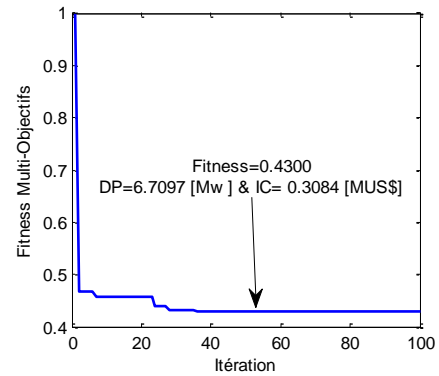
$Q_2$  la puissance réactive de branche après l'installation de TCSC.

le coefficient de décision  $U$  ont été choisi pour ce test ,  $U = 0.5$ .

L'application a été faite sur le même réseau électrique IEEE 30 bus. Donc les Figures IV-29 et IV-30 représentent l'évolution de fonctions multi objectifs (la déviation de la tension avec le critère économique). Et (les pertes actives de transmission avec le critère économique) durant le processus d'optimisation par la méthode PSO-TVAC avec les coefficients de décision  $U = 0.5$ .



**Figure IV.29 :** Convergence DV et IC Multi-Objectifs par PSO avec TCSC



**Figure IV.30 :** Convergence de DP et IC Multi-Objectifs par PSO avec TCSC

Les testes correspondent à l'optimisation de la déviation de la tension avec le critère économique d'investissement de TCSC et l'optimisation de pertes actives dans les lignes avec le critère économique sont respectivement à l'ordre de (0.9676 [p.u], 0.0568 [MUS\$]) et (6.7097 [Mw], 0.3084 [MUS\$]). Le Tableau (IV-10) expose la solution obtenue par l'approche PSO-TVAC.

**Tableau V.10 :** Optimisation simultanément DV-IC et DP-IC par l'approche PSO-TVAC avec TCSC.

	Branche	X TCSC [p.u]	Branche	X TCSC [p.u]
<b>Placement optimal de TCSC</b>	3-4	-0.1197	9-10	-0.1745
	10-20	-0.3245	19-20	-0.1084
	10-21	-0.1126	10-21	-0.1181
	21-22	-0.0132	22-24	-0.2310
	27-30	-0.2184	-	-
<b>Pertes totales [Mw]</b>	<b>6.7097</b>		7.3087	
<b>Déviation de Tension [p.u]</b>	1.9361		<b>0.9676</b>	
<b>Investissement [US\$] X10<sup>6</sup></b>	0.3084		0.0568	

D'après la convergence l'algorithme d'optimisation PSO-TVAC dans les premiers tests on remarque que les tensions après l'optimisation sont dans leurs limites admissibles entre 0.90 p.u et 1.10 p.u. et les coûts d'investissements du dispositif TCSC a été réduit à l'ordre de -98.38% Figures (IV-31) et (IV-32). Ainsi dans le deuxième test on remarque que les pertes actives et le coût d'investissement de dispositif TCSC ont été réduits à l'ordre de -22.80% et -91.19% respectivement après optimisation par l'algorithme PSO-TVAC Figures (IV-33) et (IV-34).

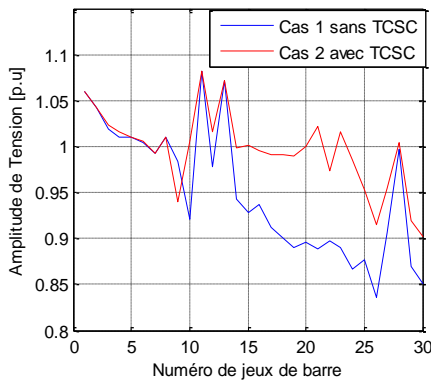


Figure IV.31 : Amplitude de tensions des JDB trouvés par PSO-TVAC et TCSC avec FMO.

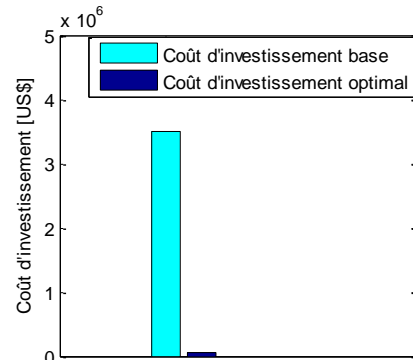


Figure IV.32 : Coût d'investissement de TCSC trouvé par PSO-TVAC avec FMO.

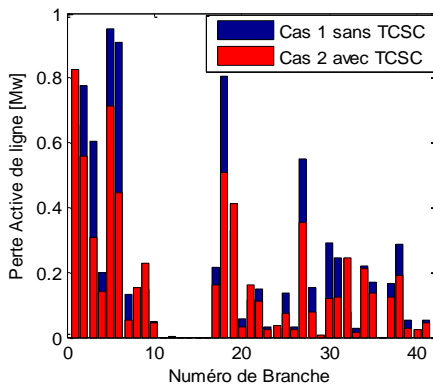


Figure IV.33 : Pertes actives de lignes trouvées par PSO-TVAC et TCSC avec FMO.

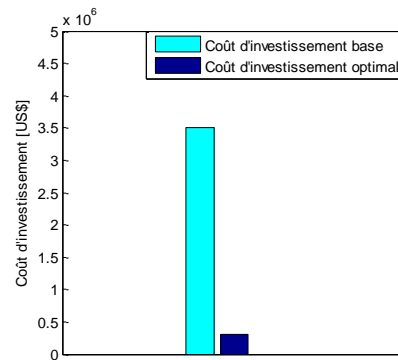


Figure IV.34 : Coût d'investissement de TCSC trouvé par PSO-TVAC avec FMO.

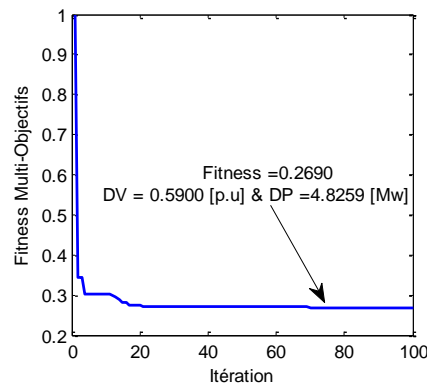
## Conclusion

Dans cette partie, les résultats obtenus confirment que les dispositifs SVC permettent d'améliorer efficacement l'exploitation du réseau électrique et de maintenir les tensions des nœuds du réseau électrique dans les limites admissibles.

Ainsi, les dispositifs TCSC permettent de minimiser les pertes actives de transmission. Dans ce contexte nous proposons dans la suite une coordination entre un dispositif shunt SVC et un dispositif série TCSC pour d'assurer une minimisation satisfaisante

### IV.2.2.3 Optimisation avec considération de coordination

Dans ce test nous proposons une coordination optimale d'un dispositif shunt SVC avec un dispositif série TCSC. Ceci permet d'assurer une minimisation satisfaisante de déviation de la tension et les pertes actives dans les lignes. La Figure (IV-35) montre l'évolution simultanément des fonctions multi objectifs de déviation de la tension et les pertes actives dans les lignes durant le processus d'optimisation par la méthode PSO-TVAC.



**Figure IV.35 :** Convergence de la Fonction Multi-Objectifs par PSO-TVAC avec coordination

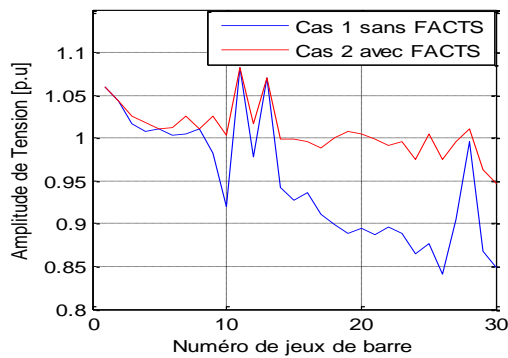
On voit d'après cette Figure (IV-35) que l'optimisation commence à partir d'une valeur initiale, et le passage d'un point de fonctionnement à un autre, jusqu'à l'atteinte du point de fonctionnement optimal de l'ordre 0.2690 qui correspond au 0.5900 p.u pour la déviation de la tension et 4.8259 Mw pour les pertes actives dans les lignes.

Les résultats de simulations obtenus par la coordination optimale d'un dispositif shunt SVC avec un dispositif série TCSC pour un réseau IEEE 30-bus ont été comparés avec les résultats de simulations obtenus par l'utilisation individuelle d'un dispositif shunt SVC et un dispositif série TCSC. Le Tableau (IV-11) expose une comparaison entre les solutions obtenues par l'approche PSO-TVAC.

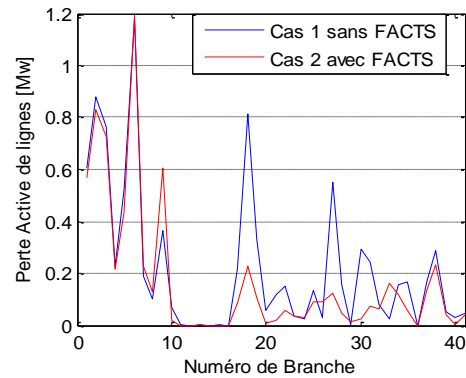
**Tableau IV.11** : Optimisation simultanément DV et DP par l'approche PSO-TVAC avec coordination.

	SVC		Coordination SVC & TCSC				TCSC	
	N°JDB	Q [MVAR]	N°JDB	Q [MVAR]	Bran	X TCSC [p.u]	Bran	X TCSC [p.u]
<b>Placement optimal</b>	19	24.5744	19	23.9878	2-5	-0.1327	6-7	-0.1351
	22	38.5501	21	47.5399	10-17	-0.0547	6-9	-0.1331
	25	33.1331	25	22.5873	-	-	22-24	-0.2189
	-	-	-	-	-	-	24-25	-0.0536
	-	-	-	-	-	-	27-30	-0.1658
<b>Déviations de tensions [p.u]</b>	0.5837		0.5900				1.2922	
<b>Pertes totales [Mw]</b>	6.5525		4.8259				<b>5.2221</b>	

Le profil de tension et les pertes actives dans la ligne sont illustrés dans les Figures (IV-36) et (IV-37).



**Figure IV.36** : Amplitude de tensions des barres trouvé par PSO-TVAC et coordination avec FMO.



**Figure IV.37** : Pertes actives de lignes trouvé par PSO-TVAC et coordination avec FMO.

### IV.3. Conclusion :

Dans ce chapitre on a proposé trois algorithmes d'optimisation par essaim de particules pour résoudre le problème d'optimisation des critères de la déviation de la tension, les pertes actives de transmission et le critère économique d'investissement aux FACTS, et ce par le choix optimal de la taille, du nombre et ainsi de l'emplacement des dispositifs FACTS. Dans le but d'améliorer la stabilité de tension de réseaux électrique. L'application a été effectuée sur un réseau IEEE 30- bus avec augmentation au niveau de puissance réactive demandée et appliquée uniformément sur la totalité de charge du réseau afin d'étudier l'impact sur la stabilité statique de tension. Les résultats obtenus confirment de ces méthodes à résoudre les problèmes liés à la dimensionnement et la coordination des systèmes FACTS dans le but le fonctionnement du réseaux électrique d'une manière dynamique.

## *Conclusion Générale*

A travers ce mémoire, on a montré l'effet du dispositif FACTS série et shunt sur l'écoulement de puissance et en particulier le profil des tensions d'un réseau électrique en utilisant les méthodes de résolution des équations non-linéaires de Newton-Raphson pour le calcul de la répartition de charge.

, On a présenté pour la dernière étape le schéma électrique équivalent du réseau étudié en détail à savoir (IEEE 30JB) et nous avons étudié l'écoulement de puissance de ce réseau en régime équilibré avec l'absence du SVC et TCSC.

Pour améliorer le contrôle du réseau électrique, Dans ce cadre, nous avons orienté nos travaux vers l'étude de la stabilité de tension en régime statique, spécialement l'emplacement optimal, dimensionnement, le comportement statique et la coordination des dispositifs FACTS au réseau électrique. Les deux types de dispositifs FACTS choisis en particulier dans cette étude sont :

1. Compensateur statique d'énergie réactive SVC.
2. Compensateur série commandé par thyristors TCSC .

En suite on a fait une coordination entre les dispositifs "SVC" et "TCSC" ce qui nous donne des meilleurs résultats ce qui concerne la compensation de l'énergie réactive, le profil de tension et la minimisation des pertes actives de transmission.

Les résultats obtenus montrent clairement que la coordination entre les dispositifs de contrôle SVC et TCSC peut jouer un rôle très important dans le domaine de la compensation des puissances réactives et le contrôle des tensions des différents nœuds en comparaison avec l'utilisation d'un seul dispositif séparément...

Comme perspective de ce travail, nous proposons de :

1. Contrôler les tensions et les transits de puissance réactive par intégration d'autres dispositifs FACTS, tels que : le STATCOM, SSSC et UPFC.
2. Proposition des autres coordinations des dispositifs FACTS pour améliorer la stabilité statique de tension des réseaux électriques.
3. Elargissement de la fonction objective en tenant compte d'autres critères de la stabilité de tension.
4. Faire des études avec autres méthodes d'optimisation soit conventionnelles ou évolutives.

## ANNEXE A

## A.1 Réseaux Electrique à 30 jeux de barres (IEEE 30-bus)

Tableau (A-1) Données des jeux de barres du réseau 30 jeux de barres

N° JDB	Tension		Puissance générée		Puissance demandée		Nature de JDB
	Amplitude [p.u]	Angle [deg]	[Mw]	[Mvar]	[Mw]	[Mvar]	
1	1.060	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1
2	1.043	0.00	0.00	0.00	21.70	12.7	2
3	1.000	0.00	0.00	0.00	02.40	01.2	3
4	1.000	0.00	0.00	0.00	07.60	01.6	3
5	1.010	0.00	0.00	0.00	94.20	19.0	2
6	1.000	0.00	0.00	0.00	00.00	00.0	3
7	1.000	0.00	0.00	0.00	22.80	10.9	3
8	1.010	0.00	0.00	0.00	30.00	30.0	2
9	1.000	0.00	0.00	0.00	00.00	00.0	3
10	1.000	0.00	0.00	0.00	05.80	02.0	3
11	1.082	0.00	0.00	0.00	00.00	00.0	2
12	1.000	0.00	0.00	0.00	11.20	07.5	3
13	1.071	0.00	0.00	0.00	00.00	00.0	2
14	1.000	0.00	0.00	0.00	06.20	01.6	3
15	1.000	0.00	0.00	0.00	08.20	02.5	3
16	1.000	0.00	0.00	0.00	03.50	01.8	3
17	1.000	0.00	0.00	0.00	09.00	05.8	3
18	1.000	0.00	0.00	0.00	03.20	00.9	3
19	1.000	0.00	0.00	0.00	09.50	03.4	3
20	1.000	0.00	0.00	0.00	02.20	00.7	3
21	1.000	0.00	0.00	0.00	17.50	11.2	3
22	1.000	0.00	0.00	0.00	00.00	00.0	3
23	1.000	0.00	0.00	0.00	03.20	01.6	3
24	1.000	0.00	0.00	0.00	08.70	06.7	3
25	1.000	0.00	0.00	0.00	00.00	00.0	3
26	1.000	0.00	0.00	0.00	03.50	02.3	3
27	1.000	0.00	0.00	0.00	00.00	00.0	3
28	1.000	0.00	0.00	0.00	00.00	00.0	3
29	1.000	0.00	0.00	0.00	02.40	00.9	3
30	1.000	0.00	0.00	0.00	10.60	01.9	3

**A.2. Données des lignes du réseau :**

**Tableau (A-2) Données des lignes du réseau électrique à 30 J.D.B.**

N° Branche	Du J.D.B	Au J.D.B	R [p.u]	X [p.u]	B/2 [p.u]
1	1	2	0.0192	0.0575	0.02640
2	1	3	0.0452	0.1852	0.02040
3	2	4	0.0570	0.1737	0.01840
4	3	4	0.0132	0.0379	0.00420
5	2	5	0.0472	0.1983	0.02090
6	2	6	0.0581	0.1763	0.01870
7	4	6	0.0119	0.0414	0.00450
8	5	7	0.0460	0.1160	0.01020
9	6	7	0.0267	0.0820	0.08500
10	6	8	0.0120	0.0420	0.00450
11	6	9	0.0000	0.2080	0.00000
12	6	10	0.0000	0.5560	0.00000
13	9	11	0.0000	0.2080	0.00000
14	9	10	0.0000	0.1100	0.00000
15	4	12	0.0000	0.2560	0.00000
16	12	13	0.0000	0.1400	0.00000
17	12	14	0.1231	0.2559	0.00000
18	12	15	0.0662	0.1304	0.00000
19	12	16	0.0945	0.1987	0.00000
20	14	15	0.2210	0.1997	0.00000
21	16	17	0.0824	0.1923	0.00000
22	15	18	0.1073	0.2185	0.00000
23	18	19	0.0639	0.1292	0.00000
24	19	20	0.0340	0.0680	0.00000
25	10	20	0.0936	0.2090	0.00000
26	10	17	0.0324	0.08450	0.00000
27	10	21	0.0348	0.0749	0.00000
28	10	22	0.0727	0.1499	0.00000
29	21	22	0.0116	0.0236	0.00000
30	15	23	0.1000	0.2020	0.00000
31	22	24	0.1150	0.1790	0.00000
32	23	24	0.1320	0.2700	0.00000
33	24	25	0.1885	0.3292	0.00000
34	25	26	0.2544	0.3800	0.00000
35	25	27	0.1093	0.2087	0.00000
36	28	27	0.0000	0.3960	0.00000
37	27	29	0.2198	0.4153	0.00000
38	27	30	0.3202	0.6027	0.00000
39	29	30	0.2399	0.4533	0.00000
40	8	28	0.0636	0.2000	0.02140
41	6	28	0.0169	0.0599	0.06500

## ANNEXE B

### RÉSULTATS DE LA SIMULATION

#### B-1 Résultats de placement optimal des trois SVC dans un réseau 30 jeux de barres

Tableau (B-1) : Tension et puissance au niveau de J.D.B

TENSION ET PUISSANCE AU NIVEAU DE J.D.B						
JdB	Tension		Puissance Générée		Puissance Demandée	
N°	Module	Argument	MW	Mvar	MW	Mvar
1	1.0600	0.0000	99.9525	16.4538	0.0000	0.0000
2	1.0430	-1.6404	80.0000	33.4933	21.7000	38.1000
3	1.0285	-3.7499	0.0000	0.0000	2.4000	3.6000
4	1.0217	-4.4892	0.0000	0.0000	7.6000	4.8000
5	1.0100	-6.3485	50.0000	58.6375	94.2000	57.0000
6	1.0169	-5.3146	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	0.9992	-6.1377	0.0000	0.0000	22.8000	32.7000
8	1.0100	-5.5119	20.0000	70.1209	30.0000	90.0000
9	1.0278	-6.7974	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10	1.0061	-8.8093	0.0000	0.0000	5.8000	6.0000
11	1.0820	-4.6536	20.0000	28.5703	0.0000	0.0000
12	1.0163	-7.9203	0.0000	0.0000	11.2000	22.5000
13	1.0710	-6.4462	20.0000	42.0973	0.0000	0.0000
14	0.9966	-8.7275	0.0000	0.0000	6.2000	4.8000
15	0.9953	-8.9784	0.0000	0.0000	8.2000	7.5000
16	0.9961	-8.3902	0.0000	0.0000	3.5000	5.4000
17	0.9906	-8.7592	0.0000	0.0000	9.0000	17.4000
18	1.0000	-10.0292	0.0000	0.0000	3.2000	2.7000
19	1.0084	-10.5069	0.0000	0.0000	9.5000	10.2000
20	1.0064	-10.1177	0.0000	0.0000	2.2000	2.1000
21	0.9970	-9.4005	0.0000	0.0000	17.5000	33.6000
22	1.0040	-9.5722	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
23	0.9831	-9.3622	0.0000	0.0000	3.2000	4.8000
24	0.9845	-9.7479	0.0000	0.0000	8.7000	20.1000
25	1.0353	-11.1371	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
26	1.0002	-10.9017	0.0000	0.0000	3.5000	6.9000
27	1.0192	-9.9453	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
28	1.0169	-5.9001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
29	0.9871	-10.8417	0.0000	0.0000	2.4000	2.7000
30	0.9705	-11.6059	0.0000	0.0000	10.6000	5.7000

Tableau (B-1-1) Puissances transmises et perte au niveau des lignes

PUISSANCES TRANSMISES ET PERETE AU NIVEAU DES LIGNES								
BRANCHES			Puissances transmises				Pertes	
N°	AU	DU	P(I J)	Q(I J)	P(J I)	Q(J I)	PL	QL
1	1	2	59.173	9.402	-58.548	-13.370	0.624	-3.968
2	1	3	40.780	7.052	-40.076	-8.617	0.704	-1.565
3	2	4	31.536	1.183	-31.010	-3.501	0.526	-2.318
4	3	4	37.676	5.017	-37.495	-5.380	0.181	-0.363
5	2	5	45.578	6.027	-44.647	-6.520	0.931	-0.493
6	2	6	39.734	1.554	-38.884	-2.942	0.850	-1.388
7	4	6	36.629	1.192	-36.476	-1.594	0.153	-0.402
8	5	7	0.447	8.158	-0.409	-10.120	0.038	-1.963
9	6	7	22.578	5.878	-22.391	-22.580	0.187	-16.702
10	6	8	12.196	12.750	-12.159	-13.543	0.038	-0.793
11	6	9	13.003	-5.163	-13.003	5.557	0.000	0.394
12	6	10	11.217	2.316	-11.217	-1.611	0.000	0.705
13	9	11	-20.000	-26.409	20.000	28.570	0.000	2.161
14	9	10	33.003	20.852	-33.003	-19.265	0.000	1.587
15	4	12	24.275	2.889	-24.275	-1.424	0.000	1.466
16	12	13	-20.000	-39.446	20.000	42.097	0.000	2.651
17	12	14	7.598	4.204	-7.509	-4.017	0.090	0.187
18	12	15	18.053	7.344	-17.810	-6.864	0.243	0.480
19	12	16	7.424	6.823	-7.331	-6.627	0.093	0.196
20	14	15	1.309	-0.783	-1.303	0.788	0.005	0.005
21	16	17	3.831	1.227	-3.817	-1.196	0.013	0.031
22	15	18	5.917	-4.962	-5.852	5.093	0.065	0.132
23	18	19	2.652	-7.793	-2.609	7.881	0.043	0.088
24	19	20	-6.891	6.494	6.921	-6.434	0.030	0.060
25	10	20	9.215	-4.123	-9.121	4.334	0.094	0.210
26	10	17	5.278	16.453	-5.183	-16.204	0.096	0.249
27	10	21	16.083	4.874	-15.986	-4.665	0.097	0.209
28	10	22	7.843	-2.329	-7.795	2.428	0.048	0.099
29	21	22	-1.514	-28.935	1.612	29.134	0.098	0.199
30	15	23	4.996	3.538	-4.958	-3.461	0.038	0.076
31	22	24	6.183	6.988	-6.084	-6.834	0.099	0.155
32	23	24	1.758	-1.339	-1.752	1.352	0.007	0.014
33	24	25	-0.865	-14.618	1.282	15.347	0.417	0.728
34	25	26	3.652	7.127	-3.500	-6.900	0.152	0.227
35	25	27	-4.934	10.659	5.075	-10.390	0.141	0.269
36	28	27	18.463	0.048	-18.463	1.257	0.000	1.305
37	27	29	6.234	4.618	-6.107	-4.378	0.127	0.241
38	27	30	7.155	4.515	-6.934	-4.099	0.221	0.415
39	29	30	3.707	1.678	-3.666	-1.601	0.041	0.077
40	8	28	2.159	-6.337	-2.145	1.984	0.014	-4.353
41	6	28	16.365	-11.244	-16.318	-2.032	0.047	-13.276

**Tableau (B-1-3) Puissances et perte totale**

```
*****  
la puissance active générée Totale(MW) est:          289.9525  
La puissance réactive générée Totale(MVAR) est:      249.3730  
La Puissance active demand e Totale(MW) est:       283.4000  
La puissance réactive demand e Totale(MVAR) est:    378.6000  
Les Pertes Actives Totale(MW) est:                  6.5525  
Les Pertes Réactives Totale(MVAR) est:              -32.9694  
*****
```

**B-2 Résultats de placement optimal deux SVC dans un réseau 30 jeux de barres**

**Tableau (B-2-1) Tension et puissance au niveau de J.D.B**

TENSION ET PUISSANCE AU NIVEAU DE J.D.B						
JdB	Tension		Puissance Généréé		Puissance Demandée	
N°	Module	Argument	MW	Mvar	MW	Mvar
1	1.0600	0.0000	100.7561	18.2734	0.0000	0.0000
2	1.0430	-1.6591	80.0000	38.6598	21.7000	38.1000
3	1.0249	-3.7384	0.0000	0.0000	2.4000	3.6000
4	1.0174	-4.4742	0.0000	0.0000	7.6000	4.8000
5	1.0100	-6.3871	50.0000	60.9079	94.2000	57.0000
6	1.0125	-5.2752	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	0.9966	-6.1291	0.0000	0.0000	22.8000	32.7000
8	1.0100	-5.5485	20.0000	83.3613	30.0000	90.0000
9	1.0083	-6.6669	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10	0.9682	-8.7282	0.0000	0.0000	5.8000	6.0000
11	1.0820	-4.4815	20.0000	38.7418	0.0000	0.0000
12	1.0023	-8.2262	0.0000	0.0000	11.2000	22.5000
13	1.0710	-6.7315	20.0000	52.8089	0.0000	0.0000
14	0.9775	-9.0142	0.0000	0.0000	6.2000	4.8000
15	0.9719	-9.1195	0.0000	0.0000	8.2000	7.5000
16	0.9716	-8.5196	0.0000	0.0000	3.5000	5.4000
17	0.9563	-8.7395	0.0000	0.0000	9.0000	17.4000
18	0.9676	-10.0320	0.0000	0.0000	3.2000	2.7000
19	0.9708	-10.4256	0.0000	0.0000	9.5000	10.2000
20	0.9829	-10.4508	0.0000	0.0000	2.2000	2.1000
21	0.9437	-8.9231	0.0000	0.0000	17.5000	33.6000
22	0.9464	-8.9613	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
23	0.9503	-9.3484	0.0000	0.0000	3.2000	4.8000
24	0.9395	-9.5251	0.0000	0.0000	8.7000	20.1000
25	1.0028	-11.2309	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
26	0.9665	-10.9794	0.0000	0.0000	3.5000	6.9000
27	0.9962	-10.1689	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
28	1.0114	-5.8632	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
29	0.9632	-11.1086	0.0000	0.0000	2.4000	2.7000
30	0.9461	-11.9118	0.0000	0.0000	10.6000	5.7000

Tableau (B-2-2) Puissances transmises et perte au niveau des lignes

PUISSANCES TRANSMISES ET PERETE AU NIVEAU DES LIGNES								
BRANCHES			Puissances transmises				Pertes	
N°	AU	DU	P(I J)	Q(I J)	P(J I)	Q(J I)	PL	QL
1	1	2	59.743	9.230	-59.107	-13.166	0.635	-3.936
2	1	3	41.013	9.043	-40.285	-10.494	0.728	-1.451
3	2	4	31.862	3.664	-31.313	-5.898	0.549	-2.234
4	3	4	37.885	6.894	-37.698	-7.233	0.187	-0.339
5	2	5	45.756	6.000	-44.818	-6.465	0.938	-0.464
6	2	6	39.789	4.061	-38.924	-5.386	0.865	-1.326
7	4	6	35.345	1.488	-35.201	-1.914	0.144	-0.426
8	5	7	0.618	10.372	-0.559	-12.277	0.059	-1.905
9	6	7	22.413	3.792	-22.241	-20.423	0.172	-16.630
10	6	8	12.370	2.176	-12.352	-3.031	0.019	-0.855
11	6	9	11.921	2.234	-11.921	-1.935	0.000	0.298
12	6	10	10.620	8.398	-10.620	-7.404	-0.000	0.994
13	9	11	-20.000	-35.364	20.000	38.742	0.000	3.377
14	9	10	31.921	37.300	-31.921	-34.692	0.000	2.608
15	4	12	26.066	6.842	-26.066	-5.046	0.000	1.796
16	12	13	-20.000	-48.917	20.000	52.809	0.000	3.892
17	12	14	8.083	5.855	-7.961	-5.601	0.122	0.254
18	12	15	18.728	13.948	-18.369	-13.241	0.359	0.708
19	12	16	8.055	11.660	-7.866	-11.263	0.189	0.397
20	14	15	1.761	0.801	-1.752	-0.793	0.009	0.008
21	16	17	4.366	5.863	-4.320	-5.754	0.047	0.109
22	15	18	6.311	-1.106	-6.265	1.201	0.047	0.095
23	18	19	3.065	-3.901	-3.048	3.935	0.017	0.034
24	19	20	-6.452	-14.135	6.539	14.309	0.087	0.174
25	10	20	8.932	-10.619	-8.739	11.049	0.192	0.429
26	10	17	4.736	11.792	-4.680	-11.646	0.056	0.146
27	10	21	15.529	24.496	-15.217	-23.824	0.312	0.672
28	10	22	7.543	10.428	-7.415	-10.163	0.128	0.265
29	21	22	-2.283	-9.776	2.296	9.803	0.013	0.027
30	15	23	5.609	7.640	-5.514	-7.448	0.095	0.192
31	22	24	5.119	0.360	-5.085	-0.307	0.034	0.053
32	23	24	2.314	2.648	-2.296	-2.611	0.018	0.037
33	24	25	-1.319	-17.182	1.953	18.289	0.634	1.107
34	25	26	3.663	7.144	-3.500	-6.900	0.163	0.244
35	25	27	-5.616	6.217	5.692	-6.071	0.076	0.146
36	28	27	19.101	4.594	-19.101	-3.099	0.000	1.494
37	27	29	6.243	4.636	-6.109	-4.383	0.134	0.253
38	27	30	7.166	4.535	-6.934	-4.098	0.232	0.437
39	29	30	3.709	1.683	-3.666	-1.602	0.043	0.081
40	8	28	2.352	-3.608	-2.347	-0.749	0.005	-4.357
41	6	28	16.802	-9.299	-16.754	-3.845	0.048	-13.144

**Tableau (B-2-3)**Puissances et perte totale

```
*****  
la puissance active générée Totale(MW) est:          290.7561  
La puissance réactive générée Totale(MVAR) est:      292.7531  
La Puissance active demandée Totale(MW) est:        283.4000  
La puissance réactive demandée Totale(MVAR) est:    378.6000  
Les Pertes Actives Totale(MW) est:                   7.3561  
Les Pertes Réactives Totale(MVAR) est:              -26.7391  
*****
```

**B-3 Résultats de placement optimal Les cinq TCSC dans un réseau 30 jeux de barres**  
**Tableau (B-3-1) Tension et puissance au niveau de J.D.B**

TENSION ET PUISSANCE AU NIVEAU DE J.D.B						
JdB	Tension		Puissance Générée		Puissance Demandée	
N°	Module	Argument	MW	Mvar	MW	Mvar
1	1.0600	0.0000	101.7678	16.6593	0.0000	0.0000
2	1.0430	-1.6814	80.0000	35.9949	21.7000	38.1000
3	1.0273	-3.7960	0.0000	0.0000	2.4000	3.6000
4	1.0203	-4.5450	0.0000	0.0000	7.6000	4.8000
5	1.0100	-6.4258	50.0000	59.9566	94.2000	57.0000
6	1.0143	-5.3734	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	0.9977	-6.2035	0.0000	0.0000	22.8000	32.7000
8	1.0100	-5.5749	20.0000	79.9316	30.0000	90.0000
9	1.0101	-8.4096	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10	1.0413	-7.6840	0.0000	0.0000	5.8000	6.0000
11	1.0820	-7.7009	20.0000	115.1345	0.0000	0.0000
12	1.0189	-6.0477	0.0000	0.0000	11.2000	22.5000
13	1.0710	-4.5773	20.0000	40.1430	0.0000	0.0000
14	0.9960	-6.7194	0.0000	0.0000	6.2000	4.8000
15	0.9925	-6.7638	0.0000	0.0000	8.2000	7.5000
16	1.0105	-6.3630	0.0000	0.0000	3.5000	5.4000
17	1.0197	-7.3745	0.0000	0.0000	9.0000	17.4000
18	0.9867	-7.5677	0.0000	0.0000	3.2000	2.7000
19	0.9889	-7.9034	0.0000	0.0000	9.5000	10.2000
20	1.0004	-7.9050	0.0000	0.0000	2.2000	2.1000
21	1.0052	-7.8813	0.0000	0.0000	17.5000	33.6000
22	1.0036	-7.9189	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
23	0.9788	-6.7418	0.0000	0.0000	3.2000	4.8000
24	0.9782	-6.5795	0.0000	0.0000	8.7000	20.1000
25	0.9519	-7.4938	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
26	0.9135	-7.2135	0.0000	0.0000	3.5000	6.9000
27	0.9561	-8.1206	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
28	1.0097	-5.6536	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
29	0.9215	-9.1438	0.0000	0.0000	2.4000	2.7000
30	0.9036	-10.0226	0.0000	0.0000	10.6000	5.7000

Tableau (B-3-2) Puissances transmises et perte au niveau des lignes

PUISSANCES TRANSMISES ET PERETE AU NIVEAU DES LIGNES								
BRANCHES			Puissances transmises				Pertes	
N°	AU	DU	P(I J)	Q(I J)	P(J I)	Q(J I)	PL	QL
1	1	2	60.420	9.026	-59.771	-12.922	0.648	-3.896
2	1	3	41.348	7.634	-40.621	-9.098	0.727	-1.465
3	2	4	31.902	1.946	-31.361	-4.213	0.541	-2.267
4	3	4	38.221	5.498	-38.034	-5.841	0.187	-0.343
5	2	5	45.903	5.978	-44.959	-6.418	0.944	-0.441
6	2	6	40.266	2.893	-39.387	-4.184	0.879	-1.291
7	4	6	37.324	3.648	-37.163	-4.019	0.161	-0.371
8	5	7	0.759	9.375	-0.710	-11.307	0.049	-1.932
9	6	7	22.266	4.726	-22.090	-21.393	0.176	-16.667
10	6	8	10.707	6.990	-10.687	-7.843	0.020	-0.853
11	6	9	26.092	2.741	-26.092	-1.349	0.000	1.392
12	6	10	7.659	-4.762	-7.659	5.202	0.000	0.440
13	9	11	-6.500	-34.856	6.500	37.419	0.000	2.563
14	9	10	-12.110	-28.532	12.110	29.567	0.000	1.036
15	4	12	10.648	0.699	-10.648	-0.419	0.000	0.280
16	12	13	-20.000	-37.688	20.000	40.143	0.000	2.455
17	12	14	7.346	5.607	-7.245	-5.397	0.101	0.211
18	12	15	16.058	12.539	-15.793	-12.018	0.265	0.521
19	12	16	3.996	2.407	-3.976	-2.365	0.020	0.042
20	14	15	1.045	0.597	-1.041	-0.594	0.003	0.003
21	16	17	6.274	-7.434	-6.197	7.612	0.076	0.178
22	15	18	6.122	-0.337	-6.081	0.420	0.041	0.083
23	18	19	2.881	-3.120	-2.869	3.144	0.012	0.024
24	19	20	-6.631	-13.344	6.708	13.498	0.077	0.154
25	10	20	9.210	16.272	-8.908	-15.598	0.302	0.674
26	10	17	3.000	25.527	-2.803	-25.012	0.197	0.515
27	10	21	23.141	39.449	-22.469	-38.004	0.671	1.445
28	10	22	12.601	20.090	-12.224	-19.313	0.377	0.778
29	21	22	4.969	4.404	-4.964	-4.394	0.005	0.010
30	15	23	2.513	5.449	-2.476	-5.375	0.037	0.074
31	22	24	-2.541	16.000	2.841	-15.533	0.300	0.466
32	23	24	-0.724	0.575	0.725	-0.572	0.001	0.002
33	24	25	6.784	3.965	-6.663	-3.753	0.122	0.212
34	25	26	3.683	7.173	-3.500	-6.900	0.183	0.273
35	25	27	2.980	-3.420	-2.955	3.467	0.025	0.047
36	28	27	10.493	13.889	-10.493	-12.712	0.000	1.177
37	27	29	6.260	4.670	-6.113	-4.393	0.147	0.277
38	27	30	7.188	4.575	-6.934	-4.096	0.254	0.479
39	29	30	3.713	1.693	-3.666	-1.604	0.047	0.089
40	8	28	0.687	-2.226	-0.687	-2.138	0.000	-4.364
41	6	28	9.826	-1.491	-9.806	-11.751	0.020	-13.242

**Tableau (B-3-3) Puissances et perte totale**

```
*****  
la puissance active générée Totale(MW) est:           291.7678  
La puissance réactive générée Totale(MVAR) est:       347.8201  
La Puissance active demand e Totale(MW) est:        283.4000  
La puissance réactive demand e Totale(MVAR) est:    378.6000  
Les Pertes Actives Totale(MW) est:                   7.6160  
Les Pertes Réactives Totale(MVAR) est:              -31.2313  
*****
```

**B-4 Résultats de placement optimal Les quatre TCSC dans un réseau 30 jeux de barres**

**Tableau (B-4-1) Tension et puissance au niveau de J.D.B**

TENSION ET PUISSANCE AU NIVEAU DE J.D.B						
JdB	Tension		Puissance Généréé		Puissance Demandée	
N°	Module	Argument	MW	Mvar	MW	Mvar
1	1.0600	0.0000	101.6756	18.7704	0.0000	0.0000
2	1.0430	-1.7059	80.0000	43.5511	21.7000	38.1000
3	1.0234	-3.6721	0.0000	0.0000	2.4000	3.6000
4	1.0156	-4.3930	0.0000	0.0000	7.6000	4.8000
5	1.0100	-6.5327	50.0000	64.0962	94.2000	57.0000
6	1.0064	-5.3870	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	0.9929	-6.2533	0.0000	0.0000	22.8000	32.7000
8	1.0100	-5.7205	20.0000	102.1887	30.0000	90.0000
9	0.9418	-9.9530	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10	1.0048	-7.7547	0.0000	0.0000	5.8000	6.0000
11	1.0820	-7.6133	20.0000	73.3485	0.0000	0.0000
12	1.0129	-6.4339	0.0000	0.0000	11.2000	22.5000
13	1.0710	-4.9549	20.0000	44.7010	0.0000	0.0000
14	0.9936	-6.8730	0.0000	0.0000	6.2000	4.8000
15	0.9952	-6.7639	0.0000	0.0000	8.2000	7.5000
16	0.9934	-7.0868	0.0000	0.0000	3.5000	5.4000
17	0.9888	-7.6312	0.0000	0.0000	9.0000	17.4000
18	0.9790	-7.4698	0.0000	0.0000	3.2000	2.7000
19	0.9750	-7.7502	0.0000	0.0000	9.5000	10.2000
20	0.9731	-8.0725	0.0000	0.0000	2.2000	2.1000
21	1.0133	-5.9035	0.0000	0.0000	17.5000	33.6000
22	0.9749	-7.8652	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
23	1.0074	-6.0391	0.0000	0.0000	3.2000	4.8000
24	0.9731	-6.5341	0.0000	0.0000	8.7000	20.1000
25	0.9460	-7.4913	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
26	0.9072	-7.2073	0.0000	0.0000	3.5000	6.9000
27	0.9498	-8.1476	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
28	1.0035	-5.6927	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
29	0.9150	-9.1849	0.0000	0.0000	2.4000	2.7000
30	0.8970	-10.0765	0.0000	0.0000	10.6000	5.7000

Tableau (B-4-2) Puissances transmises et perte au niveau des lignes

PUISSANCES TRANSMISES ET PERETE AU NIVEAU DES LIGNES								
BRANCHES			Puissances transmises				Pertes	
N°	AU	DU	P(I J)	Q(I J)	P(J I)	Q(J I)	PL	QL
1	1	2	61.168	8.800	-60.505	-12.653	0.663	-3.853
2	1	3	40.508	9.970	-39.787	-11.446	0.721	-1.476
3	2	4	30.884	4.991	-30.358	-7.289	0.525	-2.298
4	3	4	37.387	7.846	-37.203	-8.189	0.185	-0.342
5	2	5	46.637	5.867	-45.665	-6.187	0.972	-0.320
6	2	6	41.284	7.246	-40.327	-8.273	0.956	-1.027
7	4	6	45.651	9.357	-45.399	-9.402	0.252	-0.045
8	5	7	1.465	13.283	-1.371	-15.093	0.093	-1.810
9	6	7	21.576	1.071	-21.429	-17.607	0.147	-16.536
10	6	8	10.754	-12.132	-10.724	11.322	0.030	-0.810
11	6	9	36.276	32.707	-36.276	-27.808	0.000	4.899
12	6	10	7.514	0.449	-7.514	-0.138	0.000	0.311
13	9	11	-20.000	-63.079	20.000	73.348	0.000	10.269
14	9	10	-32.998	-53.293	32.998	58.166	0.000	4.873
15	4	12	14.310	1.321	-14.310	-0.809	0.000	0.513
16	12	13	-20.000	-41.774	20.000	44.701	0.000	2.927
17	12	14	5.441	5.044	-5.375	-4.906	0.066	0.137
18	12	15	9.095	9.144	-8.988	-8.933	0.107	0.211
19	12	16	8.575	5.895	-8.475	-5.685	0.100	0.210
20	14	15	-0.825	0.106	0.827	-0.105	0.002	0.001
21	16	17	4.975	0.285	-4.954	-0.237	0.021	0.048
22	15	18	7.367	3.816	-7.293	-3.665	0.075	0.152
23	18	19	4.093	0.965	-4.081	-0.941	0.012	0.024
24	19	20	7.396	-0.906	-7.376	0.946	0.020	0.040
25	10	20	7.845	11.722	-7.660	-11.310	0.184	0.412
26	10	17	4.149	17.432	-4.046	-17.163	0.103	0.269
27	10	21	-40.205	7.976	40.784	-6.730	0.579	1.246
28	10	22	8.890	15.733	-8.655	-15.248	0.235	0.485
29	21	23	18.321	16.442	-18.253	-16.303	0.068	0.139
30	15	23	-7.406	-2.279	7.467	2.401	0.061	0.122
31	22	24	-8.199	6.399	8.330	-6.195	0.131	0.204
32	23	24	7.586	9.102	-7.404	-8.728	0.183	0.374
33	24	25	6.987	4.044	-6.857	-3.818	0.130	0.227
34	25	26	3.685	7.176	-3.500	-6.900	0.185	0.276
35	25	27	3.172	-3.359	-3.146	3.409	0.026	0.050
36	28	27	10.309	13.837	-10.309	-12.666	0.000	1.171
37	27	29	6.263	4.676	-6.114	-4.394	0.149	0.281
38	27	30	7.192	4.582	-6.934	-4.096	0.258	0.486
39	29	30	3.714	1.694	-3.666	-1.604	0.048	0.090
40	8	28	0.724	0.867	-0.718	-5.185	0.006	-4.319
41	6	28	9.608	-4.420	-9.591	-8.651	0.016	-13.072

**Tableau (B-4-2) Puissances et perte totale**

```
*****  
la puissance active générée Totale(MW) est:          291.6756  
La puissance réactive générée Totale(MVAR) est:      346.6558  
La Puissance active demand e Totale(MW) est:        283.4000  
La puissance réactive demand e Totale(MVAR) est:    378.6000  
Les Pertes Actives Totale(MW) est:                   7.3087  
Les Pertes Réactives Totale(MVAR) est:              -15.4608  
*****
```

**B-5 Résultats de placement optimal Les trois SVC et deux TCSC (coordination) dans un réseau 30 jeux de barres**

**Tableau (B-5-1) Tension et puissance au niveau de J.D.B**

TENSION ET PUISSANCE AU NIVEAU DE J.D.B

JdB	Tension		Puissance Généréé		Puissance Demandée	
N°	Module	Argument	MW	Mvar	MW	Mvar
1	1.0600	0.0000	99.5133	16.3718	0.0000	0.0000
2	1.0430	-1.6714	80.0000	35.7186	21.7000	38.1000
3	1.0286	-3.6099	0.0000	0.0000	2.4000	3.6000
4	1.0218	-4.3187	0.0000	0.0000	7.6000	4.8000
5	1.0100	-5.4400	50.0000	56.0754	94.2000	57.0000
6	1.0165	-5.0694	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	0.9988	-5.6225	0.0000	0.0000	22.8000	32.7000
8	1.0100	-5.2676	20.0000	72.2593	30.0000	90.0000
9	1.0280	-6.6672	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10	1.0069	-8.7383	0.0000	0.0000	5.8000	6.0000
11	1.0820	-4.5238	20.0000	28.4540	0.0000	0.0000
12	1.0187	-7.6609	0.0000	0.0000	11.2000	22.5000
13	1.0710	-6.1903	20.0000	40.2503	0.0000	0.0000
14	1.0007	-8.4481	0.0000	0.0000	6.2000	4.8000
15	1.0011	-8.7185	0.0000	0.0000	8.2000	7.5000
16	0.9978	-8.2077	0.0000	0.0000	3.5000	5.4000
17	0.9916	-8.6541	0.0000	0.0000	9.0000	17.4000
18	1.0034	-9.8129	0.0000	0.0000	3.2000	2.7000
19	1.0104	-10.3190	0.0000	0.0000	9.5000	10.2000
20	1.0081	-9.9585	0.0000	0.0000	2.2000	2.1000
21	1.0002	-9.0598	0.0000	0.0000	17.5000	33.6000
22	0.9943	-8.9757	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
23	0.9974	-9.0440	0.0000	0.0000	3.2000	4.8000
24	0.9777	-9.1735	0.0000	0.0000	8.7000	20.1000
25	1.0082	-10.2133	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
26	0.9720	-9.9646	0.0000	0.0000	3.5000	6.9000
27	0.9997	-9.4092	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
28	1.0147	-5.5878	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
29	0.9669	-10.3421	0.0000	0.0000	2.4000	2.7000
30	0.9499	-11.1392	0.0000	0.0000	10.6000	5.7000

Tableau (B-5-2) Puissances transmises et perte au niveau des lignes

PUISSANCES TRANSMISES ET PERETE AU NIVEAU DES LIGNES								
BRANCHES			Puissances transmises				Pertes	
N°	AU	DU	P(I J)	Q(I J)	P(J I)	Q(J I)	PL	QL
1	1	2	60.116	9.117	-59.474	-13.031	0.643	-3.914
2	1	3	39.397	7.255	-38.736	-8.996	0.661	-1.742
3	2	4	29.545	1.673	-29.080	-4.181	0.464	-2.508
4	3	4	36.336	5.396	-36.167	-5.794	0.169	-0.398
5	2	5	37.213	7.375	-36.571	-9.086	0.641	-1.712
6	2	6	37.134	2.490	-36.386	-4.189	0.747	-1.698
7	4	6	33.941	3.244	-33.808	-3.717	0.133	-0.473
8	5	7	5.730	6.420	-5.690	-8.378	0.040	-1.957
9	6	7	17.256	7.507	-17.110	-24.322	0.146	-16.815
10	6	8	11.945	11.757	-11.912	-12.562	0.034	-0.805
11	6	9	14.007	-5.457	-14.007	5.912	0.000	0.455
12	6	10	11.779	2.132	-11.779	-1.361	0.000	0.771
13	9	11	-20.000	-26.305	20.000	28.454	0.000	2.149
14	9	10	34.007	20.393	-34.007	-18.757	0.000	1.637
15	4	12	23.706	1.930	-23.706	-0.543	0.000	1.387
16	12	13	-20.000	-37.785	20.000	40.250	0.000	2.466
17	12	14	7.258	3.709	-7.179	-3.545	0.079	0.164
18	12	15	17.093	5.236	-16.889	-4.835	0.204	0.402
19	12	16	8.155	6.883	-8.051	-6.665	0.104	0.218
20	14	15	0.979	-1.255	-0.973	1.260	0.006	0.005
21	16	17	4.551	1.265	-4.533	-1.222	0.018	0.043
22	15	18	6.682	-4.273	-6.615	4.410	0.067	0.137
23	18	19	3.415	-7.110	-3.375	7.190	0.039	0.080
24	19	20	-6.125	6.598	6.152	-6.544	0.027	0.054
25	10	20	8.434	-4.260	-8.352	4.444	0.082	0.184
26	10	17	4.560	16.420	-4.467	-16.178	0.093	0.242
27	10	21	9.620	4.465	-9.581	-4.382	0.039	0.083
28	10	22	5.558	5.755	-5.512	-5.660	0.046	0.095
29	21	23	3.771	10.048	-3.758	-10.020	0.013	0.027
30	15	23	2.980	0.348	-2.971	-0.330	0.009	0.018
31	22	24	5.512	5.660	-5.439	-5.547	0.073	0.113
32	23	24	3.530	5.550	-3.472	-5.433	0.057	0.117
33	24	25	0.211	-9.120	-0.047	9.407	0.164	0.287
34	25	26	3.661	7.141	-3.500	-6.900	0.161	0.241
35	25	27	-3.614	6.040	3.667	-5.938	0.053	0.102
36	28	27	17.073	4.423	-17.073	-3.227	0.000	1.196
37	27	29	6.241	4.633	-6.109	-4.382	0.133	0.251
38	27	30	7.164	4.532	-6.934	-4.099	0.230	0.433
39	29	30	3.709	1.682	-3.666	-1.601	0.043	0.080
40	8	28	1.912	-5.179	-1.904	0.817	0.008	-4.362
41	6	28	15.207	-8.034	-15.169	-5.240	0.038	-13.274

**Tableau (B-5-3) Puissances et perte totale**

```
*****  
la puissance active générée Totale(MW) est:          289.5133  
La puissance réactive générée Totale(MVAR) est:      249.1294  
La Puissance active demand e Totale(MW) est:        283.4000  
La puissance réactive demand e Totale(MVAR) est:    378.6000  
Les Pertes Actives Totale(MW) est:                   5.4644  
Les Pertes Réactives Totale(MVAR) est:              -36.2205  
*****
```

## *Bibliographies*

- [1]:DJARALLAH.T ,TOUMI .DJ « Etude de l'écoulement de puissance dans un réseau électrique en présence des systèmes FACTS ».mémoire mastre, université el oued,2017/2018.
- [2] : B. Abdelhak, «Etude de l'écoulement de puissance sur un réseau électrique en présence des systèmes FACTS» Mémoire Master académique, Université Kasdi Merbah Ouargla2016.
- [3] : LAALA.Z « commande d'un SVS pour le contrôle de la tension des lignes de transport d'énergie électrique », mémoire mastre, université M'sila,2015/1016.
- [4] : Gacem. Abdelmalek, «Commande robuste d'un dispositif FACTS par les Méthodes Méta heuristiques pour la Stabilité de Tension d'un Réseau Electrique.», Thèse de doctorat, option: Réseaux Électriques, Université de Biskra, soutenue 2018.
- [5] : MANCER Nabil « Contribution à l'optimisation de la puissance réactive en en présence de dispositifs de compensation dynamique (FACTS) » Thèse de Magister Université - Biskra, Algérie, Janvier 2012.
- [6] : BOT Youcef « Influence des FACTS sur le calcul de l'écoulement des puissances en utilisant un IPFC » Thèse de magistère, université d'Oran08/05/ 2011.
- [7] : Olle I. Elgerd - Electric Energy Systems Theory -An Introduction Mc Graw-Hill 1970.
- [8] M. RAHLI, « Contribution à l'étude de la répartition optimale des puissances actives dans un réseau d'énergie électrique ». Thèse de Doctorat, Université de UST Oran, 1996.
- [9] : SAYAH Samir, « Application de l'intelligence artificielle pour le fonctionnement optimal des systèmes électriques », Thèse de doctorat, Université de SETIF 1, 2009.
- [10] :R. Missoum, « Etude d'un dispatching économique des puissance active par les algorithmes de fourmis », Mémoire de Magister, Université de Chlef 2008
- [11] :B. Abdelhak, «Etude de l'écoulement de puissance sur un réseau électrique en présence des systèmes FACTS» Mémoire Master académique, Université Kasdi Merbah Ouargla2016.
- [12] : Jacques .C, Guillaume de Preville, Jean-Louis Sanhet “ Fluctuations de tension et flicker - Évaluation et atténuation (partie I et II) ”, Techniques de l'ingénieur D 4 315.
- [13] :MAMMERI Oussama, « Différentes méthodes de calcul de la puissance réactive dans une nœud a charge non linéaire en présence d'un système de compensation de l'énergie», Mémoire de magister, Option : Réseaux électriques, Université de Batna, 2011/2012.
- [14] :Site web : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Compensation\\_de\\_puissance\\_réactive](https://fr.wikipedia.org/wiki/Compensation_de_puissance_réactive).

- [15] :MERINI .Kamel, «Contribution à l'amélioration des méthodes évolutionnaires pour la répartition optimale des puissances: application dans un réseau d'énergie électrique avec et sans FACTS», Thèse de doctorat, Option : Réseaux électriques, Université de Sidi-Bel-Abbes, soutenue 2017.
- [16] : Sami AMMARI, «Interaction des dispositifs FACTS avec les charges dynamiques dans les réseaux de transport et d'interconnexion.», thèse de doctorat, spécialité : génie électrique, institue national polytechnique de Grenoble, soutenue
- [17] : J.C.Passelergue, rapport de thèse « Interactions des dispositifs FACTS dans les grands réseaux électriques » LEGIINPG, Novembre 1998.
- [18] : Abdelaàli Alibi, « contrôle des réseaux électriques par les systèmes FACTS », mémoire de magistère, option : électricité industrielle, université de Batna, soutenue le13/06/2009.
- [19] : MERAH Hana, «Planification optimale de la puissance réactive du réseau de transport Algérien», Mémoire Master académique, Universite Biskra ,2017/2018.
- [20] :Mezaache Mohamed, «analyse et traitement de la qualité d'énergie électrique en utilisant des dispositifs de contrôle des réseaux électriques à UPFC dans le cas de stabilité de la tension », mémoire de magister, option réseaux électriques, université de Batna, soutenu le24/11/2011.
- [21] : Haimour Rachida, « contrôle des puissances réactives et des tensions par les dispositifs FACTS dans un réseau électrique », mémoire de magister en électrotechnique, option identification modélisation et commande numérique des processus, école normale supérieure de l'enseignement technologique d'Oran, année universitaire 2008-2009.
- [22] : BESANGER Yvon « Etude des FACTS (Flexible AC Transmission System) et de leur comportement dans les réseaux de transport et d'interconnexion », l'institut national Polytechnique de Grenoble ,1996.
- [23] : Bekki.Brahim, « contribution du SMES, dispositifs FACTS, à la stabilisation d'un réseau électrique haute tension»,mémoire de magistère en électrotechnique , option réseaux électrique et haute tension ,école nationale polytechnique Alger ,soutenue le 20/09/2006.
- [24] : Kartobi Lamia, «Optimisation de la Synthèse des FACTS par les Algorithmes Génétiques et les Essaims Particulaires pour le contrôle des Réseaux Electriques », mémoire de magistère, option réseaux électriques et haute tension, école nationale polytechnique Alger, Soutenue le 29 Novembre 2006.

[25] : DELENDI LOUARDI, « contrôle de l'écoulement de puissance active par système », Mémoire de magistère en électrotechnique, Option : Electricité industrielle, université de Batna, soutenue le 25/06/ 2009.

[26] : YAHIAOUI Merzoug « Contrôle optimal des puissances réactives et des tensions dans un réseau d'énergie électrique par dispositifs FACTS », Thèse de Doctorat, Université d'Oran 2014.

[27] : FERHAD.Y , ABERBOUR.N « Contrôle d'écoulement de puissance par TCSC et SVC » , mémoire de Master, Université Bejai,2015.

[28] : Rabah. Benabid , «Optimisation Multi objectif de la Synthèse des FACTS par les Particules en Essaim pour le Contrôle de la Stabilité de Tension des Réseaux électriques», mémoire de magistère ,option : Analyse ,Conduite et Commande des réseaux électriques ,université Amar Telidji,Laghouat, soutenue le 04/09/2007.

[29] : BENCHEIKH, DEROUICHE « Etude de l'écoulement de puissance sur un réseau électrique en présence des systèmes FACTS » mémoire de Master, Université de Kasdi Merbah Ouargla, 02/06/2016.

[30] : LARFLO , AISSET.A « Développement d'un algorithme intelligent pour la commande des robots mobiles», mémoire de Master ,Université Tebessa,2015/2016.